НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Республиканское унитарное предприятие
«Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства»

Механизация и электрификация сельского хозяйства

Межведомственный тематический сборник
Основан в 1968 году

Выпуск 59

Минск
«Беларуская навука»
2026

УДК [631.171+633/635+636]:631.152.2(085)

В сборнике опубликованы основные результаты исследований по разработке инновационных технологий и технических средств для их реализации при производстве продукции растениеводства и животноводства, рассмотрены вопросы технического сервиса машин и оборудования, использования топливно-энергетических ресурсов, разработки и применения энергосберегающих технологий, электрификации и автоматизации, информационно-управляющих систем в технологиях АПК.

Материалы сборника могут быть использованы сотрудниками НИИ, КБ, специалистами хозяйств, студентами вузов и колледжей аграрного профиля.

Редакционная коллегия:

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси
П. П. Казакевич (председатель);
кандидат технических наук, доцент
Д. И. Комлач (зам. председателя);
доктор технических наук, доцент, член-корреспондент НАН Беларуси
В. В. Азаренко;
доктора технических наук, профессора, академики РАН
Н. М. Морозов, Я. П. Лобачевский (Российская Федерация);
доктора технических наук, профессора
В. И. Передня, Л. Я. Степук;
кандидаты технических наук, доценты
Н. Г. Бакач, А. Н. Перепечаев, В. К. Клыбик, Н. Д. Лепешкин, Э. В. Дыба, А. Н. Юрин, В. В. Голдыбан, Н. Ф. Капустин

Рецензенты:

кандидаты технических наук, доценты
Н. Г. Бакач, А. Н. Перепечаев, Э. В. Дыба, А. А. Жешко, Н. Ф. Капустин, В. К. Клыбик, Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, А. Н. Юрин;
кандидат технических наук П. П. Бегун; В. И. Володкевич

Приказом Председателя ВАК Республики Беларусь от 4 июля 2005 года № 101 межведомственный тематический сборник «Механизация и электрификация сельского хозяйства» (РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства») включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

© РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2026
© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2026

УДК 636.08.003

Поступила в редакцию 05.09.2025
Received 05.09.2025

Е. Л. Жилич, Д. И. Комлач, Ю. Н. Рогальская, В. В. Никончук, Д. В. Бернацкая

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДОЕНИЕ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Аннотация. Приведены основные конструктивные особенности доильных роботов различных компаний-производителей.

Ключевые слова: роботизированное доение, молочная продуктивность, автоматизация доения, рука-манипулятор, поворотная платформа, сосок, стакан, дойное стадо.

E. L. Zhilich, D. I. Komlach, Yu. N. Rogalskaya, V. V. Nikonchuk, D. V. Bernatskaya

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru

AUTOMATED MILKING: USE AND PROSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

Abstract. The main design features of milking robots from various manufacturing companies are presented.

Keywords: robotic milking, milk productivity, milking automation, robotic arm, rotating platform, teat, cup, milking herd.

Введение

В Беларуси автоматизация процесса доения внедряется и на молочно-товарных фермах, и на крупных сельскохозяйственных комплексах. Использование таких систем способствует максимальному раскрытию генетического потенциала животных. Это достигается благодаря управлению всеми динамическими процессами, включая доение и кормление концентратами, с помощью специализированного программного обеспечения. Такой подход позволяет не только снизить затраты на производство молока и увеличить его объемы, но и обеспечить более заботливое отношение к животным [1, 2, 3].

Основная часть

В роботизированном доении реализован ряд физиологически оправданных решений:

– почетвертное доение с отключением отдельных долей по окончании доения;

– обеспечение комфортных условий с выработкой набора стандартных действий и закреплением условных рефлексов;

– бережное отношение к соскам и вымени, что выражается в отключении вакуума при снятии аппарата, своевременности прекращения доения.

Компании-разработчики автоматизированных систем отмечают, что животные при свободном доступе в среднем выдаиваются 3–4 раза в сутки, что дает прибавку молочной продуктивности около 10–14 % уже на первой лактации, а при любой другой лактации – в диапазоне 9–12 %.

При использовании доильных роботов предъявляются более серьезные требования по отбору коров, пригодных к обслуживанию.

Основными требованиями по отбору коров являются:

– молочная продуктивность не менее 6 500 кг молока;

– расположение сосков не ниже 45 см от пола, вымя плотно прилегает к брюху;

– расстояние между сосками: задними – от 6 до 20 см, передними – от 12,5 до 25 см, передними и задними – от 6 до 14 см;

– диаметр сосков – 1,5–3,5 см (в средние часы между дойками);

– спокойный нрав коровы, высокая активность животного.

Система роботизированного доения реализует следующие концепции в своей работе (рисунок 1). Требования к коровам, пригодным к роботизированному доению, должны выдерживаться более строго, чем при обычном автоматизированном доении. Так, например, при неправильном расположении сосков робот может испытывать затруднения с подключением отдельной доли, делая многочисленные попытки. Некоторые системы распознавания сосков лучше работают с выменем, свободным от волосяного покрова.

Вспомогательными результатами автоматизации доения являются: стимулирование молокообразования, снижение заболеваемости маститом, снижение вероятности возникновения стрессов у коров. Одновременно автоматизируются многие ручные операции, а характер труда оператора машинного доения значительно видоизменяется. В большей степени уделяется внимание наблюдению за коровами, своевременному реагированию на изменение физиологического состояния, обеспечению всех потребностей животного [4–7].

Стоит отметить, что получение ожидаемых высоких результатов будет возможным при соблюдении ряда условий:

– постоянный надзор за работой оборудования, своевременное реагирование на возможные отклонения;

– своевременное техническое обслуживание доильного оборудования, обеспечение расходными материалами – моющие и дезинфицирующие растворы, горячая вода, сосковая резина;

– постоянный контроль здоровья животных;

– высокий уровень квалификации работников по обслуживанию оборудования, выполнения анализа данных компьютерных программ.

На сегодняшний день активному развитию роботизированного доения препятствует чрезмерно высокая стоимость установок. В зависимости от комплектации и компании-изготовителя, цена на однобоксовый роботизированный агрегат может доходить до 150 тыс. евро.

Притом, что предельная нагрузка на однобоксовый агрегат по числу обслуживаемых коров в течение суток не превышает 50–55 голов. А значит для обеспечения доения на небольшом комплексе с поголовьем дойного стада в 400 коров потребуется не менее 6–8 роботизированных станков.

Конструктивные и функциональные особенности доильных роботов при обслуживании коров во время доения. Выпуском автоматизированных систем доения (доильных роботов) занимается целый ряд производителей (таблица 1). Анализ конструктивных и функциональных особенностей позволяет выделить некоторые принципиальные различия и основные тенденции в развитии таких систем. Анализ предлагаемых на рынке роботов показывает, что компании, выпускающие доильных роботов, имеют разный подход к обслуживанию коров во время доения:

– наиболее полно и качественно выполняют подготовительные операции роботы VMS (DeLaval) и Astrea 20 20 (Insentec);



Рисунок 1 – Концепция автоматизированной системы доения

Таблица 1 – **Основные конструктивные особенности доильных роботов различных компаний-производителей**

Функциональные возможности, преимущества	Преддоильная обработка, надевание стаканов	Последоильная обработка, снятие стаканов	Система распознавания положения сосков
Lely, Astronaut A3, Голландия			
Одновременное скармливание концентратов; оптические датчики контроля качества и количества молока, система определения соматических клеток; последоильная обработка стаканов горячей водой	Очистка сосков вращающимися щетками; поочередное надевание рукой-манипулятором, которая остается под коровой	Разбрызгивание раствора направленной струей; стягивание стаканов без участия манипулятора	Сенсорный датчик
DeLaval, VMS, Швеция			
Одновременное скармливание концентратов; система выравнивания молочных шлангов; оптические датчики контроля качества и количества молока, отдельный счетчик соматических клеток; последоильная обработка стаканов горячей водой снаружи и внутри; мойка пола после каждой коровы	Обмывание теплой водой и воздухом; сдаивание первых струек в отдельный стакан; высушивание соска; поочередное надевание рукой-манипулятором, которая затем отводится в сторону	Разбрызгивание раствора направленной струей; стягивание стаканов без участия манипулятора	Два лазера
Fullwood Ltd., Merlin, Англия			
Возможность одновременного скармливания концентратов и дополнительно жидких и минеральных добавок; низкий расход воды и электроэнергии, низкий уровень шума; последоильная обработка стаканов кислотным раствором; оптические датчики контроля качества и количества молока, включая диагностику мастита	Очистка сосков вращающимися щетками; поочередное надевание рукой-манипулятором, которая остается под коровой	Разбрызгивание раствора направленной струей	Сенсорный датчик
GEA Farm Technologies, ML one, Германия			
Последоильная обработка стаканов горячей водой снаружи и внутри; одновременное скармливание концентратов; низкий расход воды, электроэнергии	Поочередное надевание рукой-манипулятором, использование двух рук в работе		
S. A. Christensen RDS Futureline MAX, Дания			
Использование одной руки-манипулятора; последоильная обработка стаканов паром; сканирование молока по цвету (IMAC/IM); низкий расход воды и электроэнергии	Сдаивание первых струек в отдельный доильный стакан; преддоильная обработка раствором; поочередное надевание рукой-манипулятором	Разбрызгивание раствора направленной струей; стягивание стаканов без участия манипулятора	Лазер; видеодатчик
Insentec, Astrea 20 20, Австрия			
Одновременное скармливание концентратов; система выравнивания молочных шлангов; оптические датчики контроля качества и количества молока; одна рука на два бокса; последоильная обработка стаканов паром	Обмывание теплой водой и воздухом; сдаивание первых струек в отдельный стакан; высушивание соска; поочередное надевание рукой-манипулятором, которая затем отводится в сторону	Разбрызгивание раствора направленной струей; стягивание стаканов без участия манипулятора	Два лазера

– доильный робот немецкой компании GEA Farm Technologies является, по сути, автоматизированным рабочим боксом и выполняет только операции доения;

– наиболее технологичным является датский робот RDS Futureline MAX и близкий к нему Astrea 20 20;

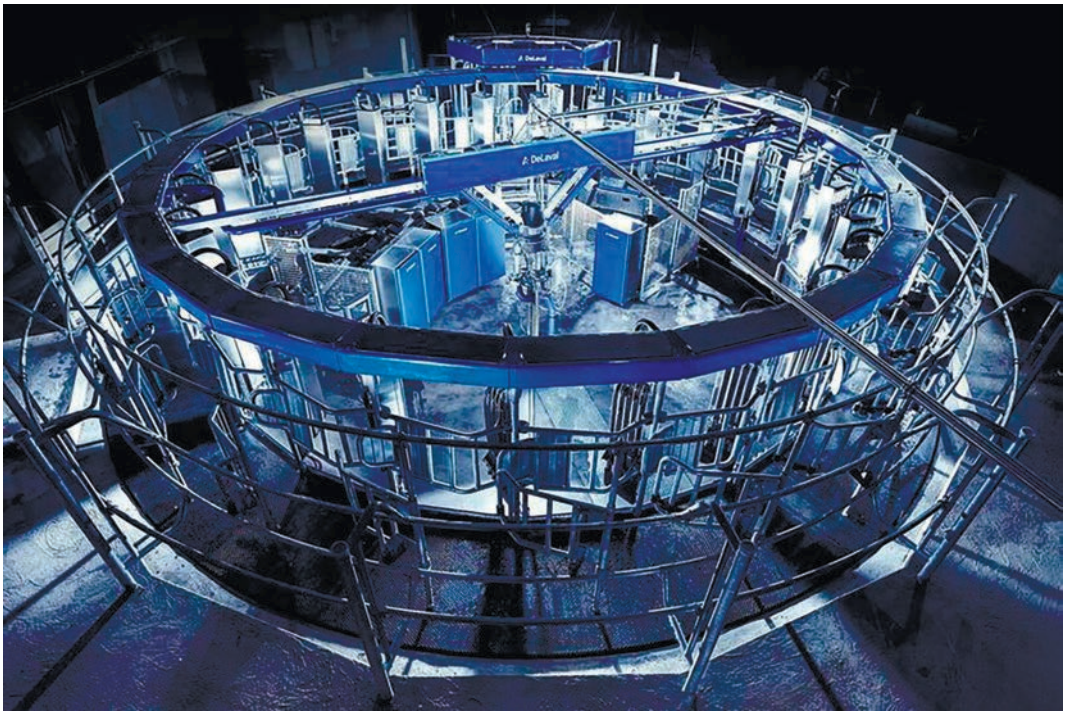


Рисунок 2 – Автоматизированная роторная установка DeLaval AMR

– разработчики предлагают инновационные решения для доильных роботов: использование одной руки на два бокса, функцию выравнивания доильных шлангов, одновременное скармливание многокомпонентных кормов и др.

Одно-, двухбоксовые доильные роботы с учетом ценового вопроса не совсем удовлетворяют потребности крупных комплексов по производству молока. В этом случае робот компании GEA «ML one» выглядит как узкоспециализированный агрегат. Такой подход нашел свое развитие в дальнейшем поиске решений для крупнотоварных комплексов. С целью обеспечения автоматизированного доения, компании разработчики современного оборудования переходят на принципиально новые формы организации доения [8–9].

Лидер мирового производства доильного оборудования – шведская компания DeLaval разработала принципиально новую схему организации доения. Установка носит название DeLaval AMR (рисунок 2). Схематично платформа спроектирована по роторной схеме и в целом напоминает гибрид доильных залов типа «Карусель» и «Параллель».

Установка представляет собой поворотную платформу на 24 доильных места. Каждая корова обслуживается последовательно одним из пяти гидравлических однозадачных роботов. Автоматизированная роторная установка позволяет проводить доение по одной из применяемых схем: групповое доение, частичное добровольное или полностью добровольное доение. Такой подход позволяет внедрить установку под любую из существующих технологий. Основные характеристики DeLaval AMR представлены в таблице 2.

Таблица 2 – **Основные характеристики роторной автоматизированной доильной установки DeLaval AMR**

Показатель	Характеристика показателя
Обслуживаемое поголовье, максимально гол/сут	1 600
Количество используемых роботов, шт.	5
Роботы 1 и 2	Очистка сосков, обработка и высушивание, сдаивание первых струек
Робот 3 и 4	Подключение доильных стаканов на соски, проверка правильности подключения
Робот 5	Последоильная обработка сосков

Доильная установка имеет также некоторые инновационные формы, обеспечивающие соблюдения операций доения с целью получения молока высокого качества, сохранения здоровья коровы:

– организация почетвертного доения. Эта возможность обеспечивается использованием индивидуального счетчика для каждой четверти вымени;

– индивидуальное отключение стаканов. Каждое доильное место оборудовано контролером доения, который отслеживает процесс доения и принимает участие в отключении отдельной четверти от доения;

– система управления фермой «DeLaval DelPro farm management» определяет допуск к доению, принимает решение о прекращении доения, определяет сброс доильного аппарата;

– последоильная обработка проводится для сосков вымени за счет работы 3D-камер, а также обрабатывается каждый доильный стакан между доением коров. Для обеспечения гигиены доения после схода коровы с площадки проводится мойка каждого доильного места.

Таким образом, автоматизированная доильная установка DeLaval AMR способна обеспечить автоматическое доение на крупных комплексах с размером дойного стада до 800 голов [10].

Заключение

Использование роботизированных систем доения является перспективным направлением в молочном скотоводстве Беларуси. Основным достоинством роботизированных комплексов доения является существенная экономия затрат труда. При этом достигается высокий уровень физиологичности доения вследствие строгого соблюдения технологии. Эффективность использования роботизированных систем доения коров заключается не только в преимуществах автоматизации индустриального производства, но и в достижении технологического эффекта путем создания физиологически более благоприятных условий для коров. Роботизированное доение гарантирует наивысшее качество молока, а его уникальные функции управления обеспечивают полный контроль над стадом.

Список использованных источников

1. О современных технологиях в животноводстве : офиц. сайт Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – Мн., 2007–2026. – URL: http://www.minagro.gov.by/technologies/livestock/ (дата обращения: 01.10.2025).

2. Автоматизация доения: опыт белорусских хозяйств : инф. портал «Агробизнес Беларуси». – Мн., 2010–2026. – URL: https://agrobelarus.by/news/avtomatizatsiya-doeniya-opyt-belorusskin-hozyaystv (дата обращения: 01.10.2025).

3. Шевченко, В. А. Внедрение роботизированных систем доения на молочно-товарных фермах Беларуси: опыт и перспективы / В. А. Шевченко, А. М. Ковалев // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 12(2). – С. 78–85.

4. Организационно-технологические требования при производстве молока на молочных комплексах промышленного типа: республиканский регламент / И. В. Брыло [и др.] ; ред. Л. Е. Крапивина. – Мн., 2014. – 105 с.

5. Тихомиров, И. А. Технологические особенности использования доильных роботов в молочном скотоводстве / И. А. Тихомиров, В. К. Скоркин // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 1 (37). – С. 32–37.

6. Тимошенко, В. Н. Технологическая концепция и конструктивно-технические решения молочно-товарного комплекса нового поколения / В. Н. Тимошенко, А. А. Музыка, М. В. Барановский [и др.] // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2020. – Ч. 2. – С. 83–93.

7. Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. – Мн. : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2017. – С. 50–100.

8. Ерошенко, Е. Лучшие белорусские производители молока в прицеле статистики / Е. Ерошенко // Белорусское сельское хозяйство. – 2023. – № 2 (250). – С. 18–19.

9. Портной, А. И. Прогрессивные технологии в молочном скотоводстве – путь к производству конкурентной по качеству продукции / А. И. Портной / Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства : сб. науч. тр. / гл. ред. М. В. Шалак, Бел. гос. с.-х. акад. – Горки, 2007. – Вып. 10. – Ч. 2. – С. 120–126.

10. Цифровые технологии в животноводстве. Скотоводство. Курс Ц75 лекций : учеб.-метод. пособие / Ю. В. Истранин [и др.]. – Витебск : ВГАВМ, 2021. – 64 с.

УДК 636.08.003

Поступила в редакцию 05.09.2025
Received 05.09.2025

Е. Л. Жилич, Д. И. Комлач, Ю. Н. Рогальская

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ДОЕНИЯ КОРОВ

Аннотация. В статье приведены основные технические характеристики роботов и метод обнаружения сосков при разработке отечественных роботизированных систем доения.

Ключевые слова: промышленная технология, роботизированное доение, система позиционирования, вымя, дойное стадо, 3D-камера, доильная установка, программно-аппаратный комплекс, манипулятор, критерий роста, критерий остановки.

E. L. Zhilich, D. I. Komlach, Yu. N. Rogalskaya

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru

CREATION OF FUNDAMENTAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT AND OPTIMAL USE OF ROBOTIC SYSTEMS IN INDUSTRIAL COW MILKING TECHNOLOGIES

Abstract. The main technical characteristics of robots and the method of detecting teats in the development of domestic robotic milking systems are presented.

Keywords: industrial technology, robotic milking, positioning system, udder, milking herd, 3D camera, milking unit, hardware and software system, manipulator, growth criterion, stopping criterion.

Введение

Благодаря эффективной экономической политике, принятой руководством страны в отношении модернизации аграрной отрасли, в первой четверти XXI в. производство молока в Республике Беларусь динамично развивается и к настоящему времени достигло впечатляющих результатов: 4-е место в мире по удельному производству молока на душу населения, или более 850 кг/чел/год [1, 2]. Это послужило основой для развития молочной перерабатывающей промышленности страны и выхода на передовые позиции на мировом рынке, где у нас также 4-е место по экспорту молока и молочных продуктов, что в ценовом исчислении превышает 2 млрд долл. США/год [3].

Вместе с тем, учитывая жесткую конкуренцию на мировых рынках, актуальным остается вопрос повышения рентабельности и конкурентоспособности промышленного производства молока. Несмотря на высокие количественные показатели, отечественная молочная отрасль пока еще характеризуется относительно высоким уровнем удельных затрат, т. е. производственных затрат на тонну молока нормативного качества [4].

Наряду с правильным кормлением, условиями содержания животных и зооветеринарной профилактикой, процесс машинного доения играет ключевую роль в повышении молочной продуктивности: если процесс машинного доения и доильное оборудование не эффективны, то генетический потенциал, кормление и условия преддоильного содержания коров не имеют решающего значения [5, 6].

Анализ мировых технологий промышленного производства молока и лучших отечественных практик позволил определить тенденции и сформулировать главные направления развития

производства отечественного доильного оборудования – обеспечение качества процесса доения и физиологичности, т. е. учета биологических особенностей процессов молокообразования и молоковыведения у лактирующих коров [7–9].

В настоящее время в стране накоплен значительный опыт применения автоматизированного доильного оборудования, сформированы научные заделы, освоено производство элементной базы и выпуск полнокомплектных доильных залов [10–12].

Следует отметить, что повышение уровня автоматизации доильного оборудования, способного обеспечить полное замещение трудозатрат и учет индивидуальных особенностей каждого животного при выборе режимов доения, связано с применением автоматических линий доения и роботов.

Основная часть

Начиная с 1999 г., в европейских странах с наиболее развитым молочным животноводством (Нидерланды, Германия, Швеция, Дания, Великобритания) стали широко использоваться специальные доильные роботы [13–15]. Основные особенности доильных роботов как отдельного направления в общей классификации способов содержания и доения коров, отличающие их от существующих систем автоматизированного доения, связаны с возможностью добровольного выбора животным времени доения, а также автоматизированным надеванием доильных стаканов на соски и индивидуальным режимом доения каждой четверти вымени.

Результаты анализа информации из открытых источников, в основном производителей оборудования, о технико-технологических характеристиках роботов представлены в таблице.

Выделяются два варианта технологической адаптации роботизированных систем:

– роботизированные поточные линии, ярким примером которых является робот-карусель (рисунок 1);

– однобоксовые (с двумя или несколькими боксами) отдельные доильные роботы (рисунок 2), применение которых вполне отвечает принципу «добровольного доения» и не ставит целью создание высокопроизводительных поточных линий доения.

В настоящее время в Республике Беларусь на промышленных молочно-товарных фермах и комплексах применяются, как правило, однобоксовые доильные роботы, сблокированные в одной или нескольких зонах коровника с беспривязным содержанием [16–18].

К хозяйствам, в которых применяются доильные роботы, можно отнести СПК «Соколовщина», УПП «Ужица-Агро», СХП «Мазоловогаз», УП «Короли» филиала «Весна-энерго», филиал «Тепличный» РУП «Витебскэнерго», филиал «Весна-энерго», ОАО «Хотилы-Агро» в Витебской области; ОАО «Косино» и СХК «Великополье» КУП «Минсктранс» в Минской области; ОАО «Моисеевка» в Гомельская области; СПК «Коммунар Агро» и ПКУП совхоз «Сморгонский» в Гродненской области; ОАО «Александрийское» в Могилевской области. Роботы-карусели используются в РПУП «Устье» Оршанского района Витебской области (GEA DairyProQ на 40 доильных мест) и ОАО «Беловежский» Каменецкого района Брестской области (AMR DeLaval на 40 доильных мест).

Комплексный научный анализ роботизированных доильных систем, включая опыт их эксплуатации в хозяйствах республики, с участием специалистов в области инженерии, зоотехнии и ветеринарии – все это позволило приступить к формированию научно-практических заделов для создания отечественных образцов роботизированного доильного оборудования [19–21].

Анализ показал, что основой оборудования нового поколения должны стать созданные в предыдущие годы отечественные автоматизированные модули управления доением [22, 23] и серийно выпускаемые узлы и системы из отечественной элементной базы для механизированного доения.

Было принято решение разработать комплекс программно-аппаратный роботизированной системы доения, предназначенный для позиционирования доильного оборудования на вымени коровы при роботизированной технологии доения, которая является унифицированной составляющей для обоих вариантов роботизированных систем доения – боксовых и поточных (рисунки 1, 2).

Основные технические характеристики роботов

Наименование показателя	Бокс-площадка			Дубль-бокс		Полибокс	
	VMS («Де Лаваль», Швеция)	Merlin (Fullwood, Англия)	Astronaut (Lely, Нидерланды)	Galaxy (SAC, Дания)	Titan (RMS, Нидерланды)	AMS Liberty (Prolion, Нидерланды)	Leonardo («Вестфалия», Германия)
Число обслуживаемых животных	60	60	60–70	80–90	80–90	3 бокса – 120 4 бокса – 150	3 бокса – 130 4 бокса – 170
Способ предварительного позиционирования	Передвижной кормушкой	Без ограничения движения животных	Ограничителем в задней части бокса	Передвижной кормушкой			
Позиционирование манипулятора	Лазер, видеокамера	Лазер	Лазер	Лазер, оптическая система, ультразвук		Ультразвук, оптическая система	
Сдаивание первых струек молока	Одновременно с мойкой сосков вымени	Каждый сосок вымени отдельно				Одновременно с мойкой сосков вымени	Каждый сосок отдельно
Надевание доильных стаканов на соски вымени коровы	На каждый сосок отдельно						
Снятие доильных стаканов	Последовательно с каждого соска без руки робота				Все доильные стаканы одновременно без руки робота		Последовательно с каждого соска без руки робота
Основная циркуляционная мойка оборудования	В течение 12–30 мин 3 раза в сутки с моечным или дезраствором					По необходимости (30 мин), не менее 2 раз в сутки	
Контролируемые компьютером параметры	Частота посещений бокса, надой, электропроводимость молока, количество комбикорма, интервалы между доениями, регистрация активности животных						

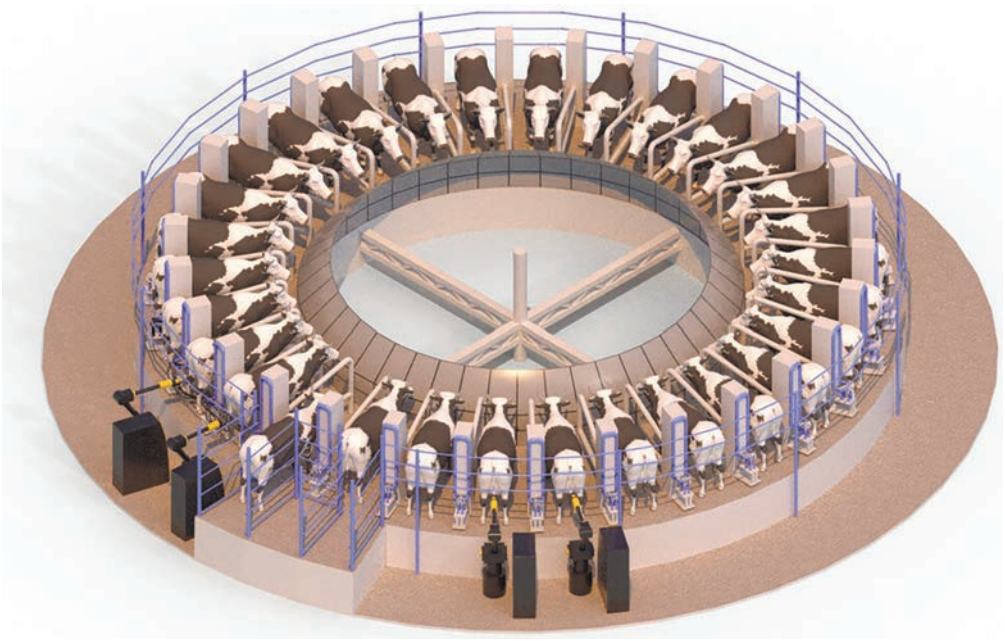


Рисунок 1 – Роботизированная доильная установка «Карусель»



Рисунок 2 – Роботизированная доильная установка «Дубль-бокс»

Принятый алгоритм использует в качестве входных данных трехмерный набор данных с 3D-камеры, а также информацию о положении и ориентации камеры, полученную от роботизированного манипулятора, на котором установлена камера. В результате обработки входных данных алгоритм генерирует набор обнаруженных сосков, включая их положение, размер и ориентацию.

В разрабатываемом программно-аппаратном комплексе используется 3D-камера O3D314. Еще одним вариантом технического зрения является использование стереопары (вид стереоизображения, представленный парой плоских перспективных изображений объекта, сделанных с помощью камер, которые получили из двух разных точек зрения, расположенных между собой

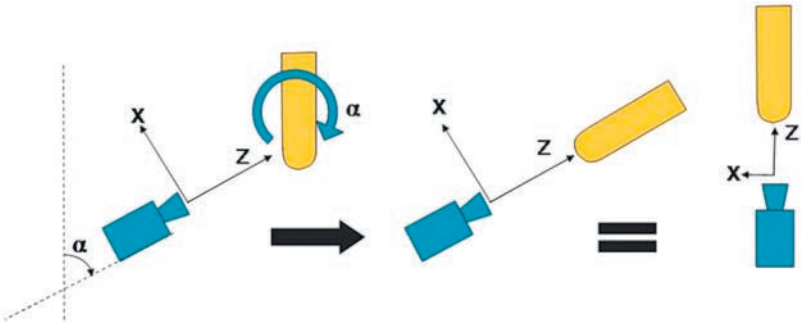


Рисунок 3 – Нормализация угла обзора

на расстоянии, соответствующем межзрачковому расстоянию у человека. Данное решение эффективно применяется в робототехнике при внедрении простых, но эффективных систем получения 3D-изображений, однако является более затратным [24–26].

3D-камера использует технологию визуализации дальности, которая включает триангуляцию и методы интерферометрии. В ней используется модулированный источник света для расчета глубины и измеряется время отраженного импульса, тем самым определяя расстояние до объекта. Простота вычисления расстояния позволяет реализовать их непосредственно в камере и на промышленный контроллер передавать уже готовые к анализу данные [27].

С точки зрения обработки изображения установлено оптимальное расположение камеры (прямо под выменем коровы), смотрящей вверх на сосок. Это обеспечивает обзор всего вымени и возможность измерения точек данных со всех сторон. Однако из-за особенностей расположения роботизированной руки и физиологии коровы, расположение камеры обоснованно принимается позади коровы, с углом отклонения от вертикали α. Исследование рабочего параметра – компенсация угла α (нормализация угла обзора), представлено на рисунке 3 [28].

Поворот на α градусов вокруг оси *x* с последующим поворотом на β градусов вокруг оси *y* вычисляется с помощью матрицы вращения *R*.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С помощью *XYZ*-представления точек данных применяется вращение:

$$XYZ_{\text{вращ}} = XYZ \cdot R. \quad (2)$$

Для получения исходного набора данных определяется обратное вращение путем интегрирования исходной матрицы:

$$XYZ = XYZ_{\text{вращ}} \cdot R^{-1}. \quad (3)$$

На обнаружение сосков влияют помехи при видеонаблюдении (шумы). Для удаления шума из изображений используется низкочастотная фильтрация. Шум имеет гораздо более высокую частоту, чем основные характеристики изображения.

Для устранения размытости усредняющего фильтра используется алгоритм сглаживания каналов. В начале работы алгоритма каждый пиксель рассматривается с равной вероятностью как содержащий сосок или кончик соска. В первую очередь определяются точки интереса в наборе данных – места, которые с большой вероятностью могут быть кончиками сосков. Поиск точек интересов осуществляется путем поиска точек локального минимума в данных (рисунок 4).

На основе научного обоснования теоретических и экспериментальных исследований, создан образец комплекса программно-аппаратной роботизированной системы доения КПРД, предназначенный для позиционирования доильного оборудования на вымени коровы при роботизированной технологии доения (рисунок 5).

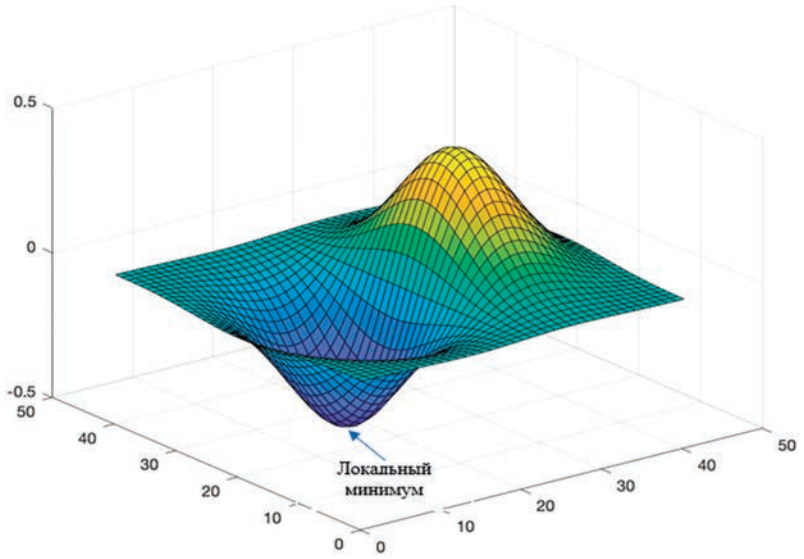


Рисунок 4 – Поиск локальных минимумов

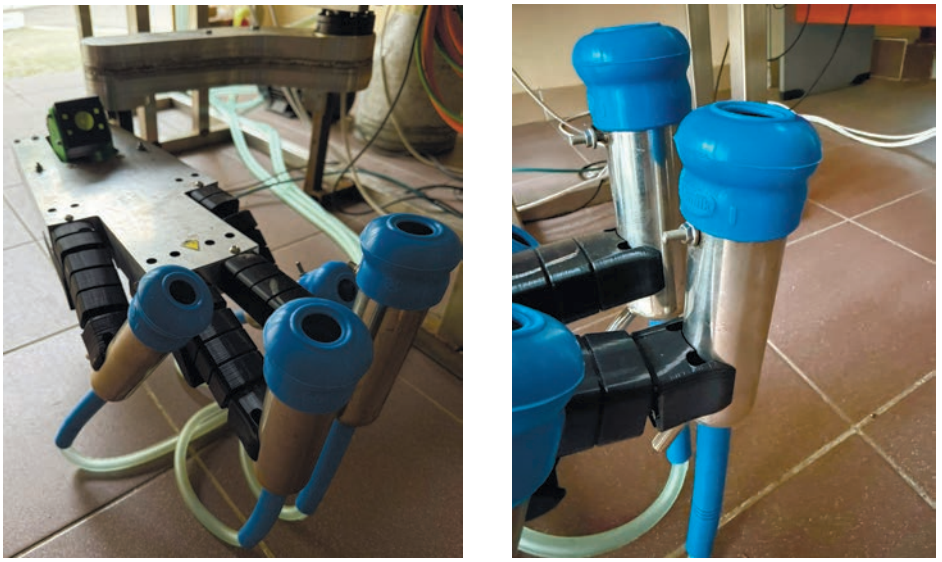


Рисунок 5 – Комплекс программно-аппаратный роботизированной системы доения КПРД

За прототип трехмерного манипулятора принято техническое решение фирмы GEA Farm Technologies Mlone, так как оно имеет возможность интеграции не только в боксовые системы доения, но и применимо в доильных залах типа «Карусель» и «Параллель», обладает высокой степенью надежности конструкции.

Заключение

В целом к базовым условиям для разработки и эффективного использования роботизированных средств в промышленных технологиях доения коров относятся: адаптация к биологическим особенностям животных (роботы должны учитывать индивидуальные анатомические и физиологические особенности каждой коровы, обеспечение комфортного и безболезненного процесса доения для снижения стресса у животных); высокая точность и надежность оборудования (точное позиционирование доильных аппаратов с использованием сенсоров и камер, надежность работы без сбоев и минимальное техническое обслуживание для предотвращения простоев); интеграция с системой управления фермой (возможность сбора и анализа данных о продуктив-

ности, состоянии здоровья и поведении коров, автоматическая регистрация объема и качества молока с последующей обработкой информации для принятия решений); гигиена и санитария (автоматическая очистка и дезинфекция доильных компонентов для предотвращения инфекций, использование материалов, устойчивых к коррозии и легко моющихся); обеспечение безопасности (защита животных и персонала от травм при работе с роботами, наличие систем аварийного отключения и сигнализации); экономическая эффективность (снижение затрат на ручной труд и повышение производительности фермы, быстрая окупаемость инвестиций за счет повышения качества и количества молока); гибкость и масштабируемость (возможность адаптации робота под разные размеры и типы ферм, легкое обновление программного обеспечения и модернизация оборудования); обучение и техническая поддержка персонала (проведение обучения операторов по использованию и обслуживанию роботов, наличие сервисной поддержки и оперативного ремонта) и др.

По результатам проведенных исследований необходимо отметить, что функциональность существующих систем роботизированного доения выглядит несколько избыточной для отечественного рынка, что влечет за собой удорожание оборудования.

Список использованных источников

1. Федченко: Беларусь вошла в пятерку мировых лидеров по производству молока на душу населения / SB.BY. Беларусь сегодня. – URL: https://www.sb.by/articles/belarus-voshla-v-pyaterku-mirovykh-liderov-po-proizvodstvu-moloka-na-dushu-naseleniya-fedchenko.html/ (дата обращения: 01.09.2025).

2. Комментарий: качество решает. Как развивается молочная отрасль в Беларуси / БЕЛТА. – URL: https://belta.by/economics/view/kommentarij-kachestvo-reshaet-kak-razvivaetsja-molochnaja-otrasl-v-belarusi-624630-2024 (дата обращения: 01.09.2025).

3. Беларусь: ключевые цифры молочного экспорта 2023 года // Belarus International. – URL: https://belarus-expo.com/беларусь-ключевые-цифры-молочного-эк/(дата обращения: 01.09.2025).

4. Китиков, В. О. Концепция создания физиологически щадящего процесса машинного доения коров / В. О. Китиков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1. – С. 126–131.

5. Иванова, Т. В. Влияние условий машинного доения на состояние вымени и продуктивность коров / Т. В. Иванова, А. С. Петров // Ветеринария и зоотехния. – 2018. – № 12 (4). – С. 45–52.

6. Смирнов, В. И. Мастит у коров: причины, профилактика и влияние на иммунитет и продуктивность / В. И. Смирнов, Е. Н. Кузнецова // Журнал сельскохозяйственной науки. – 2020. – № 7 (2). – С. 112–119.

7. Захаров, В. И. Современные тенденции развития автоматизированных доильных комплексов в России / В. И. Захаров, С. А. Михайлова // Агропромышленный комплекс России. – 2018. – № 12 (3). – С. 15–22.

8. Кузьмина, Т. В. Научные основы и практика использования автоматизированных систем доения в России / Т. В. Кузьмина, М. Ю. Орлов // Труды Всероссийского научно-исследовательского института животноводства. – 2021. – № 56. – С. 45–53.

9. Ларионов, Е. В. Инновационные разработки в области автоматизации доения крупного рогатого скота / Е. В. Ларионов, Т. К. Сидорова // Научный вестник сельского хозяйства. – 2022. – № 10 (1). – С. 55–62.

10. Петров, А. С. Развитие технологий автоматизированного доения в молочном животноводстве России / А. С. Петров, Н. П. Иванова, В. В. Кузнецов // Вестник аграрной науки. – 2019. – № 45 (6). – С. 12–20.

11. Смирнов, Д. Н. Производство и внедрение полнокомплектных доильных залов отечественного производства / Д. Н. Смирнов, Е. А. Лебедева // Журнал сельскохозяйственной техники и технологий. – 2020. – № 78 (4). – С. 30–37.

12. Беляев, А. Н. Технические решения и опыт эксплуатации отечественных доильных залов / А. Н. Беляев, В. П. Громов // Журнал сельскохозяйственной техники и технологий. – 2017. – № 65 (2). – С. 40–47.

13. Палкин, Г. Г. Роботы на молочных фермах / Г. Г. Палкин // Сельскохозяйственный вестник. Беларусь – Россия. – 2001. – № 8. – С. 16–18.

14. Тенденции развития сельскохозяйственной техники за рубежом / под ред. В. Ф. Федоренко [и др.] – М. : Росинформагротех, 2004. – 144 с.

15. Schleitzer, G. Melkorganisation in grossen Milchviehherden / G. Schleitzer // NeueLandwirtsch, 2009. – № 7. – P. 60–62.

16. Иванов, П. В. Применение однобоксовых доильных роботов в молочных комплексах с беспривязным содержанием коров / П. В. Иванов, Е. Л. Смирнова, А. Н. Кузнецов // Вестник животноводства. – 2021. – № 45 (2). – С. 23–30.

17. Петров, С. М. Автоматизация доения на промышленных молочных фермах: опыт внедрения однобоксовых роботов / С. М. Петров, Н. А. Лебедева // Журнал сельскохозяйственной техники и технологий. – 2019. – № 11 (4). – С. 56–63.

18. Скворцова, Е. Г. Влияние технологии доения коров на эффективность производства молока / Е. Г. Скворцова, О. В. Чепуштанова, А. С. Гусев // Агропродовольственная политика России. – 2023. – № 3. – С. 44–49.

19. Казакевич, П. П. Технологическая концепция «умной» молочной фермы : монография / П. П. Казакевич, В. Н. Тимошенко, А. А. Музыка. – Жодино : Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству, 2021. – 245 с.

20. Попков, Н. А. Технологические рекомендации по организации производства молока на новых и реконструируемых молочно-товарных фермах / Н. А. Попков [и др.] ; НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству. – Жодино, 2018. – 138 с.

21. Komlach, D. I. Technological principles of robotic milking development / D. I. Komlach, D. N. Kolosko, E. L. Zhilich [et al.] // Mechanization and electrification of agriculture. – 2022. – Issue 55. – P. 26–29.

22. Китиков, В. О. Ресурсоэффективные технологии производства молока / В. О. Китиков. – Мн. : НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва, 2011. – 233 с.

23. Perednja, V. I. Reequipment of dairy farms on a base of the machine lowexpeditured technologies / V. I. Perednja, V. O. Kitikov // The 4th research and development conference of central and eastern European institutes of agricultural engineering (CEEAgEng), Moscow, May 12–13, 2005 / VIESH. – M., 2005. – P. 219–224.

24. Направления исследований при создании автоматизированных и роботизированных модулей доения коров / Ю. А. Иванов, Л. П. Кормановский, Ю. А. Цой, В. В. Кирсанов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 3 (31). – С. 15–19.

25. Терентьев, С. С. Применение средств цифровой трансформации в молочном скотоводстве и их роль в повышении популяционного здоровья и продуктивности животных / С. С. Терентьев, А. В. Пашкин, Е. И. Бурова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2024. – № 3 (72). – С. 277–286.

26. Подготовка изображения, получаемого с 3D ToF камеры для автоматического обнаружения сосков коровы / В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 3 (32). – С. 340–346.

27. Применение сверточной нейронной сети для определения границ сосков вымени коровы / С. С. Юрочка, А. Р. Хакимов, Д. Ю. Павкин [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – Т. 69. – № 3 (48). – С. 82–88.

28. Teat Pose Estimation via RGBD Segmentation for Automated Milking / N. Borla, F. Kuster, J. Langenegger, J. Ribera, M. Honegger, G. Toffetti // Cornell University. – DOI: 10.48550/arXiv.2105.09843 (date of access: 01.09.2025).

УДК 636.2.034

Поступила в редакцию 15.08.2025
Received 15.08.2025

В. К. Клыбик, Ю. А. Ракевич

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: labts@mail.ru; rakevich.1991@mail.ru

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ВЫМЕНИ КОРОВ

Аннотация. В статье предложено описание упрощенной модели геометрической формы вымени коров. Рассмотрены существующие формы вымени коров, их очертания, соотношения длины, ширины и глубины, а также морфологические свойства вымени в зависимости от лактации. Приведено математическое описание упрощенной геометрической модели вымени коровы с графическим отображением. Составлено уравнение секущей плоскости и получена математическая модель, упрощенно описывающая геометрическую форму вымени у коров.

Ключевые слова: теоретические исследования, термографический снимок, машинное доение, эллипсоид, длина, ширина, глубина, геометрическая форма, плоскость, математическая модель, вымя коровы.

V. K. Klybik, Yu. A. Rakevich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labts@mail.ru; rakevich.1991@mail.ru

A SIMPLIFIED MODEL OF THE GEOMETRICAL SHAPE OF THE COW UDDER

Abstract. The article considers the issue of a simplified model of the geometric shape of the cow's udder. The existing forms of the cow's udder, their outlines, ratios of length, width and depth, as well as the morphological properties of the cow's udder depending on lactation are described. A mathematical description of a simplified geometric model of the cow's udder with a graphical display is given. A plane equation is compiled, a mathematical model is obtained that describes the geometric shape of the cow's udder in a simplified manner.

Keywords: theoretical research, thermographic image, machine milking, ellipsoid, length, width, depth, geometric shape, plane, mathematical model, cow's udder.

Введение

Автоматизация и цифровизация отрасли животноводства является перспективным направлением дальнейшего развития, которое предполагает разработку и использование роботизированных систем доения, кормления, устройств диагностики заболеваний животных и прочих систем улучшения содержания животных.

Отсутствие научно-методической базы, используемой при разработке подобных устройств для получения термографических снимков вымени, существенно сдерживает автоматизацию технологий диагностики заболеваний коров маститом.

Для повышения достоверности получаемых данных при бесконтактном определении биометрических и температурных параметров вымени лактирующих животных необходимо получить термографический снимок, содержащий максимальную площадь боковой поверхности вымени, что невозможно осуществить без проведения теоретических исследований с использованием модели геометрической формы вымени коров [1].

Кроме того, математическое описание формы вымени востребовано инженерами: при разработке роботов-дояров (например, системы типа AMS – Automatic Milking Systems) используют упрощенные 3D-модели вымени для точного позиционирования доильных аппаратов. Ветеринары и зоотехники применяют модели для оценки симметрии, объема и формы вымени, что может

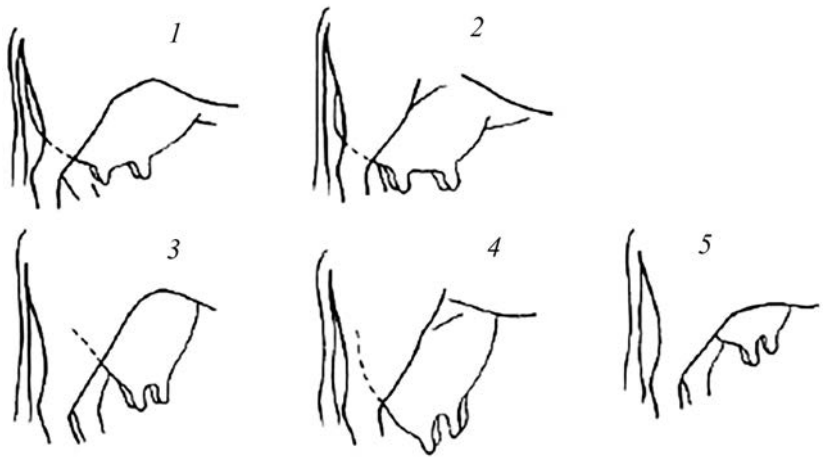


Рисунок 1 – Формы вымени коров: *1* – ваннообразное; *2* – чашевидное; *3* – округлое суженное (воронковидное); *4* – козье; *5* – примитивное

указывать на заболевания (мастит, отеки и др.). Селекционеры используют модель для оценки экстерьерных признаков у коров, что важно для отбора животных с оптимальной формой вымени, пригодной для машинного доения [2].

Промышленная технология производства молока, основанная на машинном доении коров, предъявляет особые требования к животным по строению и геометрическим размерам вымени.

Форму вымени (рисунок 1) характеризуют его очертания, соотношения длины, ширины и глубины.

По форме у коров различают вымя:

– *ваннообразное* – распространенное далеко вперед, удлиненное, широкое и достаточно глубокое вымя. Его длина на 15 % больше и превышает ширину; в плане имеет форму вытянутого овала (яйцевидное);

– *чашевидное* – средней длины и ширины, довольно глубокое, несколько округлое; его длина только на 5–15 % превышает ширину, а в плане имеет форму небольшого овала;

– *округлое суженное (воронковидное)* – с небольшой площадью прикрепления, книзу суженное, соски сближенные;

– *козье* – с недоразвитыми передними или сильно гипертрофированными и отвисшими задними долями, резко разграниченными боковой бороздой;

– *примитивное* – малоразвитое, полушаровидное, с небольшими, близко расположенными сосками [3].

Промеры вымени и сосков представляют объективную характеристику их развития и формы, находятся в связи с продуктивностью и пригодностью для машинного доения.

Для машинного доения наиболее подходят коровы с ваннообразной, чашеобразной и округлой формами вымени, которые отличаются пропорциональным соотношением удоев в четвертях, более стабильной продуктивностью и продолжительностью лактации.

Основная часть

Для определения геометрических форм выполняют следующие промеры вымени в определенных его точках (рисунок 2) [4].

С увеличением возраста коровы и количества лактаций происходит закономерное увеличение размеров вымени (см. таблицу) и полное развитие достигается к 5–6-му отелу [5].

Для проведения дальнейших теоретических исследований математически опишем геометрические параметры вымени наиболее распространенной ваннообразной или чашевидной формы, которую можно в общем случае упрощенно представить в виде половины эллипсоида, имеющего размеры, соответствующие коровам 3-й лактации (таблица). При моделировании соски условно не рассматриваем. В проекции на плоскость его форма будет представлять вытянутый овал с длиной, превышающей ширину примерно на 12 %.

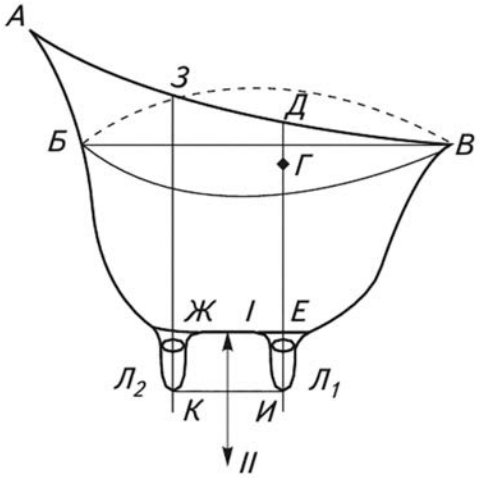


Рисунок 2 – Промеры вымени коровы: *АВ* – граница прикрепления вымени; *БВ* – длина (измеряют у основания вымени от задней выпуклости до его переднего края); *Г* – наибольшая ширина (измеряют над сосками передних четвертей); *БВ–ВБ* – наибольший обхват (измеряют лентой по горизонтальной линии на уровне основания переднего края вымени); *ДЕ* – глубина передней четверти и *ЗЖ* – глубина задней четверти (измеряют по вертикали от брюшной стенки до основания соска); *I–II* – высота вымени над землей (измеряют от середины нижней части вымени (*ЕЖ*) до земли); *ЕИ* – длина переднего соска и *ЖК* – длина заднего соска (измеряют от их основания до кончика); $Л_1$ – обхват переднего соска и $Л_2$ – обхват заднего соска (измеряют у основания сосков); *ИК* – расстояние между передними и задними сосками

Морфологические свойства вымени коров в зависимости от лактации

№ п/п	Условное обозначение	Параметры	Значение параметра, м		
			Лактация по счету		
			I	II	III
1	*Г*	Ширина вымени	0,274 ± 0,003	0,278 ± 0,0073	0,314 ± 0,0068
2	*БВ*	Длина вымени	0,329 ± 0,0036	0,337 ± 0,0076	0,351 ± 0,0059
3	*БВ–ВБ*	Обхват вымени	1,001 ± 0,0062	1,014 ± 0,0327	1,068 ± 0,0159
4	*ДЕ, ЗЖ*	Глубина вымени	0,223 ± 0,0049	0,225 ± 0,0057	0,251 ± 0,0034

Математическое описание упрощенной геометрической модели вымени коровы. Исходя из рассмотренного выше материала, в большинстве случаев геометрическую форму вымени можно упрощенно представить в виде эллипсоида, центр которого в горизонтальном сечении совпадает с точкой начала координат *О* трехмерной системы координат *XYZ*. Верхняя часть вымени условно ограничена наклонной секущей плоскостью, проходящей через ось *OX* боковую верхнюю точку вымени M_A, заднюю верхнюю точку M_B и переднюю верхнюю точку M_E, расположение которой принимаем ниже задней на 0,088 м (рисунок 3) согласно усредненному значению фактической глубины передних и задних четвертей вымени.

Составление уравнения плоскости. Если плоскость содержит ось *OX*, значит она должна содержать все точки этой оси, т. е. любую точку вида (*t*, 0, 0), где *t* – любое действительное число. Кроме того, плоскость проходит через переднюю верхнюю точку вымени M_E (0; 0,176; –0,044).

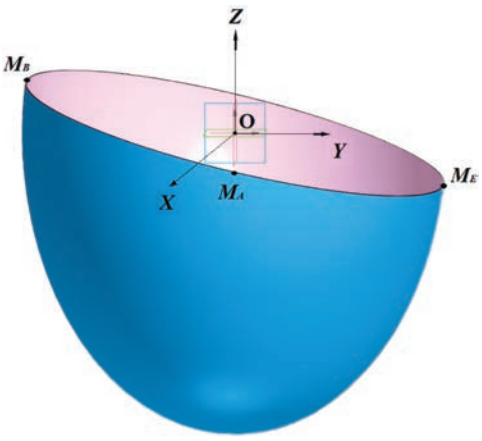


Рисунок 3 – Графическое отображение упрощенной модели вымени коровы

Поскольку плоскость содержит ось *OX*, можно предположить, что ее нормальный вектор перпендикулярен направляющему вектору оси *OX* ($\vec{m}$ = 1, 0, 0). Значит, нормальный вектор плоскости будет иметь нулевую *x*-компоненту. То есть нормальный вектор можно записать как $\vec{n}$ = (0, *d*, *e*), где *d* и *e* – некоторые коэффициенты.

Общее уравнение плоскости, проходящей через начало координат (поскольку ось *OX* проходит через начало), имеет вид:

$$By + Cz = 0. \quad (1)$$

Теперь нужно подставить координаты точки M_E в уравнение (1), чтобы найти соотношение между *B* и *C*.

Подставляя координаты точки M_E (0; 0,176; –0,044) в уравнение *By* + *Cz* = 0, получаем

$$B \cdot 0{,}176 + C(-0{,}044) = 0,$$

тогда получим следующее:

$$0{,}176B(-0{,}044)C = 0.$$

Умножим обе части на 1 000 и, выразив B через C, получим

$$176B = 44C.$$

Отсюда

$$B = \frac{44}{176}C.$$

Тогда уравнение плоскости будет иметь вид

$$44y + 176z = 0, \tag{2}$$

которое, упростив, можно записать в следующем виде:

$$z = -\frac{1}{4}y. \tag{3}$$

Геометрический контур рассмотренной выше модели вымени описывается следующим уравнением эллипсоида в декартовых координатах с центром в начале координат:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \tag{4}$$

где a, b и c – полуоси эллипсоида (a = 0,157 м; b = 0,176 м и c = 0,25 м).

Подставляя значения размеров полуосей эллипсоида в a, b, c и округлив, получим

$$\frac{x^2}{0{,}02465} + \frac{y^2}{0{,}03098} + \frac{z^2}{0{,}0625} = 1. \tag{5}$$

Соответственно, геометрическая форма вымени будет упрощенно представлять собой нижнюю часть эллипсоида, описываемого выражением (4), определяемую значениями x, y и z в пределах заданных эллипсоидом и для каждого значения x (от –0,157 до 0,157), y (от –0,176 до 0,176) значение z будет ограничено сверху плоскостью $z = -\frac{1}{4}y$, которая накладывает условие на верхнюю границу модели.

Область в пространстве $D \subset R^3$:

$$D = \left\{(x, y, z) \left| \frac{x^2}{0{,}02465} + \frac{y^2}{0{,}03098} + \frac{z}{0{,}0625} \le 1,\ z \le -\frac{y}{4}, \right.\right. \tag{6}$$

где значения x, y и z измеряются в метрах.

Заключение

Данная математическая модель, упрощенно описывающая геометрическую форму вымени коров, может быть использована при определении видимой боковой поверхности вымени с различных точек наблюдения, что востребовано при обосновании угла установки тепловизионной камеры для получения максимально информативного термографического снимка вымени коров.

Список использованных источников

1. Ракевич, Ю. А. Технология и средства для бесконтактной идентификации мастита коров термографическим методом в условиях поточного производства молока / Ю. А. Ракевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – Т. 63. – № 1. – С. 68–79.

2. Юрочка, С. С. Технология бесконтактной оценки физиологического состояния вымени для ранней диагностики заболеваний / С. С. Юрочка [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2023. – № 5. – С. 83–89.

3. Гарькавый, Ф. Л. Селекция коров и машинное доение : монография / Ф. Л. Гарькавый. – М. : Колос, 1974. – 146 с.

4. Изилов, Ю. С. Практикум по скотоводству : учеб. пособие / Ю. С. Изилов. – М. : КолосС, 2009. – 183 с.

5. Изучение морфологических и функциональных особенностей вымени коров в связи с возрастом и лактацией / А. А. Лазовский, В. И. Смунев, Н. Е. Иванова, Е. Г. Парфенова // Ученые записки Витебской ордена «Знак Почета» государственной академии ветеринарной медицины. – Витебск, 2000. – Т. 36. – Ч. 1. – С. 163–165.

УДК 637.112.5

Поступила в редакцию 26.09.2025
Received 26.09.2025

Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская, В. В. Никончук, Д. В. Бернацкая

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОМЕРОВ ТЕЛА И ЖИВОЙ МАССЫ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных конструктивных и технологических параметров устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы крупного рогатого скота.

Ключевые слова: комплексная оценка, промеры тела, режимные параметры, погрешность измерения, макетный образец, фотофиксация, корреляция.

E. L. Zhilich, Yu. N. Rogalskaya, V. V. Nikonchuk, D. V. Bernatskaya

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES TO DETERMINE OPTIMAL DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A DEVICE FOR REMOTE MEASUREMENT OF CATTLE BODY MEASUREMENTS AND LIVE WEIGHT

Abstract. The results of experimental studies to determine the optimal design and technological parameters of a device for remote determination of body measurements and live weight of cattle are presented.

Keywords: comprehensive assessment, body measurements, operating parameters, measurement error, mock-up sample, photo recording, correlation.

Введение

Конституция и экстерьер являются важнейшими показателями племенных и производственных качеств крупного рогатого скота (КРС). Поэтому в производственных условиях с давних пор широко практикуется оценка и отбор по этим признакам [1].

При переводе скотоводства на промышленную основу резко повысились требования к племенным и продуктивным качествам животных и одновременно возросло значение их оценки по конституции и экстерьеру, так как для рентабельного ведения молочного и мясного скотоводства требуются здоровые, высокопродуктивные животные с крепкой конституцией и соответствующими экстерьерными показателями. Только такие животные в условиях промышленной технологии могут обладать наиболее высокой продуктивностью и устойчиво передавать свои качества потомству.

Комплексная оценка и отбор скота по конституции и экстерьеру в сочетании с другими показателями, наиболее полно характеризующими их племенные и продуктивные качества, способствуют созданию высокопродуктивных стад желательного типа при стандартизации животных по всем показателям, необходимым для организации поточного производства в условиях промышленной технологии [2].

Главными видами продуктивности крупного рогатого скота являются молочная и мясная. Определение показателей, характеризующих продуктивность скота, их правильный учет необходимы для оценки и отбора, организации правильного кормления животных и др.

На сегодняшний день в сельском хозяйстве одной из наиболее трудоемких технологических операций является взвешивание животных. Перевеска скота в сельскохозяйственных организациях проводится не менее двух раз в месяц и требуется для определения состояния здоровья животных, количества необходимого корма, готовности к убою и пр.

Для взвешивания используются стационарные либо передвижные весы, что требует значительных затрат времени и человеческих ресурсов. Другие параметры животных, например, объем тела, площадь шкуры и т. д., в настоящее время определяются только после убоя, поскольку это очень затратный и в целом небезопасный процесс.

Поэтому для повышения эффективности процесса определения живой массы и промеров тела животного необходима разработка устройства для дистанционного определения данных показателей, что в конечном итоге позволит снизить риск опасной реакции животных на стресс и существенно сократить время получения промеров.

Для записи крупного рогатого скота в государственной племенной книге (ГПК) установлены пять промеров: высота в холке, глубина груди, обхват груди за лопатками, косая длина туловища, а также обхват пясти. Промеры берут с помощью мерной палки, циркуля, штангенциркуля и мерной ленты. Чтобы показатели были более точными, измерения делают дважды, а некоторые промеры берут с обеих сторон тела. Между промерами животных и их живой массой отмечается определенная взаимосвязь. Это дает возможность определить живую массу скота по величине промеров. Также от данных показателей зависит эффективное планирование кормления, что позволит животным накопить достаточный резерв жира в организме [3].

Основная часть

Цель исследования – определение рациональных конструктивных и режимных параметров макетного образца устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС.

Объект исследования: способы и устройства для бесконтактного дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС.

Предмет исследования: конструктивные и режимные параметры устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС.

Задачи исследования:

– провести анализ способов, технологий и технических средств для определения промеров тела и живой массы;

– определить основные факторы (параметры), влияющие на погрешность измерения живой массы по промерам тела;

– определить основные промеры, необходимые для расчета живой массы КРС;

– обосновать рациональные конструктивные параметры и режимы работы устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС;

– разработать методы и математические модели определения живой массы КРС по промерам тела;

– провести лабораторные и производственные испытания устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС;

– сформулировать основные выводы, определить рациональные конструктивные и режимные параметры макетной установки.

Программа экспериментальных исследований:

– определить конструктивные параметры макетной установки;

– определить основные промеры тела для расчета живой массы КРС;

– провести многофакторный эксперимент и дисперсионный анализ;

– произвести обработку полученных экспериментальных данных.

Макетный образец устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС должен обеспечивать:

– фото и видео фиксацию объекта измерения;

– определение величины промера тела;

– определение живой массы;

– вывод информации.

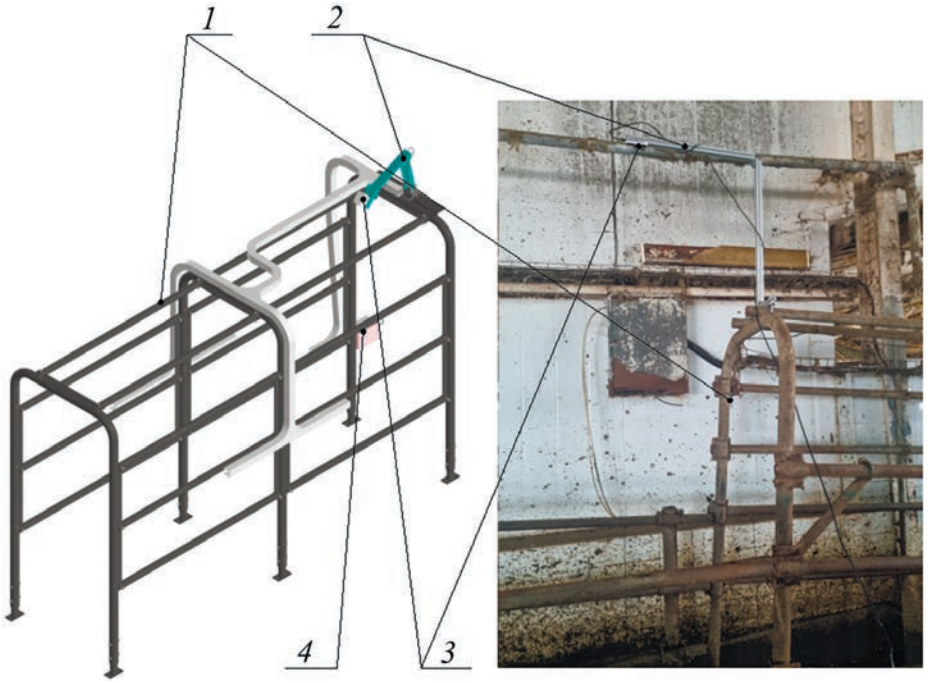


Рисунок 1 – Принципиальная схема и общий вид макетного образца устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС:
1 – рама; *2* – кронштейн; *3* – 3D-камера; *4* – блок питания

Принципиальная схема и общий вид макетного образца устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС представлены на рисунке 1.

Рама *1* предназначена для ограничения перемещения КРС и размещения основных узлов. Кронштейн *2* предназначен для фиксации камеры с возможностью изменения ее положения вдоль координатных осей. 3D-камера *3* предназначена для снятия промеров путем записи видимого света и невидимого инфракрасного света, что позволяет создавать трехмерную карту глубины окружающей среды. Блок питания *4* предназначен для энергообеспечения источников питания.

Для фиксации данных и последующей их обработки применялся ПК.

Определение конструктивных параметров макетной установки производили опытным путем на основе технических характеристик применяемого оборудования, а также анатомических особенностей стада КРС.

В ходе исследований установлено:

– высота установки 3D-камеры – не менее 2 650 мм, но не более 3 100 мм;

– частота кадров – не менее 10 кадров/с;

– угол поворота камеры – 180° (параллельно поверхности пола);

– ширина прохода – не менее 900 мм.

Определение режимных параметров осуществлялось путем фотофиксации объекта исследования. В ходе обработки полученных данных определена возможность снятия 6 основных промеров:

– поперечная длина туловища в области лопаток (рисунок 2);

– наибольшая поперечная длина туловища (рисунок 3);

– поперечная длина туловища в области седалищных бугров (рисунок 4);

– продольная длина туловища (рисунок 5);

– высота в седалищных буграх (рисунок 6, *а*);

– высота в холке (рисунок 6, *б*).

Данные по промерам тела и массе для 50 голов стада КРС представлены в таблице.

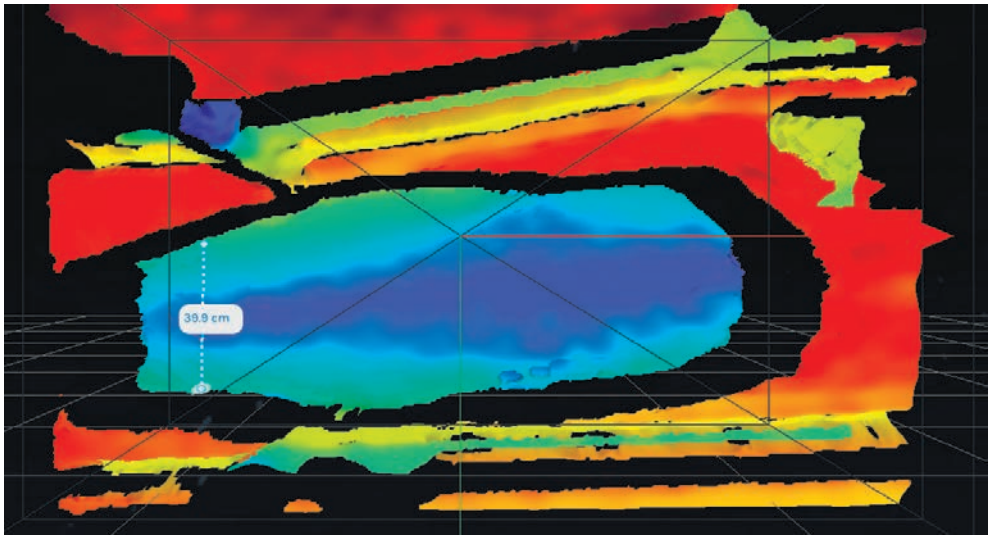


Рисунок 2 – Поперечная длина туловища в области лопаток

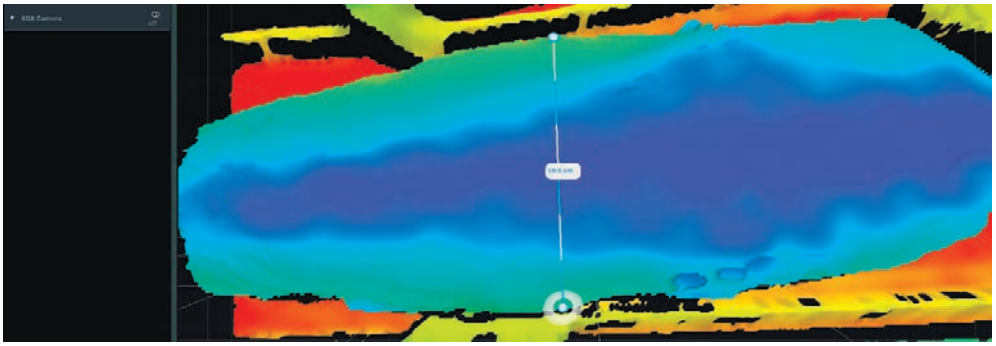


Рисунок 3 – Наибольшая поперечная длина туловища

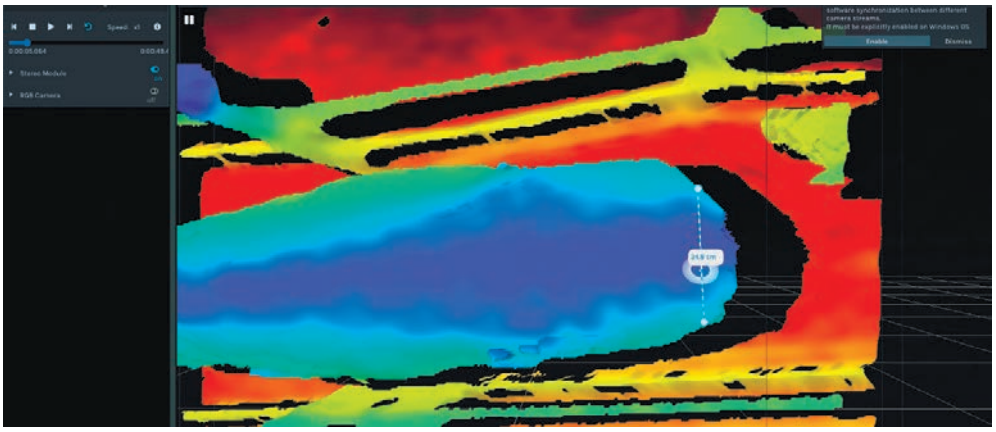


Рисунок 4 – Поперечная длина туловища в области седалищных бугров

Для обработки полученных данных первоначально необходимо произвести дисперсионный анализ. Дисперсионный анализ (ANOVA) – это статистический метод, который используется для сравнения средних значений двух или более выборок. Он позволяет определить, различаются ли средние значения между группами или же различия случайны.

ANOVA позволяет определить, насколько сильны различия между группами, что может быть полезно при выборе стратегий манипулирования факторами.

Обработка полученных данных при неоднородности дисперсий должна предусматривать разделение животных на группы по фактической массе.

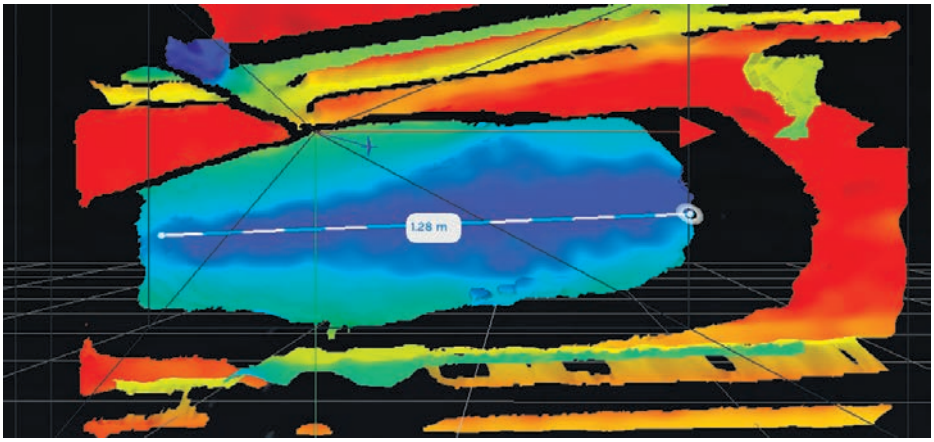
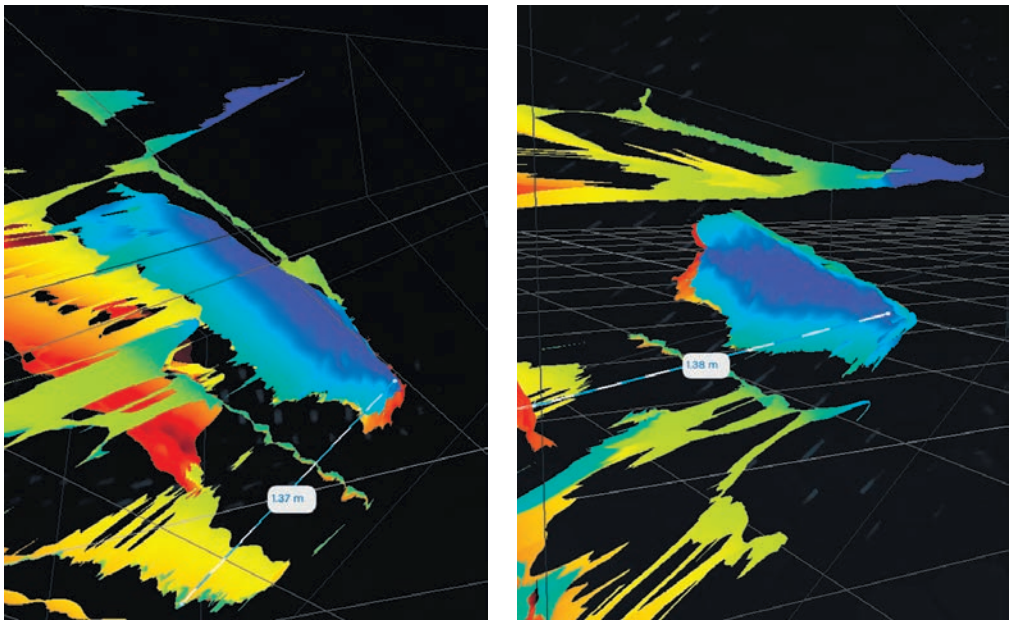


Рисунок 5 – Продольная длина туловища



а *б*

Рисунок 6 – Высота в седалищных буграх и холке: *а* – высота в седалищных буграх; *б* – высота в холке

Промеры тела и живая масса дойного стада КРС РСДУП «Экспериментальная база «Зазерье»

№ п/п	Длина за лопатками, см	Наибольшая ширина туловища, см	Длина в седалищных буграх, см	Длина от лопаток до седалищных бугров, см	Высота в седалищных буграх, см	Высота в холке, см	Масса, кг
	Var1	*Var2*	*Var3*	*Var4*	*Var5*	*Var6*	*Var7*
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*M*
1	33,6	56,7	33,6	124	137	138	464
2	39,9	59,9	34,8	128	141	140	483
3	35,1	59,7	38,7	134	145	144	499
4	38,4	59,5	38,7	136	147	140	503
5	36,5	60,8	40	140	145	146	514
6	34,9	59,4	30,4	128	136	134	467
7	32,7	59,3	32,9	124	137	137	464
8	36,8	60,2	37	136	147	145	509
9	36,7	58,3	35,6	141	140	138	499
10	36,3	57,8	32,3	129	133	132	465

Окончание таблицы

№ п/п	Длина за лопатками, см	Наибольшая ширина туловища, см	Длина в седалищных буграх, см	Длина от лопаток до седалищных бугров, см	Высота в седалищных буграх, см	Высота в холке, см	Масса, кг
	Var1	*Var2*	*Var3*	*Var4*	*Var5*	*Var6*	*Var7*
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*M*
11	38,5	61,3	35,9	146	147	146	525
12	34,2	58,9	36,6	131	140	140	482
13	38,1	55,1	35,4	149	142	143	514
14	29,9	52,4	33,5	125	134	135	454
15	43,5	60,5	38,2	138	143	144	508
16	34,8	54,9	37,5	141	141	143	499
17	36,8	52,1	36,5	122	132	135	456
18	36,3	55,6	36,6	128	131	131	463
19	33,6	55,5	35,9	129	135	136	469
20	37,3	67,8	32,6	125	135	137	477
21	35,8	59,2	38	121	135	138	466
22	39,7	62,1	36,1	128	144	148	495
23	35,9	60,3	40,2	132	144	149	500
24	33,6	54,2	36,1	129	135	137	468
25	34,4	64,4	36,4	126	134	137	473
26	33,5	56,3	32,3	121	132	136	454
27	35,6	62,3	33,5	128	137	138	478
28	32,2	66,6	33,1	133	144	144	498
29	30,1	58,9	29,7	126	130	134	455
30	35,9	69,2	32,4	126	140	141	485
31	35,1	70,3	38	131	142	145	501
32	34	69,7	34,9	133	145	147	504
33	35,2	56,1	38,2	130	138	139	478
34	33,2	68,5	34,6	133	142	145	501
35	35,7	61	30,5	134	138	142	489
36	40,2	62,8	30,5	126	135	137	473
37	36,7	57,9	35,2	132	136	137	477
38	38,7	46,9	28,9	119	128	128	434
39	38,3	69,2	33,3	137	142	145	510
40	35,3	62,7	32,3	136	137	139	487
41	36,2	57,8	38,5	132	136	139	481
42	38,3	68,1	31,6	138	142	145	512
43	35	60,9	35,3	135	137	138	488
44	31,4	68,5	31,1	142	144	144	514
45	34,9	67,5	33,5	137	136	138	491
46	35,3	69,2	30,7	134	143	143	497
47	36,1	55,8	27,5	120	124	129	446
48	33,3	68,5	34,6	149	146	148	525
49	35,5	56,9	35,3	134	139	139	484
50	33,9	56,1	35,9	131	137	138	477
max	44	70	40	149	147	149	525
min	29,9	46,9	27,5	119	124	128	434
среднее знач.	35,7	60,6	34,6	131,8	138,5	139,8	484,9

Дисперсионный анализ в данном случае позволяет:

– сравнивать две или несколько выборочных средних;

– одновременно изучать действие нескольких независимых факторов, при этом можно определить как эффект каждого фактора в изменчивости изучаемого признака, так и их взаимодействие;

– правильно планировать научный эксперимент.

Под разнообразием при дисперсионном анализе будем понимать наличие неодинаковых значений каждого признака у разных особей, объединенных в группу. Разнообразие группы особей

	ANOVA; Var.:Var7; R-sqr=,99691; Adj:,99312 (Spreadsheet1) 6 factors, 1 Blocks, 50 Runs; MS Residual=3,095484 DV: Var7				
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Var1 (L)	53,68	1	53,6798	17,34134	0,000404
Var1 (Q)	2,62	1	2,6234	0,84749	0,367248
(2)Var2 (L)	57,25	1	57,2513	18,49511	0,000290
Var2 (Q)	0,20	1	0,1969	0,06362	0,803199
(3)Var3 (L)	2,41	1	2,4079	0,77788	0,387324
Var3 (Q)	0,39	1	0,3924	0,12675	0,725218
(4)Var4 (L)	128,46	1	128,4644	41,50059	0,000002
Var4 (Q)	8,52	1	8,5184	2,75188	0,111330
(5)Var5 (L)	15,19	1	15,1905	4,90730	0,037402
Var5 (Q)	0,01	1	0,0065	0,00211	0,963735
(6)Var6 (L)	7,87	1	7,8726	2,54327	0,125032
Var6 (Q)	2,30	1	2,3004	0,74313	0,397959
1L by 2L	0,09	1	0,0878	0,02836	0,867794
1L by 3L	2,28	1	2,2790	0,73625	0,400118
1L by 4L	0,38	1	0,3847	0,12427	0,727805
1L by 5L	12,30	1	12,2967	3,97245	0,058798
1L by 6L	3,49	1	3,4946	1,12892	0,299530
2L by 3L	0,37	1	0,3715	0,12002	0,732303
2L by 4L	4,20	1	4,2033	1,35787	0,256387
2L by 5L	6,13	1	6,1341	1,98162	0,173193
2L by 6L	5,01	1	5,0130	1,61946	0,216452
3L by 4L	1,20	1	1,1973	0,38679	0,540385
3L by 5L	0,06	1	0,0577	0,01865	0,892627
3L by 6L	0,06	1	0,0629	0,02033	0,887907
4L by 5L	19,18	1	19,1791	6,19585	0,020855
4L by 6L	6,65	1	6,6531	2,14928	0,156785
5L by 6L	0,82	1	0,8186	0,26444	0,612212
Error	68,10	22	3,0955		
Total SS	22058,50	49			

Рисунок 7 – Дисперсный анализ Var7; R-sqr = 0,99691; Adj:,99312, 6 факторов, 1 блок, 50 прогонов

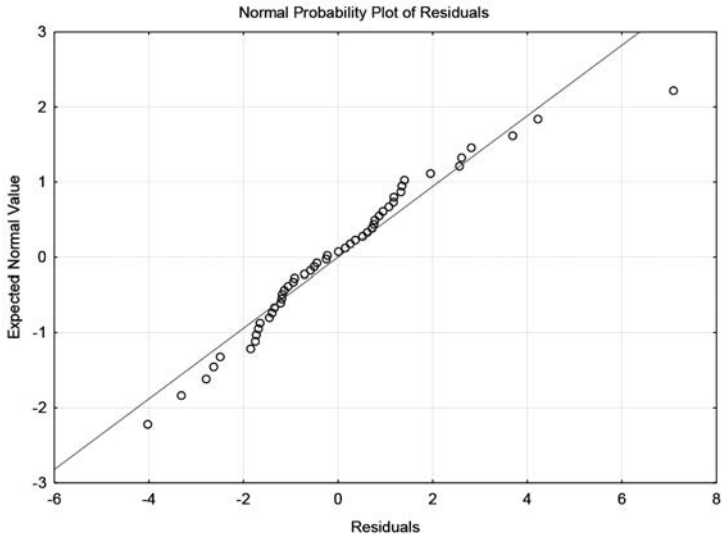


Рисунок 8 – Диаграмма нормального распределения (вероятности)

по изучаемому признаку может иметь разную степень, которая обычно измеряется показателями разнообразия (или изменчивости): лимитами, средним квадратическим отклонением, коэффициентом вариации.

В дисперсионном анализе степень разнообразия индивидуальных и средних значений признака измеряется и сравнивается особыми способами, составляющими специфику этого общего метода.

Организация факторов заключается в том, что каждому изучаемому фактору придается несколько значений. В соответствии с этими значениями каждый фактор разбивается на несколько градаций; для каждой градации подбирается по принципу случайной выборки несколько особей, у которых впоследствии и измеряется величина результативного признака.

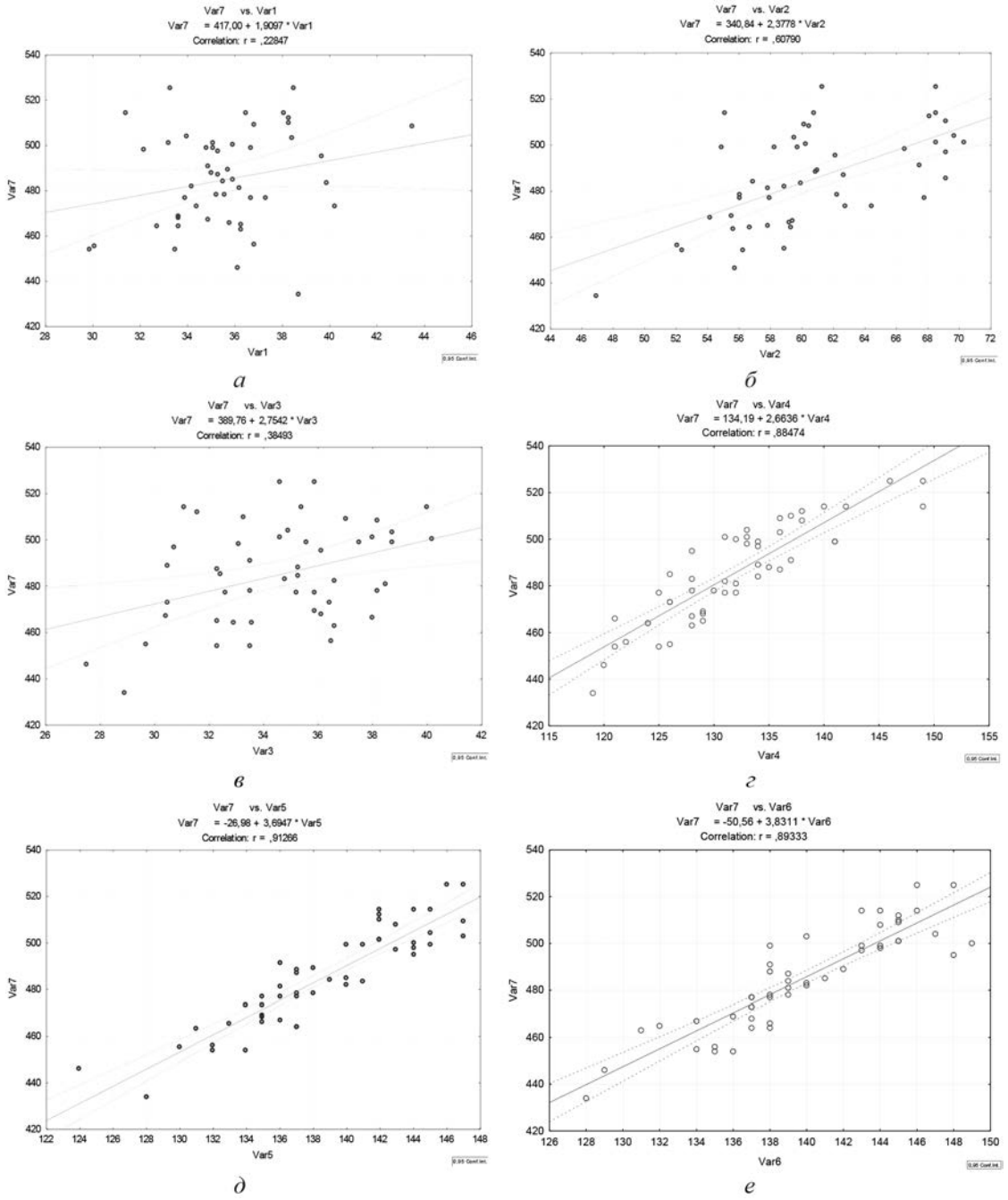


Рисунок 9 – Графики корреляции: *а* – Var1/Var7, r = 0,22847; *б* – Var2/Var7, r = 0,60790; *в* – Var3/Var7, r = 0,38493; *г* – Var4/Var7, r = 0,88474; *д* – Var5/Var7, r = 0,91266; *е* – Var6/Var7, r = 0,89333

Для того чтобы выяснить степень и достоверность влияния изучаемых факторов, надо измерить и оценить ту часть общего разнообразия, которая вызывается этими факторами. Дисперсионный анализ (ANOVA) в соответствии с таблицей представлен на рисунке 7.

Статистические показатели, которые используются в ANOVA – это *F*-статистика и *p-value*.

F-статистика (*F*-значение) измеряет различия между группами, т. е. отношение между средними значениями в группах и дисперсией внутри групп. Если *F*-значение большое, то это указывает на статистически значимые различия между группами. *P-value* (вероятность) – это вероятность того, что различия между группами были случайными и не связаны с фактором, который изучается. Если *p-value* меньше выбранного уровня значимости, то можно отбросить нулевую гипотезу и утверждать, что между группами есть статистически значимые различия.

F-статистика и *p-value* не являются самостоятельными критериями для определения статистической значимости. Они используются вместе с другими статистическими методами для получения более точных результатов.

По данным таблицы, представленной на рисунке 7, можно сделать вывод, что первый и второй фактор статистически значимы в равной степени и один из них для дальнейших расчетов необходимо блокировать. Наибольший вес при расчете имеет 4-й фактор.

Диаграмма нормального распределения, представленная на рисунке 8, показывает отсутствие существенных отклонений от нормального распределения.

Отклонения от прямой линии указывают на отклонения от нормального распределения.

Графики корреляции каждого фактора и коэффициент корреляции представлены на рисунке 9.

Коэффициент корреляции – это мера силы и направления линейной связи между двумя переменными, определяемая как ковариация переменных, деленная на произведение их стандартных отклонений. Это наиболее известный и часто используемый тип коэффициента корреляции.

При анализе коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что зависимости Var4/Var7, Var5/Var7 и Var6/Var7 имеют практически линейную зависимость.

Заключение

В ходе проведения экспериментальных исследований по определению оптимальных конструктивных и технологических параметров устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы КРС определены конструктивные параметры макетной установки:

– высота установки 3D-камеры – не менее 2 650 мм, но не более 3 100 мм;

– частота кадров – не менее 10 кадров/с;

– угол поворота камеры – 180° (параллельно поверхности пола);

– ширина прохода – не менее 900 мм.

Также в ходе экспериментальных исследований осуществлено снятие и обработка следующих промеров: поперечная длина туловища в области лопаток; наибольшая поперечная длина туловища; поперечная длина туловища в области седалищных бугров; продольная длина туловища; высота в седалищных буграх; высота в холке. Проведен дисперсный анализ полученных данных, который показал отсутствие существенных отклонений от нормального распределения. При анализе коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что зависимости Var4/Var7, Var5/Var7 и Var6/Var7 имеют практически линейную зависимость.

Список использованных источников

1. Экстерьер, конституция и продуктивность крупного рогатого скота : учеб.-метод. пособие / М. М. Карпеня, В. Н. Минаков, В. Н. Подрез, Ю. В. Шамич. – Витебск : ВГАВМ. – 2020. – 68 с.

2. Яковлева, С. Е. Влияние экстерьерных показателей и типа конституции на уровень молочной продуктивности коров черно-пестрой породы / С. Е. Яковлева, С. И. Шепелев, Е. А. Лемеш // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2018. – № 21 (1). – С. 25–29.

3. Об утверждении зоотехнических правил о порядке определения продуктивности племенных животных, племенных стад, оценки фенотипических и генотипических признаков племенных животных : постановление М-ва сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 3 сент. 2013 г. № 44, Мн. – 2013. – 40 с. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W206p0263 (дата обращения: 20.07.2025).

УДК 631 363:636.085

Поступила в редакцию 05.09.2025
Received 05.09.2025

В. В. Никончук, С. А. Цалко, Д. В. Бернацкая

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ САМОХОДНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ КОРМОВОГО СТОЛА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА МСКС

Аннотация. В статье приведены результаты приемочных испытаний самоходной машины для обслуживания кормового стола крупного рогатого скота МСКС.

Ключевые слова: приемочные испытания, корм, кормовой стол, ферментация, комплектность, функциональные показатели, технологическая операция.

V. V. Nikonchuk, S. A. Tsalko, D. V. Bernatskaya

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru

RESULTS OF ACCEPTANCE TESTS OF THE SELF-PROPELLED MACHINE FOR SERVING THE FEEDING TABLE OF CATTLE OF THE MSKS

Abstract. The results of acceptance tests of the self-propelled machine for servicing the feed table of cattle of the MSKS are presented.

Keywords: acceptance tests, feed, feed table, fermentation, completeness, functional indicators, technological operation.

Введение

Для лактирующих коров корм на кормовом столе должен быть в постоянном доступе 24 ч в сутки. Необходимо, чтобы после дойки у коров оставалось 50 % от их ежедневной потребности в корме [1]. Также отмечено, что высокопроизводительные коровы едят до 12 раз в сутки и проводят за кормовым столом от 4 до 5 ч [2].

Расположение кормового стола должно обеспечивать комфорт для коров при поедании корма и позволять рационально организовывать его раздачу. Когда корм всегда доступен в зоне стола, животные съедают больше и остается меньше недоеденного. Процесс подталкивания активирует у коров рефлекс к еде: они чаще подходят к столу, потребляют больше корма, что в итоге повышает их продуктивность.

Регулярное подталкивание и перемешивание (рыхление) кормов на кормовом столе повышает их потребление более чем на 3,5 %, практически на 100 % снижается количество отходов, вследствие чего происходит увеличение продуктивности животных [3].

Когда корм залеживается, он подвергается повторной ферментации. Это приводит к образованию гниющих масс, что, в свою очередь, снижает качество корма и вредит здоровью животных. Ферментация ускоряет разложение питательных веществ, ухудшая их свойства, а гниение становится источником патогенных микроорганизмов, вызывающих болезни у скота. Особенно опасно это в летний период.

Для того чтобы избежать перечисленные выше риски, а также для экономии, снижения усилий на подталкивание с прохода в зону доступа и сохранения свежести корма (предотвращения прения и залеживания), многие производители предлагают навесные, самоходные и автоматизированные (роботизированные) подталкиватели.

Основная часть

Самоходная машина для обслуживания кормового стола крупного рогатого скота МСКС предназначена для выполнения операций по перемещению корма в зону досягаемости животного с сохранением структуры корма. Машина предназначена для эксплуатации в помещениях для содержания крупного рогатого скота.

Самоходная машина состоит из шасси и сменных адаптеров: подталкивателя корма, щетки, скрепера (рисунок 1).

Шасси состоит из сборного каркаса, бензинового двигателя, топливного бака, трансмиссии, передней оси с колесами, задней оси с поворотным колесом, устройства присоединения адаптеров, рабочего места оператора с сиденьем, дуги безопасности, панели управления, гидросистемы с гидробаком, электрооборудования, светосигнального оборудования.

Подталкиватель (рисунок 1, *а*) предназначен для перемещения грубых кормов (сено, солома, силос, сенаж) и кормосмесей ближе к кормовому столу.

Подталкиватель перемещает несъеденную животными кормосмесь к кормовому столу с одновременным рыхлением, что препятствует ее слеживанию и создает эффект свежеприготовленного корма.

Подталкиватель корма состоит из корпуса, шнека, гидросистемы, кронштейна для присоединения к шасси, ограждения для присоединения к шасси, двух опорных колес.

Щетка (рисунок 1, *б*) предназначена для подметания кормового прохода с одновременным перемещением мелких остатков грубых кормов и кормосмесей к кормовому столу, в зону досягаемости животных.

Щетка состоит из корпуса, кронштейна, на котором закреплен диск и гидромотор. Корпус служит для присоединения щетки к шасси.

Скрепер (рисунок 1, *в*) предназначен для перемещения большой массы грубых кормов и кормосмесей ближе к кормовому столу, в зону досягаемости животного.

Скрепер может использоваться также для уборки других помещений и территорий фермы.

Скрепер состоит из корпуса, скребка среднего, двух скребков боковых. Корпус является сцепкой и служит для присоединения адаптера к шасси.

Боковые скребки имеют возможность поворачиваться относительно среднего скребка, что позволяет изменять ширину захвата и направление подачи корма.

Поворот боковых скребков осуществляется вручную. Их положение фиксируется болтовым соединением.

Управление работой адаптеров осуществляется с помощью гидросистемы шасси.

Технологический процесс работы машины с подталкивателем, со щеткой и скрепером осуществляется следующим образом (рисунок 2): машина в агрегате с подталкивателем корма движется по кормовому проходу (рисунок 2, *а*). Лопасти шнека посредством гидромотора приводятся во вращение, захватывают корм с кормового прохода, перемешивают его и обеспечивают подачу его обратно животным.



а *б* *в*

Рисунок 1 – Самоходная машина со сменными адаптерами: *а* – подталкиватель; *б* – щетка; *в* – скрепер



а



б



в

Рисунок 2 – Вид машины в агрегате со сменными адаптерами в работе:
а – с подталкивателем; *б* – со щеткой; *в* – со скрепером

Технологический процесс работы машины со щеткой и скрепером осуществляется аналогичным образом (рисунок 2, *б* и 2, *в*).

Техническая характеристика самоходной машины для обслуживания кормового стола крупного рогатого скота МСКС представлена в таблице.

Наименование показателя	Значение
Тип машины	Самоходная
Тип двигателя	Четырехтактный двигатель внутреннего сгорания
Радиус разворота минимальный, мм	1 500
Габариты шасси, мм:	
– длина – ширина – высота	1 470 850 2 190
Масса шасси (без адаптеров), кг	240
Количество адаптеров, шт.	4
Тип адаптера: Подталкиватель Щетка Скрепер Отвал	Полунавесной

Функциональные показатели машины в условиях эксплуатации определялись в СПК «Агрокомбинат Снов» Несвижского района Минской области. Шасси агрегатировалось с подталкивателем, щеткой и скрепером. При агрегатировании с подталкивателем показатели определялись на перемещении кормосмеси влажностью 59,5 % ближе к кормовому столу после поедания ее части животными.

Ширина несъеденной кормосмеси на кормовом столе составляла 88,4 см при высоте 14,4 см. Среднее количество кормосмеси на 1 пог. м составляло 34,1 кг.

Щетка использовалась для подметания кормового прохода с одновременным перемещением мелких остатков кормосмеси к кормовому столу в зону досягаемости животных.

Рабочая скорость при выполнении технологического процесса перемещения кормосмеси в агрегате с подталкивателем составила 4,3 км/ч (по ТЗ – 2,0–6,0 км/ч), в агрегате со щеткой – 2,1 км/ч (по ТЗ – 2,0–6,0 км/ч).

В результате оценки функциональных показателей машины в агрегате с подталкивателем было установлено, что машина с подталкивателем обеспечивает выполнения технологического процесса перемещения кормосмеси, несъеденной животными, ближе к кормовому столу. Коэффициент надежности технологического процесса составил 1,00 (показатель ТЗ не регламентирован). Полнота перемещения кормосмеси составила 98,2 % (по ТЗ – не менее 98,0 %). Ширина и высота перемещенной кормосмеси после прохода подталкивателя составила 59,0 и 23,8 см соответственно.

В агрегате со щеткой машина обеспечивает устойчивое выполнение технологического процесса подметания кормового прохода с одновременным перемещением мелких остатков кормосмеси к кормовому столу в зону досягаемости животных.

Полнота перемещения кормосмеси составила 99,2 % (по ТЗ – не менее 98,0 %).

При испытаниях машины со скрепером средняя масса кормосмеси на 1 пог. м составляла 32,2 кг, ширина перемещаемой кормосмеси – 116,8 см. Для обеспечения перемещения кормосмеси была установлена ширина захвата скрепера 1 180 мм.

За период испытаний на надежность и эксплуатации в СПК «Агрокомбинат Снов» Несвижского района Минской области наработка машины с 15.04.2025 по 15.09.2025 составила 426 ч основного времени [4].

Заключение

Приемочными испытаниями определены фактические значения показателей самоходной машины для обслуживания кормового стола крупного рогатого скота МСКС, предусмотренные рабочей программой-методикой испытаний, и установлено, что машина при агрегатировании с подталкивателем и щеткой обеспечивает устойчивое выполнение технологического процесса и по основным показателям технической характеристики, полноте перемещения корма соответствует требованиям технического задания.

Список использованных источников

1. Разумовский, Н. Менеджмент кормового стола / Н. Разумовский // Животноводство России. – 2019. – № 5. – С. 55–58.

2. Технологические рекомендации по организации производства молока на новых и реконструируемых молочно-товарных фермах / Н. А. Попков, В. Н. Тимошенко, А. Ф. Трофимов [и др.] ; НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по животноводству. – Жодино, 2018. – 138 с.

3. Рабочие алгоритмы ООО «РОДАНАГРОПОЛ» // Белорусское сельское хозяйство. – 2022. – № 11 (247). – С. 18–22.

4. Протокол приемочных испытаний самоходной машины для обслуживания кормового стола крупного рогатого скота МСКС от 26 сентября 2025 г. № 017/ПН–1–2025 / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2025. – 78 с.

УДК 68.85.29

Поступила в редакцию 28.01.2026
Received 28.01.2026

Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, П. П. Бегун, В. В. Мижурин

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mehposev@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ АГРЕГАТА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО МОДУЛЬНОГО АМП-6

Аннотация. В статье приведены результаты приемочных испытаний агрегата почвообрабатывающего модульного АМП-6, которыми установлены фактические значения показателей назначения, функциональных, агротехнических и экономических показателей.

Ключевые слова: почвообрабатывающий агрегат, показатели назначения, функциональные показатели, агротехнические показатели, экономические показатели.

N. D. Lepeshkin, V. V. Mikulsky, P. P. Begun, V. V. Mizhurin

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mehposev@mail.ru

RESULTS OF ACCEPTANCE TESTS OF THE AMP-6 MODULAR SOIL CULTIVATION UNIT

Abstract. The article presents the results of acceptance tests of the modular soil-cultivating unit AMP-6, which established the actual values of the designation indicators, functional, agrotechnical and economic indicators.

Keywords: tillage unit, purpose indicators, functional indicators, agrotechnical indicators, economic indicators.

Введение

В последние годы в Республике Беларусь наряду с отвальной обработкой все более широкое применение находит безотвальная обработка почвы [1, 2]. Для успешного решения проблемы внедрения безотвальной обработки почвы важнейшим условием является создание соответствующих технических средств для ее осуществления. Для этого в республике уже разработан и освоен в производстве ряд комбинированных почвообрабатывающих агрегатов для безотвальной обработки почвы, в том числе и модульных. Однако все эти агрегаты созданы к тракторам мощностью до 350 л. с. Поскольку в настоящее время в республике имеются трактора зарубежного производства мощностью 400 л. с. и более, а также Минским тракторным заводом ведется разработка аналогичных тракторов большой мощности (БЕЛАРУС 5425), то для повышения производительности безотвальной обработки почвы и загрузки данных тракторов актуальна разработка и освоение в производстве соответствующего агрегата.

Основная часть

Для повышения производительности на основной безотвальной обработке почвы и загрузки тракторов мощностью 400 и более л. с. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» совместно с ООО «Биоком Технология» разработан опытный образец агрегата почвообрабатывающего модульного АМП-6 и проведены его приемочные испытания [3]. Агрегат предназначен для основной безотвальной обработки почвы из-под зерновых, зернобобовых, пропашных культур, однолетних трав и весенней обработки зяби на глубину до 40 см.

Агрегат выполнен полунавесным и имеет модульную конструкцию, состоящую из следующих основных сборочных единиц (рисунок): рамы, сницы, колесного хода, трех почвообраба-



а



б

Агрегат почвообрабатывающий модульный АМП-6: *а* – агрегат в работе;
б – агрегат в транспортном положении

тывающих модулей (измельчающего с дисковыми рабочими органами, рыхлительного с чизельными рабочими органами, выравнивающе-прикатывающего с выравнивающим брусом и катками), гидрооборудования, тормозной системы и электрооборудования. Более подробное описание конструкции агрегата и его сборочных единиц дано в статьях [4–8].

Технологический процесс, выполняемый агрегатом, заключается в следующем: в начале гона агрегат с помощью гидросистемы трактора переводится в рабочее положение, включается необходимая передача трактора и начинается движение по полю. При движении агрегата секции сферических дисков подрезают, частично измельчают растительные остатки и рыхлят верхний слой почвы, смешивая его с растительными остатками, в результате этого формируется мульчирующий слой. Далее стойки с лапами производят рыхление почвы или разуплотнение подпахотного горизонта почвы в зависимости от установленной глубины и лап. Затем выравнивающие рабочие органы выравнивают образованные при рыхлении гребни и впадины, а прикатывающие катки дробят комки почвы, выравнивают и уплотняют поверхностный слой почвы. При поворотах в конце гона с помощью гидросистемы трактора производится отрыв рабочих органов от поверхности поля и осуществляется петлевой поворот, затем агрегат переводится в рабочее положение и осуществляется рабочий ход в очередном гоне. После окончания работ на основном массиве поля производится обработка поворотных полос.

Техническая характеристика агрегата представлена в таблице 1.

Приемочные испытания агрегата АМП-6 в условиях эксплуатации проводились в ОАО «Вишневецкий-Агро» Столбцовского района и ОАО «Крутогорье-Петковичи» Дзержинского района Минской области в агрегате с тракторами «Кировец К-746М» и «Кировец К-742М» мощностью 460 и 420 л. с. соответственно. Условия проведения испытаний в основном характеризовались низкой влажностью (5,7–12,4 %) и высокой твердостью почвы в нижних слоях (4,5–7,4 МПа).

Таблица 1 – **Техническая характеристика агрегата**

Наименование показателя	Значение показателя
Тип агрегата	Полунавесной
Масса агрегата, кг	14 260
Габаритные размеры в рабочем положении, мм: – длина – ширина – высота	13 100 6 400 2 230
Габаритные размеры в транспортном положении, мм: – длина – ширина, не более – высота, не более	 13 300 4 400 3 530
Дорожный просвет, мм	300
Конструктивная ширина захвата агрегата, м: – при глубине обработки от 6 до 27 см – при глубине обработки от 27 до 40 см	 6 4
Модуль с дисковыми рабочими органами	
– тип дисков – количество рядов дисков, шт. – расстояние между рядами дисков, мм – расстояние между дисками в ряду, мм – диаметр диска, мм – толщина диска, мм – количество дисков в секции, шт.: – при ширине захвата 4 м – при ширине захвата 6 м – угол атаки дисков, град. – угол крена дисков, град.	сферические вырезные 2 1 100 425 685 6 18 30 10 15
Модуль с чизельными рабочими органами	
– количество рядов рабочих органов, шт. – расстояние между первым и вторым рядом, мм – расстояние между вторым и третьим рядом, мм – количество рабочих органов, шт.: – при ширине захвата 4 м – при ширине захвата 6 м	3 1 050 800 16 23
Выравнивающе-прикатывающий модуль	
– тип рабочих органов – количество рядов катков, шт. – диаметр катка, мм	выравнивающий брус и прикатывающие катки с U-образными кольцами 2 540

Функциональные показатели агрегата (таблица 2) определялись на обработке почвы после уборки кукурузы (фон 1) и обработке почвы по стерне зерновых (фон 2). Режимы работы выбирались с учетом оптимальной загрузки двигателя трактора и качества обработки почвы.

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что при агрегатировании с трактором «Кировец К-746М» глубина при обработке фона 1 составила – 18,1 см (ширина захвата агрегата 6 м, рабочая скорость 8,0 км/ч), а фона 2–24,0 см, (ширина захвата 6 м, рабочая скорость 8,0 км/ч) и 28,8 см (ширина захвата 4 м, рабочая скорость 9 км/м). При агрегатировании с трактором «Кировец К-742М» глубина при обработке фона 1, составила – 15,1 см (ширина захвата агрегата 6 м, рабочая скорость 8,3 км/ч) и 24,0 см (ширина захвата агрегата 4 м, рабочая скорость 9 км/ч), а на обработке фона 2 – 17,1 см (ширина захвата агрегата 6 м, рабочая скорость 9 км/ч). Следует отметить, что хотя конструкцией агрегата и предусмотрена возможность регулировки максимальной глубины обработки до 40 см, однако обеспечить ее не представлялось возможным по тягово-мощностным характеристикам используемых тракторов.

Таблица 2 – **Функциональные показатели работы агрегата**

Наименование показателя	Значение показателя					
	Фон 1			Фон 2		
Вид работы	Обработка почвы после уборки кукурузы			Обработка почвы по стерне зерновых		
Трактор	«Кировец К-746М»	«Кировец К-742М»		«Кировец К-746М»	«Кировец К-742М»	
Сельхозмашина	Почвообрабатывающий агрегат АМП-6					
Рабочая скорость, км/ч	8,0	8,3	9,0	8,0	9,0	9,0
Рабочая ширина захвата, м	6	6	4	6	4	6
Глубина обработки, см	18,1	15,1	24,0	24,0	28,8	17,1
Отклонение средней глубины обработки от заданной, см	–1,9	–0,9	–2,0	–1,0	–0,8	–0,9
Гребнистость поверхности поля, см	4	4	4	4	4	4
Подрезание растительных и пожнивных остатков, %	95,0	97,5	98,3	100	100	100
Крошение почвы, %: размер комков до 25 мм включительно	96,8	94,7	93,1	95,4	94,8	94,3
Плотность почвы, г/см^3 в слоях, см:						
0–5	1,1	0,96	1,08	1,11	1,18	0,96
5–8	1,26	1,00	1,02	1,25	1,29	1,09

Анализ других данных, представленных в таблице 2, показывает, что агрегат в основном соответствует требованиям ТЗ и других технических нормативно-правовых актов (ТНПА), предъявляемым к таким агрегатам [9].

Так, отклонение средней глубины обработки от заданной на фоне 1 колебалось от –0,9 до –2 см, а на фоне 2 – от –0,8 до –1,0 см, что соответствует ТЗ (не более ±2 см при глубине обработки от 6 до 27 см и не более ±1 см при глубине обработки от 27 до 40 см). Гребнистость поверхности поля на обоих фонах составила 4 см, что соответствует ТЗ и ТНПА (не более 4 см). Подрезание растительных и пожнивных остатков при обработке поля после уборки кукурузы (фон 1) составило 95,0–98,3 %, что не является несоответствием, так как высота пожнивных остатков кукурузы составляла 34–39 см (по ТЗ не более 25 см). При обработке поля после уборки зерновых культур (фон 2) подрезание растительных и пожнивных остатков составило 100 %. Крошение почвы, массовая доля фракций до 25 см включительно, составило при обработке фона 1 – 93,1–96,8 %, а при обработке фона 2 – 94,3–95,4 %, что соответствует ТЗ и ТНПА (не менее 80 %). Плотность почвы в слое 0–5 см составила 0,96–1,18 г/см^3, а в слое 5–8 см – 1,00–1,29 г/см^3, что соответствует ТЗ (0,95–1,3 г/см^3).

Одновременно с определением функциональных показателей на обработке поля по стерне зерновых культур, в агрегате с трактором «Кировец К-746М» была проведена эксплуатационно-технологическая оценка АМП-6, результаты которой представлены в таблице 3.

Таблица 3 – **Эксплуатационно-технологические показатели агрегата**

Наименование показателя	Значение	
Состав машинно-тракторного агрегата: трактор агрегат	«Кировец К-746М» АМП-6	
Вид работы	Обработка почвы по стерне зерновых культур	
Рабочая ширина захвата, м	6	4
Рабочая скорость, км/ч	8,0	9,0
Транспортная скорость, км/ч	20	
Глубина обработки, см	24,0	28,8

Окончание табл. 3

Наименование показателя	Значение	
Эксплуатационно-технологические показатели		
Производительность, га, за час времени: – основного – сменного – эксплуатационного	 4,8 3,6 3,5	 3,6 2,7 3,6
Удельный расход топлива за сменное время, кг/га	15,7	18
Количество персонала по профессиям, необходимого для обслуживания операций, непосредственно связанных с работой машины, чел.	1 тракторист-машинист	1 тракторист-машинист
Эксплуатационно-технологические коэффициенты: – технологического обслуживания – надежности технологического процесса – использования сменного времени – использования эксплуатационного времени	 1,00 0,99 0,75 0,73	

Анализ таблицы 3 показывает, что производительность агрегата за час основного времени при ширине захвата 6 м, скорости движения 8,0 км/ч и глубине обработки 24 см составила 4,8 га, а при ширине захвата 4 м, скорости движения 9,0 км/ч и глубине обработки 28,8 см – 3,6 га. Производительность за час сменного времени на указанных выше режимах составила 3,6 и 2,7 га. При этом коэффициенты использования сменного времени составили 0,75, что соответствует требованиям ТЗ и ТНПА (не менее 0,75), а расход топлива за сменное время составил 15,7 и 18,0 кг/га, что также соответствует требованиям ТЗ и ТНПА (не более 18 кг/га).

Наработка агрегата при испытаниях составила 1 114 га или 232 ч основного времени, при этом средняя наработка на сложный отказ составила 116 ч, что соответствует требованиям ТЗ (не менее 100 ч).

Проведенный по результатам эксплуатационно-технологической оценки на обработке почвы по стерне зерновых в сравнении с отечественным комплексом машин АДС-6 + КГП-6,2 и АДС-6 + ПЧ-3Г, а также зарубежным аналогом Tiger 6MT Horsch расчет экономических показателей использования агрегата АМП-6 показал, что они имеют положительный результат. Так, по сравнению с комплексом машин АДС-6 + КГП-6,2 годовой приведенный экономический эффект составляет 96 992,00 руб., в сравнении с комплексом машин АДС-6 + ПЧ-3Г – 15 074,80 руб., а в сравнении с агрегатом Tiger 6MT Horsch – 61 670,00 руб.

На основании результатов приемочных испытаний приемочной комиссией МСХП принято решение о постановке агрегата АМП-6 на производство.

Заключение

Для повышения производительности на основной безотвальной обработке почвы и загрузки тракторов мощностью 400 и более л. с. разработан агрегат почвообрабатывающий модульный АМП-6, который является первым агрегатом такого класса, выпущенным в Беларуси.

Приемочными испытаниями определены фактические значения показателей агрегата АМП-6 и установлено, что он в основном соответствует требованиям ТЗ и других ТНПА по функциональным и агротехническим показателям, удельному расходу топлива, показателям надежности и безопасности. Рекомендовано поставить агрегат АМП-6 на производство.

Агрегат АМП-6 не уступает аналогичным агрегатам ведущих зарубежных фирм по энергетическим, агротехническим показателям и показателям назначения и при этом является экономически целесообразным.

Список использованных источников

1. Лепешкин, Н. Д. Безотвальная обработка почвы и перспективы ее развития для условий Республики Беларусь / Н. Д. Лепешкин, Н. Г. Бакач, В. В. Мижурин // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения академика С. И. Назарова ; Минск, 19–20 окт. 2023 г. / редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2023. – С. 70–74.

2. Значение обработки почвы и агроэкологические аспекты ее совершенствования / Ф. И. Привалов, Л. А. Булавин, А. П. Гвоздов, Н. Д. Лепешкин // Земледелие и растениеводство (приложение к журналу № 2 (141, март – апрель 2022 г.). – 2022. – № 2. – С. 24–26.

3. Протокол № 052 – 1/2 – 2025 от 11 декабря 2025 года приемочных испытаний агрегата почвообрабатывающего модульного АМП-6/ ГУ «Белорусская МИС» – пос. Привольный, 2025. – 104 с.

4. Полезная модель BY 13869, № u 20250086. Почвообрабатывающий агрегат : заявлено 17.04.2025 : опубл. 05.12.2025 / Лепешкин Н. Д., Мижурин В. В., Микульский В. В., Скорын В. Н., Синяк Ю. В. – 5 с.

5. Промышленный образец BY 5390 № f 20250043. Агрегат почвообрабатывающий модульный : заявлено 17.04.2025 : опубл. 20.08.2025 / Лепешкин Н. Д., Мижурин В. В., Микульский В. В., Скорын В. Н., Комлач Д. И., Бегун П. П. – 2 с.

6. Агрегат почвообрабатывающий модульный с изменяемой шириной захвата АМП-6 / Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. Н. Скорин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2025. – Вып. 58 – С. 143–149.

7. Лепешкин, Н. Д. К обоснованию принципиальной схемы и типа рабочих органов агрегата для основной безотвальной обработки почвы / Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин, Ю. В. Синяк // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2025. – Вып. 58. – С. 132–138.

8. Лепешкин, Н. Д. К обоснованию конструктивной схемы агрегата почвообрабатывающего с изменяемой шириной захвата / Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин Ю. В. Синяк // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2025. – Вып. 58. – С. 139–142.

9. ТКП 079-2007 (02150) СТОАИСТ 10 4.6-2003. Сельскохозяйственная техника. Машины почвообрабатывающие. Правила установления показателей назначения. – Мн. : РУП «Белорусский научный институт внедрения новых форм хозяйствования в АПК». – 2007. – 27 с.

УДК 631.171

Поступила в редакцию 15.09.2025
Received 15.09.2025

А. Н. Перепечаев, И. С. Пылило, А. С. Тарима

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: pan-s1@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ОСНАЩЕННОСТИ ТЕХНИКОЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЛЬНА

Аннотация. В статье рассматриваются роль механизации в льноводстве, а также влияние факторов, связанных с недостаточным оснащением техникой льносеющих организаций, на потери урожайности и, как следствие, снижение рентабельности возделывания, уборки и послеуборочной переработки льна.

Ключевые слова: лен, агрегат, возделывание, уборка, посев, оснащенность техникой, качество продукции, механизация, урожайность, сроки возделывания.

A. N. Perepechaev, I. S. Pylilo, A. S. Tarima

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: pan-s1@yandex.ru

THE INFLUENCE OF EQUIPMENT ON THE EFFICIENCY OF FLAX CULTIVATION

Abstract. The article examines the role of mechanization in flax production, as well as the influence of factors related to insufficient equipment of flax-growing organizations on yield losses and, as a result, a decrease in the profitability of cultivation, harvesting, and post-harvest processing of flax.

Keywords: flax, aggregate, cultivation, harvesting, sowing, equipment with machinery, product quality, mechanization, yield, terms of cultivation.

Введение

Льноводство традиционно занимает особую роль в экономике Беларуси, являясь важной составляющей агропромышленного комплекса и национального экспорта. В условиях ужесточения требований к качеству продукции, роста конкуренции на мировых рынках и необходимости повышения рентабельности производства перед отраслью встают новые задачи по оптимизации всех этапов технологического процесса. Одним из наиболее эффективных путей решения этих задач является механизация – внедрение современных машин и оборудования на всех стадиях выращивания, уборки и переработки льна.

Механизация позволяет значительно повысить производительность труда, снизить потери урожая, обеспечить стабильное качество льноволокна, а также сократить потребность в ручном труде в условиях дефицита кадров. Благодаря техническому перевооружению отрасль получает возможность максимально эффективно использовать природно-климатический потенциал страны и укреплять свои позиции на внутреннем и внешнем рынках.

Основная часть

По состоянию на 2025 г. в республике работает 19 льнозаводов. Площадь возделывания льна-долгунца – 47,8 тыс. га. В соответствии с комплексным планом развития льняной отрасли расчетная урожайность тресты должна составить в среднем по республике 39,6 ц/га. Для получения такой урожайности необходимо строгое соблюдение всех требований отраслевого технологического регламента выращивания льна-долгунца, которые изложены в сборнике «Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, кормовых и технических растений» [1].

Для механизации процессов возделывания и уборки льна в республике создан и осуществляется выпуск базового комплекса машин для обработки почвы, посева, внесения минеральных удобрений, ухода за посевами и уборки к тракторам различных тяговых классов. Вместе с тем оснащенность оборудованием является недостаточной по всем позициям.

Для агрегатирования машин в льносеющих предприятиях республики используется 725 ед. тракторов различной мощности двигателя при технологической потребности в них 791 ед. (обеспеченность – 91,7 %), из них 196 ед. тракторов с мощностью двигателя 250 л. с. и более при технологической потребности в них 294 ед. (обеспеченность – 66,6 %).

Для основной обработки почвы в льносеющих предприятиях республики в настоящее время используется 157 ед. плугов при технологической потребности 214 ед. (обеспеченность – 74,9 %), а также 109 ед. дискаторов-лущильников различных марок при технологической потребности в них 181 ед. (обеспеченность – 60,2 %), 192 ед. комбинированных почвообрабатывающих агрегатов типа АКШ при технологической потребности в них 292 ед. (обеспеченность – 65,7 %).

Недостаточное оснащение техникой для основной обработки почвы приводит к несвоевременному выполнению работ. Вместе с тем лен требователен к влаге на протяжении всего периода вегетации. На начальной стадии развития потребность во влаге обеспечивается ее зимними запасами. Несвоевременная основная обработка почвы снижает урожайность льна, так как нарушает водный и воздушный режимы почвы, что препятствует развитию корневой системы и усвоению питательных веществ. Это приводит к замедлению роста, снижению качества волокна и повышению засоренности поля, а в итоге – к более низкому урожаю.

Для внесения твердых минеральных удобрений под посев льна используется 175 ед. машин центробежного типа при технологической потребности в них 320 ед. (обеспеченность – 54,7 %). Для внесения химических средств защиты растений на посевах льна используется 129 ед. опрыскивателей различных типов при технологической потребности в них 201 ед. (обеспеченность – 64,2 %).

Недостаточное оснащение машинами для внесения удобрений приводит к несвоевременной подкормке даже при достаточном количестве удобрений. Лен требует сбалансированного питания на протяжении всей вегетации. Дефицит может замедлить рост, снизить качество волокна и урожайность семян. Неправильное внесение удобрений ведет к снижению содержания луба в волокне и ухудшению качества семян. Задержка цветения и созревания приводит к более долгому вегетационному периоду. Все вышеперечисленные факторы в итоге приводят к значительному уменьшению общего количества и качества урожая.

Задача технологических приемов на стадии возделывания льна состоит в том, чтобы сформировать к началу уборки на единице площади 1700–2000 растений, однородных по основным технологическим требованиям – длине, цвету и фазе созревания [2]. Используемые в настоящее время комбинированные почвообрабатывающие агрегаты типа АКШ-6 и сеялки типа СПУ-6ЛЦ не в полной мере позволяют в различных условиях гарантированно обеспечить выполнение параметров агротехники, таких как глубина посева на 1,0–1,5 см (тяжелые почвы) или 2,0–3,0 см (легкие почвы) для 80 % семян. Кроме того, для посева льна в льносеющих предприятиях используются посевные агрегаты с активными рабочими органами, механической системой высева семян и применением комплектующих фирмы «Лемкен» (Германия) ВМРЗ-300, а также сеялки СЗТМ-4 с механической системой высева семян производства ОАО «Витебский мотороремонтный завод», с пневматической системой высева АПП-6АБ-Л и АППМ-6Л производства ОАО «Брестский электромеханический завод» с применением комплектующих фирмы «Квернеланд» (Норвегия). Всего применяется 117 ед. посевных машин при технологической потребности в них 152 ед. (обеспеченность – 76,9 %). Оптимальная норма высева – 18–22 млн/га всхожих семян на га [3]. Основным недостатком используемых посевных машин является неравномерное распределение семян льна по площади питания и глубине их заделки. Кроме того, использование посевных агрегатов с пневматической системой высева ведет к снижению полевой всхожести семян льна на 10–20 %.

Опоздание с севом приводит к снижению урожая. При соблюдении сроков лучше развивается корневая система, ускоряется рост. В регионах со сравнительно невысокой температурой воздуха и достаточной влажностью почвы растение приобретает крепкий иммунитет и быстрее созревает [4].

Для механизации процессов уборки товарных посевов льна без очеса коробочек используются теребилки ТСЛ-2,4 производства ОАО «Щучинский ремонтный завод» с применением комплектующих фирмы Depoortere (Бельгия) и «Лида-GE220» производства ОАО «Лидагропроммаш» с применением комплектующих фирмы Union (Бельгия). Всего в льносеющих предприятиях используется 141 ед. льнотеребилок при потребности в них 214 ед. Недостаток льнотеребилок частично перекрывается за счет использования на тереблении комбайнов «Двина-4» (ЛК-4А) с отключенным очесывающим аппаратом.

Для механизации уборки семенных посевов льна в качестве основной машины используется прицепной комбайн ЛК-4А производства ОАО «Бежецксельмаш» (Тверская область, РФ) и его аналог «Двина-4» производства ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод». Кроме того, используются самоходные однопоточные комбайны КЛС-3,5 (РУП «Гомельский завод сельскохозяйственного машиностроения ПО «Гомсельмаш»). Общий парк льноуборочных комбайнов составляет 257 ед. В то же время износ льноуборочных комбайнов типа ЛК-4А составляет около 90 %, поэтому требуется их замена. При этом целесообразно провести модернизацию комбайнов ЛК-4А с целью снижения потерь семян и повышения качества тереблення льна.

Оптимальным сроком уборки посевов льна-долгунца по качеству волокна, его физико-механическим свойствам и прядильной способности считается фаза ранней желтой спелости. Уборку проводят в сжатые сроки – за 10–12 дней. На семеноводческих посевах оптимальный срок уборки – фаза желтой спелости, убирают семена за 5–6 дней. Если хозяйство начинает уборку товарных посевов в фазе желтой спелости, которая длится 5–7 дней, то существует опасность, что часть урожая придется убирать в фазе полной спелости. При полном созревании льна-долгунца волокно становится хрупким, грубеет, при обработке дает много отходов, стебли труднее вылеживаются. Зеленоватая треста льна, убранного в фазе цветения, отличается плохой отделяемостью луба, дает высокий процент недоработки, выход волокна уменьшается на 25 %. Кроме того, недозревшие (зеленые) семена, как правило, нежизнеспособны [5].

Для приготовления льнотресты используются однопоточные самоходные оборачиватели ОЛЛ-1 и ОСЛ-1 (ДП «Щучинский ремонтный завод»), а также двухпоточные оборачиватели «Лида-GE240» (ОАО «Лидагропроммаш»). Используется 216 ед. различных типов оборачивателей при технологической потребности в них 393 ед. Недостаток техники частично закрывается использованием на полях с низкой урожайностью тресты вспушивателей лент льна ВЛН-4,5 (ОАО «УКХ «Бобруйскагромаш») и ВВЛ-3 (ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод»), которые обеспечивают обработку одновременно трех лент за один проход независимо от сформированных лент шириной 1,2–1,5 м. Однако применение вспушивателей не обеспечивает выполнение агротехнических требований механизированной уборки льнотресты при урожайности свыше 3,0 т/га.

Для прессования льнотресты используется 593 ед. пресс-подборщиков при общей потребности в них 749 ед. Прицепные пресс-подборщики представлены моделями ПРЛ-150, ППЛ-1, ППУ-165, ПРС-1, ПЛС-1,5 и др.

Несвоевременное прессование льнотресты негативно влияет на выход льноволокна, так как может привести к разрыхлению стеблей и повреждению волокон, снижая их качество и количество, а также к снижению полноты подбора при уборке, что напрямую уменьшает объем сырья, поступающего на переработку.

В современной технологии возделывания льна необходимо соблюдать все рекомендуемые наукой элементы технологического процесса. По оценке РУП «Институт льна», потери урожайности волокна и его качества из-за нарушения технологии возделывания могут составить:

− поздняя осенняя или весенняя вспашка – 1,0−1,5 ц/га;
− посев льна после малопригодных предшественников – 1,2−1,5 ц/га;
− посев льна на почвах с pH свыше 6,00 – 2,5−4,5 ц/га;
− посев льна после оптимальных и допустимых сроков – 1,0−2,0 ц/га;
− повреждение посевов льняной блохой и другими вредителями – 1,0−1,5 ц/га;
− несвоевременная обработка посевов льна гербицидами – 1,5−2,5 ц/га;
− непроведение обработки посевов льна фунгицидами для борьбы с болезнями – 0,5−1,5 ц/га;

− треблениe позже оптимальных агротехнических сроков – 2,0−2,5 ц/га;

− перележка тресты – 2,0−4,0 ц/га.

На практике из-за нарушений технологии возделывания льна потери урожайности льняного волокна достигают 6−8 ц/га при существенном снижении качества. В финансовом выражении потери могут составлять до 40 % от возможно полученной льнопродукции [6].

Заключение

Анализ технической оснащенности льнозаводов республики показывает недостаток как техники для основной обработки почвы и посева, так и специализированной техники для последующей уборки и заготовки льна. В целом недостаток техники приводит к тому, что весь цикл операций, начиная от подготовки почвы и заканчивая уборкой рулонов, в конечном итоге приводит к существенным недоборам как семян льна, так и льноволокна.

Изучение влияния разных агротехнических приемов на формирование элементов продуктивности льна-долгунца различных сортов показало, что при задержке с посевом на 20 дней урожайность семян снижается на 45 %, волокна – на 32 %, в том числе длинного – на 36 %, одновременно содержание волокна в стеблях уменьшается на 2,8 %, а его выход – на 2,5 %.

Таким образом, только в случае достаточной оснащенности льносеющих организаций техникой как для обработки почвы, так и специализированной техникой для треблениа, оборачивания и ролонирования льна, можно получать запланированный урожай с расчетной урожайностью тресты в среднем по республике 39,6 ц/га.

Список использованных источников

1. Комплексный план мероприятий по производству льнотресты в 2025 г. : офиц. сайт Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – Мн., 2007–2025. – URL: https://mshp.gov.by/uploads/Files/rasten/NAN-Belarusi-kompleksnyj-plan-na-2025-god-.pdf (дата обращения: 19.08.2025).

2. Льноводство : монография / А. Р. Рогаш, Н. Г. Обрамов, В. А. Толковский [и др.] ; [отв. ред. А. Р. Рогаш]. – М. : Колос, 1967. – 583 с. – URL: https://www.booksite.ru/fulltext/flax/lno/vod/stv/o2/index.htm (дата обращения: 20.08.2025).

3. Агротехника нового сорта льна-долгунца «Пересвет» / А. Д. Степин, Т. А. Рысева, С. В. Уткина, Н. В. Романова // Известия Великолукской ГСХА. – 2017. – № 4. – С. 17–21. – URL: https://vgsa.ru/nir/ivgsa/numbers/vgsa2017-4-3.pdf (дата обращения: 20.08.2025).

4. Выращивание льна: когда сеять, условия и технологии посева : сайт компании Agroapp. – 2021–2025. – URL: https://agroapp.com.ua/ru/blog/vyrashhivanie-lna-kogda-seyat-usloviya-i-texnologii-poseva (дата обращения: 25.08.2025).

5. Уборка льна-долгунца : офиц. сайт ОАО «Дворецкий льнозавод». – URL: https://linum.by/uborka (дата обращения: 25.08.2025).

6. Кожановский, В. А. Организационно-технологические факторы повышения эффективности возделывания и переработки льна в Беларуси / В. А. Кожановский, Е. К. Соколова // Актуальные проблемы инновационного развития агропромышленного комплекса Беларуси : сб. науч. тр. по материалам XIV Междунар. науч.-практ. конф., Горки, 30–31 мая 2022 г. : в 2 ч. / редкол.: И. В. Шафранская (отв. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2023. – Ч. 1. – С. 145–154.

7. Семеницкая, Г. А. Технологические особенности возделывания льна-долгунца на семена и волокно / Г. А. Семеницкая, Н. М. Петракова // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 3. – С. 32–33. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-osobennosti-vozdelyvaniya-lna-dolguntsa-na-semena-i-volokno/viewer (дата обращения: 20.08.2025).

УДК 631.362.

Поступила в редакцию 30.01.2026
Received 30.01.2026

М. И. Курилович, В. В. Голдыбан, В. П. Селиванова

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ СТРУЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Аннотация. Проведено исследование взаимодействия сжатой струи воздуха с клубнем картофеля в зоне вальцово-подающего конвейера с целью определения оптимальных параметров форсунки и воздушного потока для надежного отделения некондиционных клубней при минимальных энергозатратах. В качестве базового варианта рассмотрена цилиндрическая форсунка диаметром 5 мм, расположенная без смещения относительно оси клубня. Моделирование выполнено в среде FlowVision с использованием сжимаемой модели течения, уравнений Навье-Стокса и турбулентной модели Spalart-Allmaras (SA). Получены поля давления и скорости, линии тока, временные зависимости проекций аэродинамических сил на оси *X* и *Y* для давления 4–8 атм.

Ключевые слова: моделирование, картофель, форсунка, воздушный поток, автоматическая сортировальная машина, вальцово-подающий конвейер.

M. I. Kurylovich, V. V Holdyban, V. P. Selivanova

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru

SIMULATION OF THE PROCESS OF SEPARATION OF SUB-CONDITIONED POTATO TUBERS BY A JET OF COMPRESSED AIR

Abstract. This paper presents a study of the interaction of a compressed air jet with a potato tuber in the area of a roller conveyor. The aim is to determine the optimal nozzle and airflow parameters for the reliable separation of substandard tubers with minimal energy consumption. A cylindrical nozzle with a diameter of 5 mm, positioned without offset from the tuber axis, is used as the baseline. The simulation was performed in the FlowVision environment using a compressible flow model, the Navier-Stokes equations, and the Spalart-Allmaras turbulence model (SA). Pressure and velocity field, streamlines, and time dependences of aerodynamic forces projections on the *X* and *Y* axes for pressures of 4–8 atm are obtained.

Keywords: simulation, potato, nozzle, airflow, automatic sorting machine, roller conveyor.

Введение

Автоматизация сортировочных процессов в сельском хозяйстве является одним из ключевых направлений повышения эффективности производства и качества продукции. В современных линиях сортировки картофеля задача оперативного и точного отделения некондиционных клубней традиционно решается вручную или с использованием механических устройств низкой адаптивности, что ограничивает пропускную способность, повышает трудозатраты. Применение импульсных воздушных форсунок в сочетании с оптической системой распознавания дефектов представляет собой перспективное техническое решение, позволяющее исключить ручной труд, повысить производительность линии и обеспечить более мягкое обращение с продукцией.

Численное моделирование взаимодействия сжатой струи воздуха с поверхностью клубня дает возможность детально изучить поля давления и скорости, характер ударного импульса и распределение аэродинамических сил. Эти данные необходимы для обоснования геометрии форсунки, выбора ее положения относительно клубня и разработки алгоритмов импульсной

подачи, которые минимизируют энергозатраты при гарантированном отделении. Важными инженерными критериями являются величины проекций сил по осям, время фиксирования установившегося режима, локализация пятна удара и оценка требуемой мощности компрессора.

В работе выполнено комплексное CFD-исследование базового варианта – цилиндрической форсунки диаметром 5 мм, установленной без смещения относительно оси клубня. Моделирование проведено в нестационарной постановке с учетом сжимаемости воздуха и турбулентности (Spalart-Allmaras), с локальным сгущением сетки в области сопла и вокруг клубня. Рассмотрены режимы подачи с давлением на входе форсунки от 4 до 8 атм; для каждого режима получены поля давления и скорости, линии тока, временные зависимости проекций аэродинамических сил и интегральные характеристики расхода и скорости на входе.

Основная часть

Задача исследования разделялась на три взаимосвязанных направления: воспроизведение рабочих полей скорости и давления при ударе струи по клубню, определение геометрии форсунки и ее расположения, а также выбор оптимальных параметров воздушного потока, обеспечивающих гарантированное удаление при минимальной энергетической нагрузке. В качестве базового варианта была исследована цилиндрическая форсунка диаметром 5 мм, расположенная без смещения относительно оси клубня. Ниже приведена геометрическая схема, определяющая взаимное расположение элементов и ключевые размеры зоны взаимодействия; она служит исходной основой для генерации расчетной области и анализа газодинамики (рисунок 1).

Выбранная конфигурация обеспечивает симметричное обтекание клубня и позволяет сфокусировать струю на его центральной зоне. Это критично для повторяемости результата отделения и минимизации случайных отклонений траектории.

В расчетах принята модель сжимаемого воздуха с решением уравнений Навье – Стокса. Турбулентность описана моделью Spalart-Allmaras (SA) с логарифмическим законом у стенки. Опорные величины: абсолютное давление воздуха $P_{аб}$ = 101 330 Па (1 атм) и температура T = 293 K (25 °C). Теплоперенос учтен через параметр H (перенос энтальпии), что позволяет корректно учитывать тепловые эффекты при сжатии и расширении в струе [1].

Граничные условия заданы следующим образом. На входе форсунки применено граничное условие «вход/выход» с параметризуемым давлением на входе в режимах 4–8 атм (данный интервал был определен экспериментально). На выходе расчетной области установлен свободный выход с атмосферным статическим давлением. Клубень, корпус форсунки и вальцы заданы как твердые стенки с логарифмическим законом у стенки. Плоскость симметрии задана как условие симметрии с проскальзыванием.

Расчет выполнялся в нестационарной постановке с использованием неявной схемы второго порядка по времени. Сетка сформирована с локальным сгущением в области форсунки, ядра

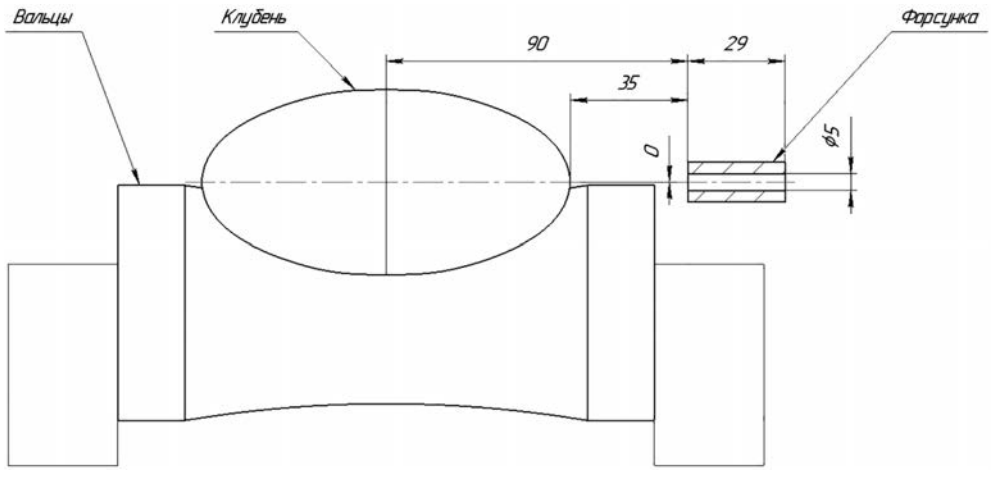


Рисунок 1 – Схема расположения форсунки относительно клубня

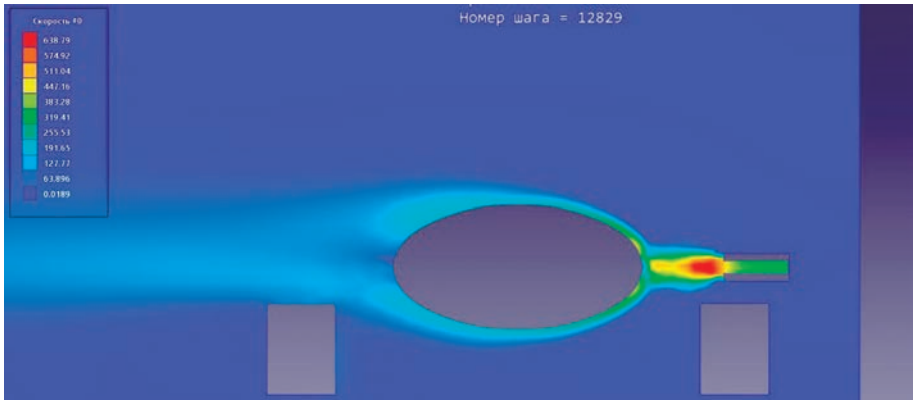


Рисунок 2 – Распределение давления в плоскости симметрии, Па

струи и вокруг клубня, при этом для SA-модели целевой диапазон y^+ у стенок принят равным 30–100, вблизи сопла сформирована пристенная призматическая структура. Временной шаг выбирался с учетом критерия Куранта – Фридрихса – Леви (CFL): в критических областях поддерживались значения CFL порядка 1 для точного разрешения фронтов, а в целом допускалось увеличение до ≈5 за счет неявной интеграции при контроле точности. Сходимость считалась достигнутой при снижении нормированных невязок уравнений массы, импульса (компоненты *X*, *Y*, *Z*), энергии (энтальпия) и уравнения Spalart – Allmaras до порядка 10^{-4}–10^{-6} и при стабилизации интегральных метрик во времени.

Для понимания структуры течения и локализации силового воздействия были проанализированы поля давления и скорости, а также линии потока в плоскости симметрии. На рисунке 2 показано распределение статического давления в плоскости симметрии. В зоне прямого удара струи по поверхности клубня фиксируется максимум давления, далее вдоль оси потока формируется выраженный градиент, связанный с ускорением и расширением струи и развитием зон сдвига. За клубнем наблюдается область пониженного давления, где формируются рециркуляционные структуры.

Распределение давления на поверхности клубня концентрируется в центральном пятне удара и снижается к краям обдуваемой зоны; такая картина соответствует ожидаемому при осевом попадании струи из цилиндрического сопла и определяет локальную нагрузку, преодолевающую удерживающие силы контакта с вальцами. На выходе сопла формируется узкое ядро струи с вы-

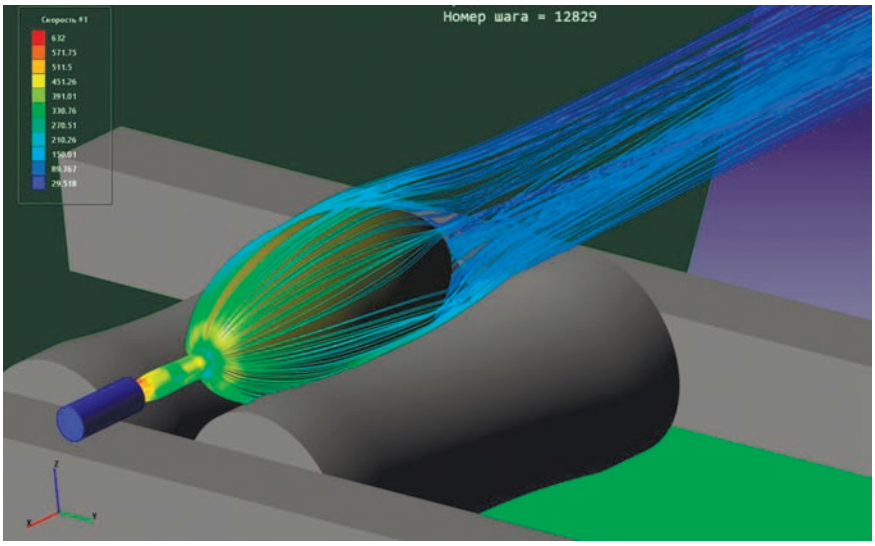


Рисунок 3 – Линии тока воздушного потока из форсунки, м/с

сокими скоростями (порядка 300 м/с в исследованных режимах). При взаимодействии с клубнем струя локально тормозится в зоне нормального удара и частично ускоряется в зоне обтекания, что видно по карте скоростей.

Линии тока (стримлайны), представленные на рисунке 3, демонстрируют характерное ударное взаимодействие: часть потока отражается и отклоняется вверх и в стороны, формируя вихревые зоны позади клубня. Такая топология важна для оценки устойчивости отделения и возможного влияния струи на соседние объекты на конвейере.

Ключевым показателем эффективности является интегральная сила, действующая на клубень, и ее компоненты по осям *X* (продольная, вдоль транспортирования) и *Y* (перпендикулярная, «поднимающая» от вальцов). Для давлений 4–8 атм были получены временные зависимости (рисунки 4 и 5), отражающие характер ударного импульса и последующее затухание колебаний. На графиках наблюдается резкий начальный пик силы в первые миллисекунды, соответствующий удару фронта струи, после чего сила снижается и переходит в режим затухающего взаимодействия с установлением устойчивого уровня. В качестве иллюстрации формы кривой и временного отклика представлены два характерных графика для режима 4 атм: проекция силы на ось *X* (рисунок 4) и проекция на ось *Y* (рисунок 5).

Резкий начальный пик (порядка 10 Н) соответствует удару фронта струи; далее наблюдается быстрый спад и автоколебания, стабилизирующиеся в течение 0,01–0,014 с на уровнях, близких к средним значениям из интегральной таблицы.

Начальный пик сменяется затухающими колебаниями; устойчивый уровень силы по оси *Y* при 4 атм составляет около 10,9 Н. Эта величина определяет способность струи срывать клубень с линии при минимальном исследованном давлении.

Аналогичные закономерности наблюдаются и при давлении в 5, 6, 7 и 8 атм. Различие заключается в величине установившихся сил:

– при 5 атм $X \approx 5{,}2$ Н, $Y \approx 13{,}5$ Н;
– при 6 атм $X \approx 6{,}3$ Н, $Y \approx 15{,}3$ Н;
– при 7 атм $X \approx 7{,}2$ Н, $Y \approx 17{,}6$ Н;
– при 8 атм $X \approx 8{,}7$ Н, $Y \approx 19{,}4$ Н.

По всем режимам сила по оси *Y* стабильно превосходит силу по оси *X*, что отражает доминирующую «поднимающую» роль потока в процессе отделения клубня от вальцов. Начальный ударный пик в первые миллисекунды задает основной импульс, после чего система входит в режим затухающего взаимодействия и установившегося воздействия на клубень.

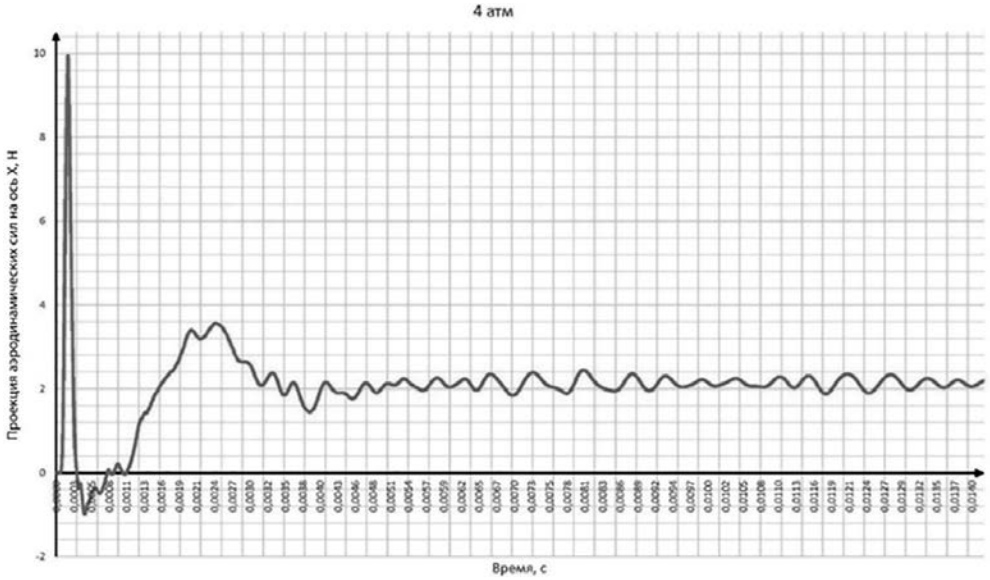


Рисунок 4 – График зависимости проекции аэродинамических сил на ось *X* от времени, 4 атм

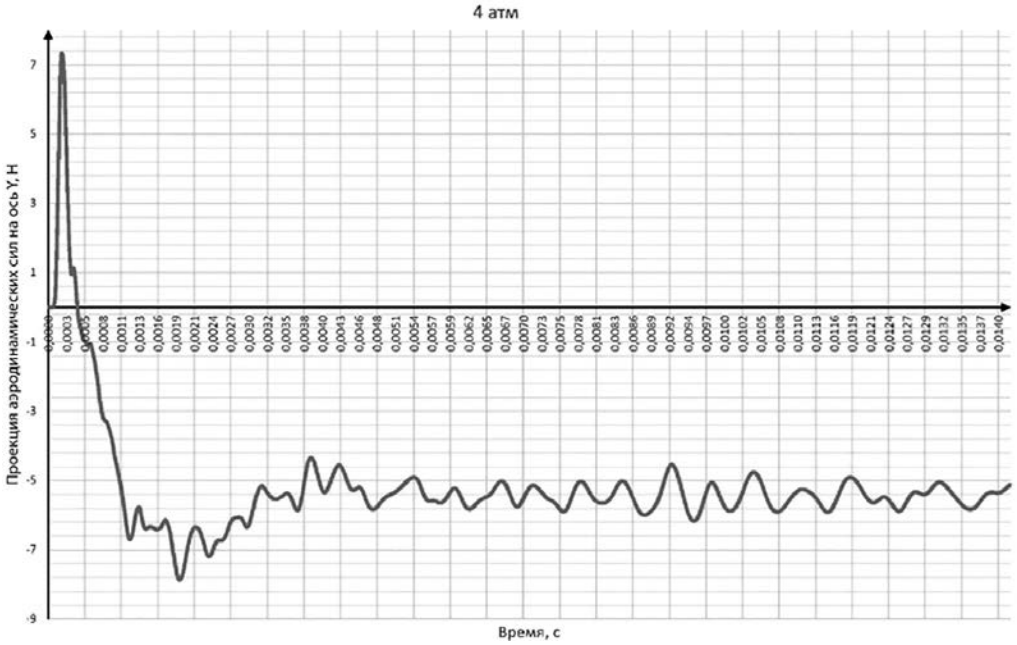


Рисунок 5 – График зависимости проекции аэродинамических сил на ось *Y* от времени, 4 атм

Сводные интегральные значения сил и расходно-скоростных параметров для цилиндрической форсунки 5 мм представлены в таблице. Скорость потока на входе в форсунку изменяется незначительно при росте давления (в диапазоне 301,86–304,04 м/с), что объясняется газодинамикой потока при фиксированном диаметре сопла; объемный расход остается стабильным (≈354–356 л/мин), что важно для энергетической оценки работы компрессора и прогнозирования нагрузки при импульсной подаче.

Результаты расчета характеристик форсунки

Давление, атм.	Проекция аэродинамических сил на ось *X*, Н	Проекция аэродинамических сил на ось *Y*, Н	Скорость потока воздуха на входе в форсунку, м/с	Расход, м³/с	Расход, л/мин
4	4,26	10,90	301,86	0,005 897	353,85
5	5,20	13,52	302,50	0,005 909	354,60
6	6,26	15,28	303,21	0,005 924	355,42
7	7,16	17,58	303,67	0,005 930	355,96
8	8,66	19,38	304,04	0,005 940	356,39

Даже при минимальном исследованном давлении (4 атм) система создает существенную поднимающую силу (≈11 Н), однако надежность отделения в реальных условиях будет зависеть от вариабельности клубней (масса, форма, шероховатость и т. д.) и от контактных сил с вальцами. Начиная с 6 атм сила по оси *Y* превышает ≈15 Н – этот уровень принят как практический порог надежного отделения, поскольку он существенно превышает удерживающие силы взаимодействия клубня с вальцами и тем самым обеспечивает реальную способность струи инициировать и поддерживать отрыв, а также достижим и устойчив в численных режимах (начиная с 6 атм) без экстремального увеличения давления или расхода, и дает разумный запас надежности против вариативности реальных условий и неопределенностей модели. Диапазон 7–8 атм обеспечивает дополнительный запас по усилию и устойчивость процесса, но сопровождается ростом ударного воздействия и энергозатрат. Для промышленного применения целесообразно ориентироваться на режим 6 атм с импульсной подачей короткой длительности (порядка 0,01–0,02 с), что обеспечивает требуемый импульс силы при минимальном расходе энергии.

Заключение

Выполненное моделирование в FlowVision дало целостное представление о взаимодействии сжатой воздушной струи с клубнем картофеля в зоне вальцово-подающего конвейера. Базовый вариант цилиндрической форсунки диаметром 5 мм, расположенной без смещения относительно оси клубня, обеспечивает симметричное обтекание, выраженное локальное давление и устойчивые уровни сил, достаточные для отделения клубня. По результатам серии расчетов оптимальным режимом можно считать диапазон давления 6–8 атм, где сила по оси *Y* составляет 15–19 Н, обеспечивая надежное отделение при умеренных расходах (~354–356 л/мин) и скоростях на входе ~302–304 м/с.

Авторы статьи выражают благодарность ООО «ТЕСИС» за предоставленную лицензию на программный комплекс FlowVision и оказанную помощь в проведении данного исследования.

Список использованных источников

1. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа : учеб. пособие / Т. В. Кондранин, Б. К. Ткаченко, М. В. Березникова [и др.]. – М. : МФТИ, 2005. – 104 с.

УДК 631.362.3

Поступила в редакцию 04.02.2026
Received 04.02.2026

М. И. Курилович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВАЛЬЦОВ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО ВРАЩЕНИЯ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ В ОПТИЧЕСКИХ СОРТИРОВОЧНЫХ МАШИНАХ

Аннотация. В статье предложена геометрическая модель рабочей поверхности вальцов для транспортировки и вращения клубней картофеля, основанная на аппроксимации формы клубня эллипсоидом вращения. Показано, что при использовании цилиндрических вальцов контакт ограничен одной точкой, что приводит к неустойчивому и хаотичному вращению, затрудняющему оптическую оценку поверхности. Для повышения устойчивости и увеличения площади контакта предлагается форма вальцов в виде однополостного гиперболоида вращения. Разработаны аналитические соотношения, описывающие пересечение эллипсоида и гиперболоида, и выведено уравнение кривой соприкосновения, учитывающее геометрические параметры клубня. Полученная модель обеспечивает увеличенную зону контакта, устойчивое вращение без проскальзывания и пригодна для практической реализации в конструкциях вальцов.

Ключевые слова: картофель, клубень, оптическая сортировка, подающее устройство, вальцы, гиперболоид вращения, эллипсоид вращения, устойчивое вращение.

M. I. Kurylovich

RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru

JUSTIFICATION OF ROLLER GEOMETRY FOR STABLE ROTATION OF POTATO TUBERS IN OPTICAL SORTING MACHINES

Abstract. This paper proposes a geometric model of the working surface of potato tuber rollers used for transporting and rotating tubers, based on approximating the tuber shape with an ellipsoid of revolution. It is shown that when using cylindrical rollers, contact is limited to a single point, leading to unstable and chaotic rotation, complicating optical surface assessment. To improve stability and increase the contact area, a single-sheet hyperboloid of revolution roller shape is proposed. Analytical relationships are developed describing the intersection of the ellipsoid and hyperboloid, and an equation for the contact curve is derived, taking into account the geometric parameters of the tuber. The resulting model ensures an increased contact zone, stable rotation without slippage, and is suitable for practical implementation in roller designs.

Keywords: potato, tuber, optical sorting, feeding device, rollers, hyperboloid of revolution, ellipsoid of revolution, stable rotation.

Введение

Современные системы оптической сортировки картофеля требуют получения стабильных и информативных изображений клубней со всех сторон. Качество распознавания напрямую зависит от того, насколько равномерно и предсказуемо клубень вращается в зоне съемки. Если движение нестабильно, а ориентация меняется хаотично, камера фиксирует лишь часть поверхности, что снижает точность классификации и делает невозможным выявление дефектов по всей площади клубня.

Поэтому ключевой задачей при проектировании сортировочных линий становится создание подающего устройства, которое не только транспортирует клубни в зону распознавания, но и обеспечивает их контролируемое вращение. Для этого необходимо, чтобы клубень находился в устой-

чивом положении и не проскальзывал относительно рабочей поверхности. Именно форма вальцов определяет характер контакта и, следовательно, качество вращения.

Исследования показывают, что цилиндрические вальцы обеспечивают лишь точечный контакт с клубнем, который по морфологии близок к эллипсоиду вращения. Такое взаимодействие приводит к неустойчивому положению и непредсказуемому поведению клубня. Чтобы добиться устойчивого вращения требуется поверхность, способная охватывать клубень по более широкой зоне и обеспечивать несколько точек опоры. Это приводит к необходимости обоснования геометрии вальцовой поверхности, которая будет согласована с формой клубня и обеспечит его надежное вращение без проскальзывания.

Основная часть

Так как основное назначение вальцовой поверхности в перемещении и одновременном вращении клубней картофеля различной формы и размеров, то было бы правильным выбрать такую форму поверхности вальцов, которая бы учитывала многообразие размерных характеристик клубней картофеля.

Для обоснования геометрии вальцов принимается, что форма клубня соответствует эллипсоиду вращения. Это допущение основано на морфологических особенностях картофеля, характерных для большинства сортов, где клубень представляет собой тело, приближенное к вытянутому или сплюснутому эллипсоиду [1, 2].

Упрощение формы клубня до эллипсоида вращения необходимо для обеспечения математической строгости и удобства при расчетах, связанных с проектированием рабочей поверхности вальцов. Такая геометрическая модель позволяет использовать аналитические выражения для описания контакта, давления и траектории движения клубня, что значительно упрощает моделирование процессов отделения и транспортировки. Благодаря регулярной структуре эллипсоида, допустимо применять методы классической механики и геометрии, избегая сложных численных приближений, что повышает точность и эффективность инженерных решений (рисунок 1).

Таким образом, принятие формы эллипсоида вращения как базовой модели клубня картофеля позволяет рационально спроектировать конструкцию вальцов.

Если клубень картофеля расположить между двумя цилиндрическими вальцами, то каждой поверхности вальцов клубень будет касаться в одной точке (рисунок 2).

При вращении вальцов клубень стремится занять положение, при котором его большая ось «симметрии» располагается параллельно осям вращения вальцов. Однако при цилиндрической форме вальцов площадь контакта оказывается минимальной – фактически точечной. В результате клубень находится в неустойчивом положении и вращается хаотично, что делает невозможной качественную оптическую оценку его поверхности.

Устойчивое вращение клубня может быть обеспечено только при наличии нескольких точек соприкосновения с рабочей поверхностью. Для этого необходимо, чтобы геометрия вальцов обеспечивала охват клубня и формировала более широкую зону контакта, позволяя надежно ориентировать его большую ось параллельно осям вращения (рисунок 3).

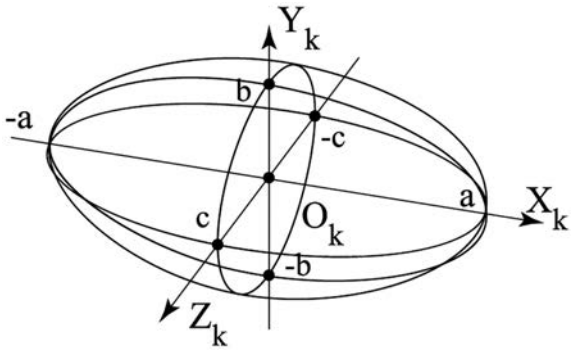


Рисунок 1 – Эллипсоидная форма клубня картофеля

Для согласования теоретической геометрической модели с реальными размерами клубней была выполнена эмпирическая оценка общей длины их поверхности. С этой целью несколько типичных продовольственных клубней разрезали вдоль продольной оси (рисунок 4), после чего полученные срезы прикладывали к миллиметровой бумаге. Контуры одной стороны каждого клубня обводились и последовательно накладывались друг на друга, что позволило сформировать свод-

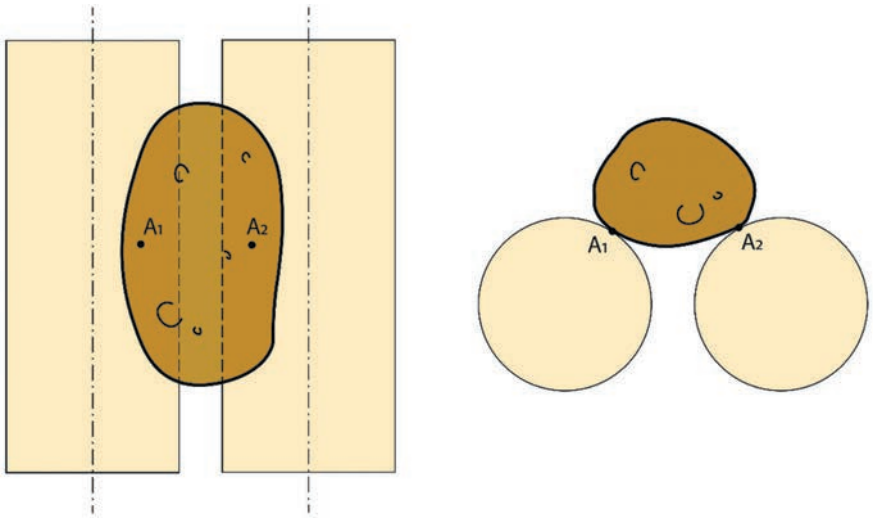


Рисунок 2 – Размещение клубня картофеля на поверхности цилиндрических вальцов

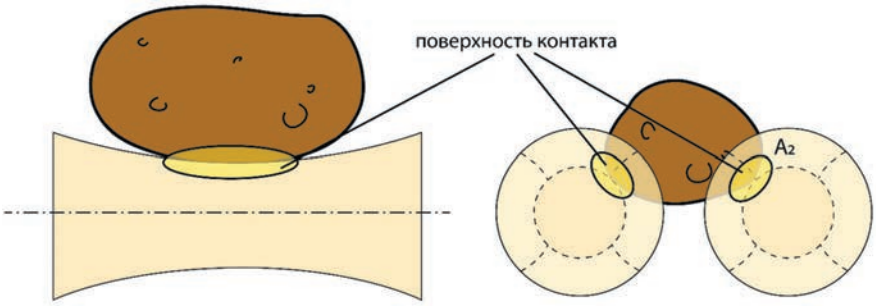


Рисунок 3 – Размещение клубня картофеля на поверхности гиперболоидных вальцов

ную кривую, отражающую характерные особенности продольного профиля клубней. На основе совмещенных контуров была определена средняя длина поверхности, характерная для большинства исследованных образцов (рисунок 5).

Полученная эмпирическая кривая стала основой для уточнения параметров теоретической модели и позволила адаптировать геометрию рабочей поверхности вальца к фактическим размерам клубней. Сопоставление экспериментальных данных с аналитическими выражениями показало, что для обеспечения достаточной площади контакта и устойчивого вращения клубня наиболее рациональной формой вальца является однополостный гиперболоид вращения (рисунок 6). Такая поверхность обеспечивает охват клубня по широкой зоне, формирует несколько



Рисунок 4 – Данные для определения общей кривой

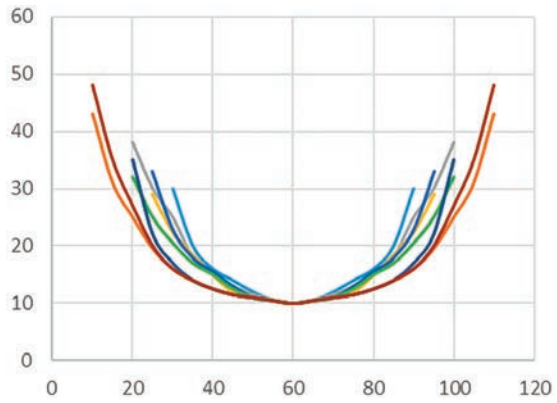


Рисунок 5 – График общей кривой поверхности клубней

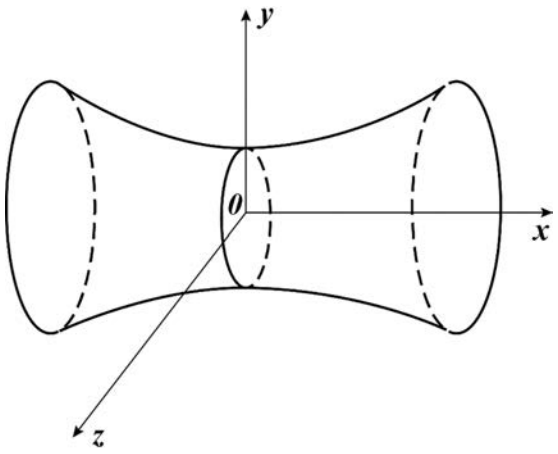


Рисунок 6 – Однополостный гиперболоид вращения

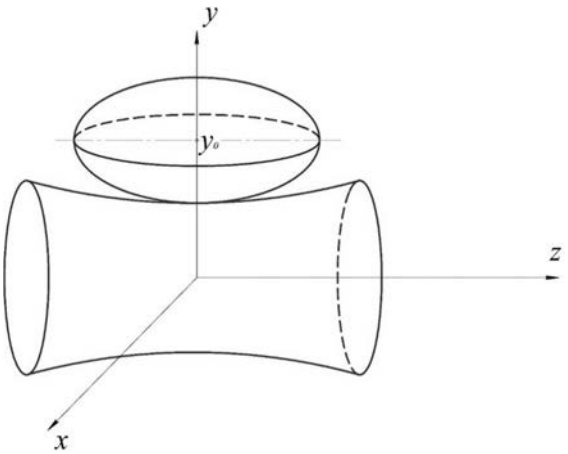


Рисунок 7 – Схема соприкосновения эллипсоида и гиперболоида в пространстве

точек опоры и тем самым создает условия для надежного вращения без проскальзывания в зоне распознавания.

Такой выбор обусловлен следующими факторами:

– геометрическая совместимость (гиперболоид вращения обладает вогнутой поверхностью, способной охватывать эллипсоид по широкой зоне);

– технологическая эффективность (увеличенная площадь контакта способствует устойчивому положению клубня и способствует вращению без проскальзывания);

– конструктивная реализация (однополосный гиперболоид легко реализуется в механической обработке и допускает параметрическую настройку).

Для дальнейшего проектирования необходимо вывести уравнение кривой поверхности вальца, которое будет учитывать геометрию клубня. Поверхность гиперболоида в некоторой прямоугольной системе координат определяется уравнением

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1, \tag{1}$$

где a и b – действительные полуоси, c – мнимая полуось.

Каноническое уравнение эллипсоида в декартовых координатах (рисунок 7)

$$\frac{x^2}{a_1^2}+\frac{(y-y_0)^2}{b_1^2}+\frac{z^2}{c_1^2}=1. \tag{2}$$

При $x = 0$ уравнения (1), (2) принимают вид (3), (4) соответственно:

$$\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}=1, \tag{3}$$

$$\frac{(y-y_0)^2}{b_1^2}+\frac{z^2}{c_1^2}=1. \tag{4}$$

Схема соприкосновения эллипса и гиперболы на плоскости представлена на рисунке 8.

Точка пересечения эллипса и гиперболы опишется следующим уравнением:

$$\begin{cases}\dfrac{y^2}{b^2}-\dfrac{z^2}{c^2}=1\\ \dfrac{(y-y_0)^2}{b_1^2}+\dfrac{z^2}{c_1^2}=1\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\dfrac{z^2}{c^2}=\dfrac{y^2}{b^2}-1\\ \dfrac{(y-y_0)^2}{b_1^2}+\dfrac{z^2}{c_1^2}=1\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}z^2=\dfrac{c^2}{b^2}y^2-c^2\\ \dfrac{(y-y_0)^2}{b_1^2}+\dfrac{\dfrac{c^2}{b^2}y^2-c^2}{c_1^2}=1\end{cases}. \tag{5}$$

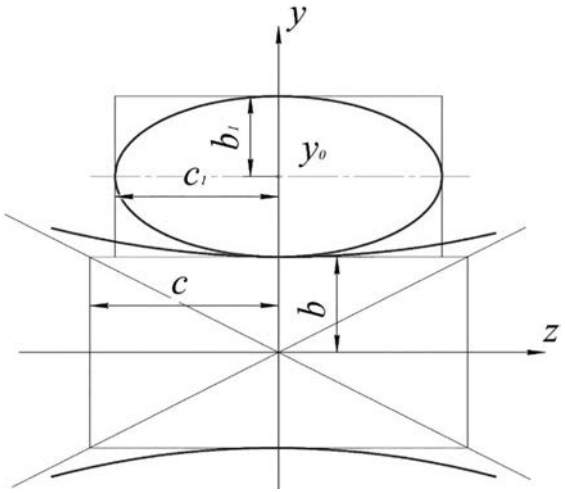


Рисунок 8 – Схема соприкосновения эллипса и гиперболы на плоскости

Тогда

$$y = b\sqrt{\frac{2c_1^2 y_0 - y_0^2 c_1^2 + c^2 b_1^2 + b_1^2 c_1^2}{c_1^2 b^2 + b_1^2 c^2}}. \tag{6}$$

Также можно определить кривую касания эллипсоида и гиперболы

$$\begin{cases} \dfrac{x^2}{a^2} + \dfrac{y^2}{b^2} - \dfrac{z^2}{c^2} = 1 \\ \dfrac{x^2}{a_1^2} + \dfrac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \dfrac{z^2}{c_1^2} = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 = a^2 - \dfrac{a^2}{b^2} y^2 + \dfrac{a^2}{c^2} z^2 \\ \dfrac{a^2 - \dfrac{a^2}{b^2} y^2 + \dfrac{a^2}{c^2} z^2}{a_1^2} + \dfrac{(y - b - b_1)^2}{b_1^2} + \dfrac{z^2}{c_1^2} = 1 \end{cases}. \tag{7}$$

Отсюда уравнение кривой гиперболоида вращения опишется следующим образом:

$$\frac{(y - b - b_1)^2}{b_1^2} - \frac{a^2}{b^2 a_1^2} y^2 + z^2 \left(\frac{1}{c^2} + \frac{a^2}{a_1^2 c^2} \right) = 1 - \frac{a^2}{a_1^2}. \tag{8}$$

Данное уравнение кривой гиперболоида вращения позволяет определить оптимальную форму поверхности, обеспечивающую максимальный охват клубня вальцами.

Заключение

В результате исследования установлено, что переход от цилиндрической к гиперболоидной форме вальцов существенно увеличивает площадь контакта с клубнем и обеспечивает более устойчивое и предсказуемое вращение. Выведенные аналитические выражения для пересечения эллипсоида и гиперболоида позволяют параметрически настроить профиль вальца под типичные размеры клубней.

Практическая реализация однополостного гиперболоида вращения технически осуществима и обеспечивает преимущества в технологических процессах сортировки и оптического контроля: уменьшение проскальзывания, стабильная ориентация большой оси клубня и улучшение качества съемки.

Список использованных источников

1. Павлов, А. Е. Калибровка клубней картофеля / А. Е. Павлов, Л. А. Павлова // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2017. – № 3. – С. 15–19.

2. Волосевич, П. Н. Геометрическая интерпретация формы и размерно-массовые характеристики клубней картофеля как объекта калибрования / П. Н. Волосевич // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2008. – № 1. – С. 70–73.

УДК 631.333–189.2

Поступила в редакцию 20.12.2025
Received 20.12.2025

А. А. Жешко[1], В. В. Голдыбан[1], С. Л. Герасюто[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com
[2]ООО «Робототехника и облачные технологии»
г. Минск, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВНЕСЕНИЯ ТВЕРДЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМОЙ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности построения имитационной модели процесса внесения твердых минеральных удобрений, представлена динамическая, поэлементная схема модуля для внесения удобрений и схема роботизированной платформы.

Ключевые слова: минеральные удобрения, роботизированная платформа, штанговые рабочие органы, движение по междурядьям.

A. A. Zheshka[1], V. V. Haldyban[1], S. L. Herasiuta[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus of Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com
[2]LLC "Robotics and cloud Technologies"
Minsk, Republic of Belarus

FEATURES OF BUILDING A SIMULATION MODEL OF THE PROCESS OF APPLYING SOLID MINERAL FERTILIZERS BY A ROBOTIC PLATFORM

Abstract. The article discusses the features of building a simulation model of the process of applying solid mineral fertilizers, presents a dynamic and piecemeal scheme of a module for applying fertilizers and a scheme of a robotic platform.

Keywords: mineral fertilizers, a robotic platform, rod-type working bodies, row-by-row movement.

Введение

Решение задач роботизации и интеллектуализации технологических процессов применения удобрений и химических средств защиты растений приобретает в настоящее время особую значимость. Причиной тому можно считать доступность и сравнительную простоту «вхождения» в программирование современных микроконтроллеров, что стало возможным ввиду широкой популяризации программно-аппаратных средств для прототипирования моделей и систем. Учитывая, что выполнение процессов по внесению средств химизации в обозримом будущем станет возможным переложить на роботизированную технику, в работах широкого круга исследователей наблюдается интерес к поиску наиболее перспективных технических решений в данной сфере [1, 2, 3]. Это направление научных исследований следует считать перспективным, поскольку в настоящее время наблюдается дефицит операторов сельскохозяйственной техники, что требует поиска путей выполнения части механизированных работ за счет комплекса роботизированных технических средств. Для снижения расходов на выполнение механизированных работ роботизированными платформами целесообразно стремиться к использованию их групп для проведения конкретных сельскохозяйственных операций, где один из элементов группы является ведущим и оснащается наиболее дорогостоящим оборудованием для реализации автономного дви-

жения, а другие элементы являются ведомыми и реализованы с использованием более простой программно-аппаратной части.

В настоящей работе представлен краткий обзор существующих роботизированных технических средств, в общем виде представлена поэлементная схема, динамическая и имитационная модель роботизированного разбрасывателя минеральных удобрений.

Основная часть

В настоящее время роботизированные платформы разрабатываются по модульному принципу. Модуль для внесения удобрений как правило монтируется непосредственно на платформе (рисунки 1, *а* и рисунок 2). Также существуют технические решения, в которых модуль прицепного или полуприцепного типа агрегатируется с универсальным роботизированным техническим средством (рисунок 1, *б*).

Организация движения роботизированных платформ по рабочему участку, как правило, базируется на методе одновременной локализации и картирования (SLAM). Для этих целей применяются лазерные сканеры, стереокамеры, инфракрасные и ультразвуковые датчики, одометры, электронные компасы и гироскопы, модули GPS/ГЛОНАСС/BeiDou и другие средства. Принципы, на которых строятся алгоритмы перемещения по рабочему участку, зависят от особенностей выполняемой технологической операции. Например, при обработке междурядий пропашных культур основным критерием, который влияет на выбор алгоритма перемещения робота, является перемещение движителя по междурядьям так, чтобы исключить травмирование культурных растений. Навигационными ориентирами при этом могут служить облака точек культурных растений, зарегистрированных с помощью LiDAR или стереокамеры, между которыми пристраивается траектория движения.



а *б*

Рисунок 1 – Роботизированные платформы для внесения твердых минеральных удобрений



Рисунок 2 – Роботизированная платформа для внесения химических средств защиты растений и жидких минеральных удобрений

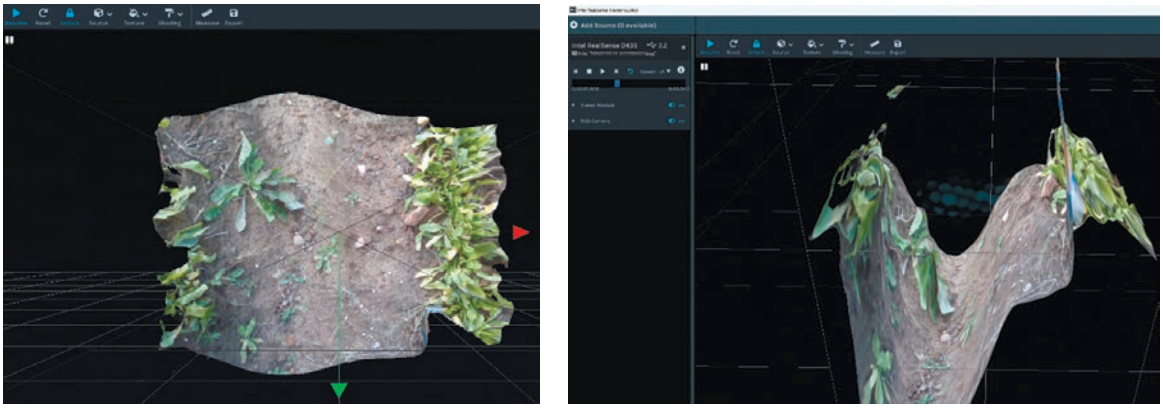


Рисунок 3 – Визуализация результатов тестирования стереокамеры в программе RealSense Viewer

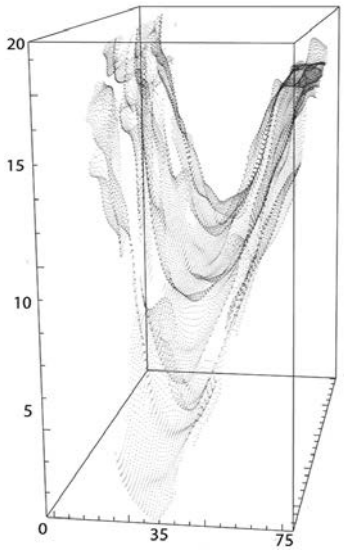


Рисунок 4 – Трехмерная интерпретация облака точек междурядья

Реализация алгоритма движения при обработке пропашных культур осложняется наличием в междурядьях сорных растений. Для повышения точности построения маршрута целесообразно совместно с лазерным сканером использовать стереокамеру, например, RealSense. Далее, путем комплексирования данных облаков точек, – корректировать траекторию движения робота. Результаты тестирования работы камеры RealSense, установленной на роботизированной платформе, записывались в файлы с расширением bag. Такой формат используется для передачи сообщений ROS (Robot Operating System) и в данном случае применяется для записи и хранения данных со стереокамеры, последующей визуализации и математической обработки.

На рисунке 3 представлена визуализация результатов тестирования стереокамеры в программе RealSense Viewer.

Результаты математической обработки представлены на рисунке 4 в виде трехмерной интерпретации облака точек междурядья. Для получения уравнения, аппроксимирующего геометрическую форму междурядья, использовали модель линейной регрессии вида:

```
lm = LinearModelFit[data, (x^# & /@ Range[0, 3]) ~Join~ (y^# & /@ Range[1, 6]), {x, y}],
     модель линейной регрессии   диапазон   соединить   диапазон
```

где `x^# & /@ Range[0, 3]` и `(y^# & /@ Range[1, 6])` – диапазоны, в которых производится аппроксимация, таким образом, поиск подходящей функции необходимо осуществлять в виде полинома шестой степени, тогда

$$z = -3{,}17 + 1{,}67x + 2{,}0x^2 - 1{,}73x^3 + 0{,}23y + 0{,}12y^2 + 0{,}08y^3 - 0{,}072y^4 - 0{,}02y^5 + 0{,}002y^6.$$

На рисунке 5 представлена поэлементная схема модуля для внесения удобрений к роботизированной платформе в наиболее общем виде. Модуль для внесения удобрений всегда имеет накопительную емкость, которая, в зависимости от агрегатного состояния удобрений, может представлять собой бак для жидкости либо кузов для сыпучих видов удобрений. Основными характеристиками накопительных емкостей являются геометрические параметры и вместительность.

Также важнейшим элементом модуля удобрений выступает дозатор, который предназначен для регулируемой подачи потока жидких либо твердых минеральных удобрений к рабочим органам.

Вспомогательными элементами являются сводообрушители и побудители, которые сводят к минимуму зависание и сводообразование в накопительных емкостях, застой сыпучего мате-



Рисунок 5 – Поэлементная схема модуля для внесения удобрений

риала в «мертвых» зонах. Также довольно важным конструктивным элементом является подающее устройство. Распределяющее устройство для сыпучих видов удобрений представляет собой центробежный диск или штанговый шнековый распределитель. Для жидких удобрений для этих целей применяют штанги с установленными на них форсунками.

Динамическая схема модуля для внесения удобрений представлена на рисунке 6.

В соответствии со схемой, представленной на рисунке 6, модуль для внесения минеральных удобрений в нормальных условиях эксплуатации представляет собой динамическую систему, которая функционирует в условиях постоянно изменяющихся внешних воздействий. В вероятностно-статистическом смысле внешние факторы, оказывающие влияние на технологические, энергетические и прочностные характеристики, являются случайными величинами.

Для того чтобы выявить взаимосвязь входных и выходных переменных, а также определить характер их протекания необходимо составить расчетную схему. Внешними воздействиями являются внешние управляющие воздействия и возмущения, например, силы и их моменты, ускорения и перемещения. Эти составляющие приложены к различным точкам платформы и вызваны такими факторами как сопротивление почвы $Z(t)$, сопротивление перекатыванию $\Psi(t)$, колебания от роботизированной платформы $\zeta(t)$, физико-механические свойства удобрений $R(t)$.

Выходными являются параметры, определяющие энергетические характеристики $E(t)$, качественные показатели работы $V(t)$ и производительность роботизированной платформы $W(t)$.

Представим производительность роботизированной платформы W_{rzb} как функцию от ширины захвата B_{rzb}, грузоподъемности Q_{rzb} и рабочей скорости движения υ_{rzb}, т. е. $W_{rzb} = f(B_{rzb}, Q_{rzb}, \upsilon_{rzb})$. Для этого выразим аналитически коэффициент использования времени смены τ_{udb}, который определяется как отношение времени основной работы по внесению удобрений t_{rbt} к действительному времени смены t_{dsm}, т. е. $\tau = t_{rbt} / t_{dsm}$.

Чистое время работы равно времени, затрачиваемому на внесение удобрений. Так, если объем бункера модуля для внесения удобрений обозначить как V_{rzb}, то при внесении минеральных удобрений плотностью γ_{udb} время t_{rzb} на внесение удобрений определится как

$$t_{rzb} = \frac{\gamma_{udb} V_{rzb}}{q_{udb}} = \frac{Q_{rzb}}{q_{udb}}, \quad (1)$$

где t_{rzb} – время, затрачиваемое на внесение удобрений за одну загрузку, ч; V_{rzb} – объем бункера, м^3; γ_{udb} – плотность минеральных удобрений, кг/м^3; q_{udb} – часовой расход удобрений, кг/ч; Q_{rzb} – грузоподъемность модуля для внесения удобрений, кг.

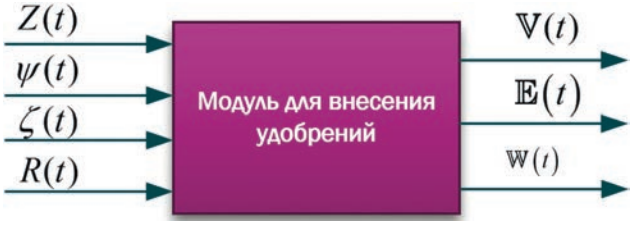


Рисунок 6 – Динамическая схема модуля для внесения удобрений

Учитывая, что расход удобрений в единицу времени (кг/ч) определяется как

$$q_{udb} = \frac{B_{rzb} H_{udb} \upsilon_{rzb}}{10}, \tag{2}$$

где B_{rzb} ширина захвата, м; H_{udb} – норма внесения минеральных удобрений, кг/га; υ_{rzb} – рабочая скорость движения, км/ч, формула для определения времени на внесение удобрений за одну загрузку примет следующий вид:

$$t_{rzb} = \frac{10\gamma_{udb} V_{rzb}}{B_{rzb} H_{udb} \upsilon_{rzb}} = \frac{10 Q_{rzb}}{B_{rzb} H_{udb} \upsilon_{rzb}} = \sum_{i=1}^{n_{crz}} t_{rzbi}, \tag{3}$$

где n_{crz} – количество циклов разбрасывания удобрений на рабочем участке.

Для определения количества циклов запишем

$$n_{crz} = \frac{10^4 Q_{rzb}}{B_{rzb} H_{udb} L_{gon}}, \tag{4}$$

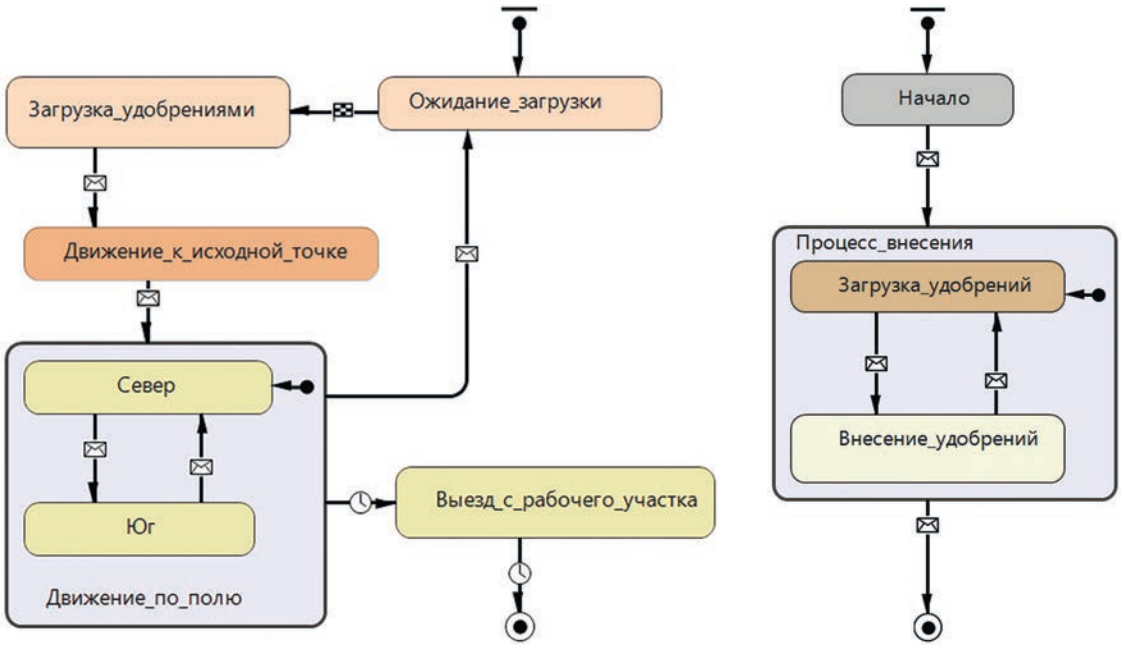
где L_{gon} – средняя длина гона рабочего участка, м; t_{rzbi} – время на выполнение i-го хода на рабочем участке, которое можно определить по формуле

$$\sum_{i=1}^{n_{crz}} t_{rzbi} = \sum_{i=1}^{n_{crz}} \frac{60 L_{gon}}{10^3 \upsilon_{rzb}} = \frac{3}{50} \sum_{i=1}^{crz} \frac{L_{gon}}{\upsilon_{rzb}}. \tag{5}$$

Для нахождения массы навески удобрений, внесенной за 1 рабочий ход Q_{rzbi}, запишем

$$Q_{rzbi} = \frac{1}{10^4} B_{rzb} H_{udb} L_{gon}. \tag{6}$$

Формулы (1) – (6) использованы для вычисления параметров имитационного моделирования процесса внесения минеральных удобрений роботизированной платформой. Диаграммы состояния движения платформы и состояния потока удобрений в кузове представлены на рисунке 7.



а *б*

Рисунок 7 – Элементы имитационной модели процесса прямоточного внесения удобрений:
а – диаграмма состояния движения разбрасывателя; *б* – диаграмма состояния потока удобрений в кузове

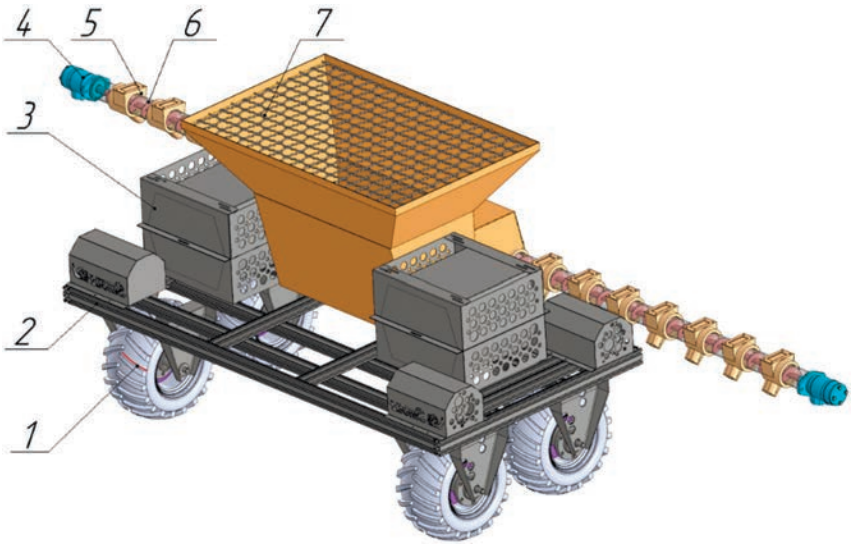


Рисунок 8 – Схема роботизированной платформы с модулем для внесения удобрений:
1 – колесный ход; *2* – рама; *3* – осеки для аккумуляторных батарей; *4* – электродвигатели; *5* – дозаторы;
6 – штанговые рабочие органы; *7* – бункер

Как видно из рисунка 7*, а*, в начале работы в бункер машины загружают удобрения, платформа перемещается в исходную точку на рабочем участке, после чего осуществляются челночные рабочие ходы. В момент опорожнения бункера платформа приостанавливается и осуществляется ее дозагрузка удобрениями непосредственно на рабочем участке. Для контроля уровня удобрений в бункере осуществляется обработка событий диаграммы состояния потока удобрений, представленной на рисунке 7, *б*. По завершению обработки осуществляется выезд с рабочего участка.

Роботизированная платформа с оборудованием для внесения твердых минеральных удобрений состоит из колесного хода *1*, рамы *2*, отсеков для аккумуляторных батарей *3*, электродвигателей для привода шнеков *4*, дозаторов *5,* штанговых рабочих органов *6* и бункера *7* (рисунок 8).

Заключение

Роботизированная платформа является универсальным средством для выполнения различных технологических операций в растениеводстве. Для внесения твердых минеральных удобрений на платформу монтируется модуль, который состоит из штанговых распределяющих рабочих органов и бункера. Для внесения жидких минеральных удобрений или пестицидов на платформу монтируется модуль, состоящий из бака и штанг с форсунками.

Список использованных источников

1. The design of general purpose autonomous agricultural mobile-robot: Agrobot in Agro-Geoinformatics (Agro-geoinformatics) / H. Durmus, E. O. Gunes, M. Krc, B. B. Ustundag // Fourth International Conference on July, 2015. – P. 49–53.

2. Greenhouse partner robot system in Robotics (ISR) / K. Kashiwazaki, Y. Sugahara, J. Iwasaki [et al.] // International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), June 2010. – P. 1–8.

3. Amer, G. Design and operation of Wi-Fi agribot integrated system: in Industrial Instrumentation and Control (ICIC) / G. Amer, S. M. M. Mudassir, M. A. Malik // International Conference on, May 2015. – P. 207–212.

УДК 631.333 –189.2

Поступила в редакцию 12.08.2025
Received 12.08.2025

В. В. Азаренко[1], А. А. Жешко[2], Д. Н. Бондаренко[3], П. П. Бегун[2]

[1]Президиум Национальной академии наук Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com
[3]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности определения аэродинамических свойств твердых минеральных удобрений для последующего моделирования процесса их внесения методом дискретных элементов.

Ключевые слова: минеральные удобрения, аэродинамические свойства, метод дискретных элементов, вычислительная гидродинамика.

V. V. Azarenka[1], A. A. Zheshka[2], D. N. Bondarenka[3], P. P. Behun[2]

[1]Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus of Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com
[3]UE "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus

RESULTS OF THE STUDY OF AERODYNAMIC PROPERTIES OF SOLID MINERAL FERTILIZERS

Abstract. The article discusses the features of determining the aerodynamic properties of solid mineral fertilizers for subsequent modeling of the process of their application using the discrete element method.

Keywords: mineral fertilizers, aerodynamic properties, discrete element method, computational fluid dynamics.

Введение

В процессе выполнения технологических операций рабочие и вспомогательные органы машин химизации взаимодействуют с удобрениями различного вида и гранулометрического состава и от их свойств во многом зависит правильность выбора параметров, закладываемых на стадиях проектирования, и настроек машин в процессе эксплуатации.

Свойства минеральных удобрений можно разделить на группы согласно схеме, представленной на рисунке 1. Необходимо отметить, что большинство свойств взаимосвязаны и могут изменяться в довольно широких пределах, что может приводить к неточным настройками машин химизации земледелия и, как следствие, снижению качества распределения удобрений по площади поля.

Заводами Республики Беларусь, а также стран СНГ совершенствуются технологии и осваивается производство новых форм минеральных удобрений. Например, ОАО «Гомельский химический завод» производит более десятка наименований твердых и жидких минеральных удобрений [1], ОАО «Гродно Азот» – несколько сортов карбамида, сульфат аммония и другие удобрения [2], ОАО «Беларуськалий» – десяток разновидностей калийных удобрений и тукосмесей [3].



Рисунок 1 – Классификация свойств минеральных удобрений

Кроме того, совершенствование конструктивно-кинематических свойств рабочих машин для внесения минеральных удобрений, а также конструкционных материалов для их изготовления требуют уточнения физико-механических свойств. Знание свойств удобрений также необходимо для оценки адекватности моделей, построенных методом дискретных элементов.

В соответствии с рисунком 1 свойства минеральных удобрений можно разделить на агрохимические, технологические и физико-механические. Агрохимические свойства позволяют охарактеризовать содержание питательных элементов и растворимость минеральных удобрений в почве. Технологические свойства описывают состояние удобрений в процессе их транспортирования и длительного хранения, например, такие показатели, как слеживаемость и сыпучесть. К физическим свойствам относятся влажность и гигроскопичность, плотность и пористость.

Большую группу представляют механические свойства минеральных удобрений. Прежде всего это подгруппа фрикционных свойств, которые описываются коэффициентами внешнего и внутреннего трения, сопротивления удобрений сдвигу, углам естественного откоса и обрушения. Подгруппа прочностных свойств представлена сопротивлением сжатию, разрыву, резанию. Фракционные свойства характеризуют гранулометрический состав удобрений, а аэродинамические описывают процесс взаимодействия удобрений с воздушной средой во время их рассеивания распределяющими рабочими органами.

Большинство из показателей группы физико-механических свойств в отдельности и в совокупности влияют на адекватность результатов (правильность) моделирования методом дискретных элементов (DEM) для обоснования параметров машин для внесения твердых минеральных удобрений, а также на правильность моделирования методом вычислительной гидродинамики (CFD) при поиске оптимальных конструктивных схем машин для внутрипочвенного и поверхностного внесения жидких минеральных удобрений. В этой связи определенный научный интерес представляет уточнение физико-механических свойств производимых в настоящее время твердых минеральных удобрений и сопоставление полученных данных с моделями, построенными методом дискретных элементов. Данный подход использовали в своих научных работах многие ученые, например, M. Ucgul, S. Yinyana, M. R. Arturo, Z. E. Ismail, M. M. Ibrahim, P. Angel, B. E. Kassem [4–10].

В настоящей статье рассмотрены особенности определения аэродинамических свойств твердых минеральных удобрений для последующего моделирования процесса их внесения методом дискретных элементов.

Основная часть

При движении частиц удобрений, перемещаемых воздушным потоком, создаваемым пневматическими устройствами, а также при высеве их рабочими органами как центробежного, так и штангового типов присутствует фаза свободного их движения в воздушном потоке. В этой связи исследование величины сопротивления различных видов минеральных удобрений движению

в воздушной среде является актуальной задачей при решении вопросов равномерного распределения удобрений по поверхности поля, в том числе обоснования рациональной конструкции ветрозащитных устройств, а также при совершенствовании существующих методик оценки качества функционирования машин химизации земледелия.

Ввиду того, что минеральные удобрения являются плохообтекаемыми телами, во время их движения в воздушном потоке возникают завихрения возле их поверхности, которые приводят к возникновению дополнительной силы сопротивления. Для частиц небольшого размера при их медленном движении в вязкой жидкости сопротивление можно определить по формуле Джорджа Стокса.

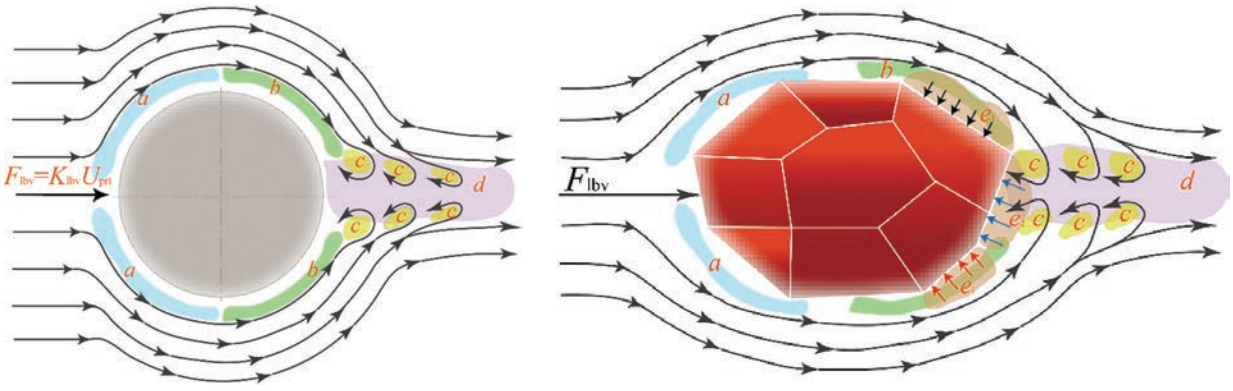
В случае определения сопротивления воздушной среды для частиц, по размерам сопоставимым с минеральными удобрениями, целесообразно использовать формулу, предложенную Н. Е. Жуковским. Для определения силы сопротивления воздушной среды необходимо знать площадь проекции частицы минеральных удобрений на плоскость, которая перпендикулярна направлению вектора ее скорости. Кроме того, необходимо вычислить величину коэффициента лобового сопротивления. Значения данных переменных могут изменяться под воздействием целого ряда факторов, в этой связи аналитический их учет затруднителен.

Схема движения частиц минеральных удобрений в горизонтальном воздушном потоке представлена на рисунке 2. Для частиц сферической формы, таких как суперфосфат двойной, карбамид и аммиачная селитра, характерно образование зоны *a* встречи частицы с воздушным потоком и его отсоединения *b*, а также зон вихрей в кормовой части *c*, зона развития вихрей *d*. При этом на частицу в форме пространственного многогранника дополнительно действуют силы, приводящие к ее вращению (зона *e*).

Ввиду того что геометрические размеры большинства современных твердых минеральных удобрений изменяются в пределах от 1 до 6 мм, вычисление коэффициента сопротивления возможно лишь относительно некоторых групп, сформированных по гранулометрическому составу. По этой причине для характеристики сопротивления минеральных удобрений воздушному потоку целесообразно использовать среднее значение коэффициента парусности $K_{par.}$

Для определения скорости витания частиц в вертикальном воздушном потоке U_{krt} и коэффициента парусности K_{par} использовался парусный классификатор кафедры сельскохозяйственных машин УО «БГАТУ» [11, с. 152–161], схема которого представлена на рисунке 3.

В соответствии с рисунком 3 классификатор состоит из электродвигателя *1*, насадки всасывающей *2*, затвора *3*, обечайки *4*, конического отстойника *5,* фильтра *6*, трубопровода *7*, трубы вертикальной *8*, заслонки *9* и вентилятора *10*. Электродвигатель *1* приводит во вращение вентилятор *10*. Частота вращения вентилятора *10* регулируется посредством клиноременного вариатора, тем самым изменяется скорость воздушного потока в рабочем контуре классификатора. Дополнительной регулировкой является перекрытие трубопровода *7* воздушного канала заслонкой *9*. Для определения положения заслонки *9* в конструкции классификатора предусмотрен указатель.



а *б*

Рисунок 2 – Схема движения частицы удобрений в горизонтальном воздушном потоке:
а – сферическая форма частиц (суперфосфат, карбамид, аммиачная селитра);
б – пространственный многогранник (хлористый калий)

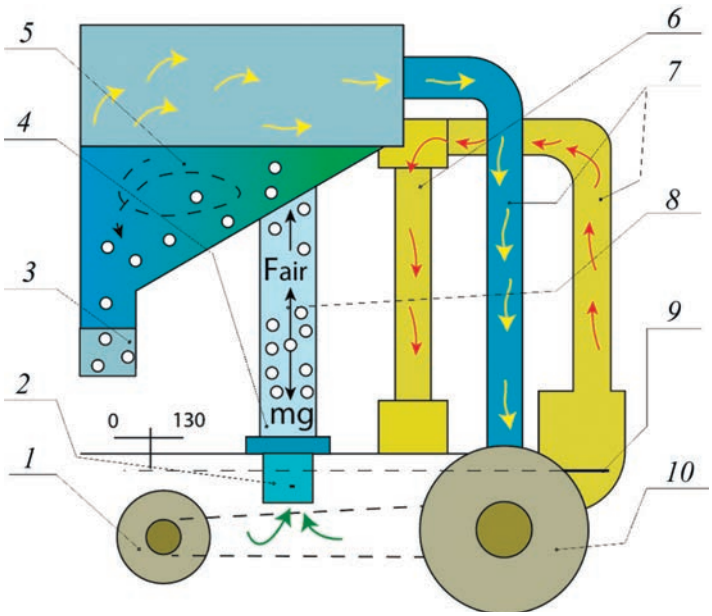


Рисунок 3 – Схема парусного классификатора: *1* – электродвигатель; *2* – насадка всасывающая; *3* – затвор; *4* – обечайка; *5* – отстойник конический; *6* – фильтр; *7* – трубопровод; *8* – труба вертикальная; *9* – заслонка; *10* – вентилятор

Исследуемый материал помещается в сетчатую обечайку *4* для исследования аэродинамических свойств. Далее в системе создается разряжение. Исследуемый материал поднимается по вертикальной трубе *8* и выносится воздушным потоком в конический отстойник *5*, после чего осаждается в стакан, расположенный над затвором *3*. Давление воздушного потока в контуре классификатора определяется посредством трубки Пито с гидростатическим манометром, что позволяет фиксировать полное и статическое давление в системе, а затем вычислять динамический напор как разность полного и статического напоров.

Перед началом исследований определяли гранулометрический состав порций удобрений (рисунок 4). Фракции удобрений (суперфосфат двойной, хлористый калий, аммиачная селитра и карбамид), отсортированные на группы с размером части у частиц 7–5; 5–4,5; 4,5–3,5; 3,5–3; 3–2; 2–1 мм (в зависимости от вида удобрений число групп составляло от 3 до 5), поочередно закладывались в сетчатую обечайку парусного классификатора. При этом масса одной навески составляла 60–80 г.



а *б* *в* *г*

Рисунок 4 – Лабораторные кюветы с пробами минеральных удобрений для исследования гранулометрического состава: *а* – карбамид; *б* – селитра аммиачная; *в* – суперфосфат двойной; *г* – хлористый калий

Также определяли положение нулевой отметки жидкости в трубке и выбирали необходимый масштаб шкалы путем изменения угла наклона трубки к горизонту. Далее устанавливали минимальное количество оборотов вентилятора при полностью закрытой заслонке *9* (рисунок 3), включали классификатор и путем увеличения оборотов вентилятора *10* с одновременным открытием заслонки *9* фиксировали момент начала выделения наиболее легких компонентов в размерной группе удобрений. Затем увеличивали скорость воздушного потока до полного выведения удобрений из вертикальной трубы *8* и определяли величину динамического напора.

Силу, действующую на частицу в вертикальном воздушном потоке, определим по формуле И. Ньютона

$$F_{air} = k_{lbv} S_{mds} \left(v_{prs} - \upsilon_{vzd} \right)^2, \tag{1}$$

где k_{1bv} – коэффициент лобового сопротивления частицы удобрений; S_{mds} – площадь проекции частицы минеральных удобрений на перпендикулярную направлению скорости $v_{prs} - \upsilon_{vzd}$ плоскость (миделево сечение), м²; v_{prs} – абсолютная скорость движения частицы, м/с; υ_{vzd} – абсолютная скорость движения воздушного потока, м/с.

Для определения критической скорости движения частицы в вертикальном воздушном потоке использовали выражение

$$U_{krt} = \frac{1}{10\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\gamma_{spt}}{\gamma_{vz}} H_{dnm} g \sin \alpha_{mmt}}, \tag{2}$$

где γ_{spt} – плотность спирта в трубке микроманометра, кг/м³; γ_{vzd} – плотность воздуха, кг/м³; H_{dnm} – динамический напор, мм; g – ускорение свободного падения, м/с²; α_{mmt} – угол наклона трубки микроманометра, град.

Для определения коэффициента парусности K_{par} (м$^{-1}$), из формулы (2), получим

$$K_{par} = \frac{g}{U_{krt}^2} = \frac{500 \gamma_{vzd} \csc \alpha_{mmt}}{H_{dnm} \gamma_{spt}}, \tag{3}$$

где $\csc \alpha_{mm}$ – косеканс угла α_{mm}.

Коэффициент лобового сопротивления k_{lbv}, входящий в формулу (1), зависит от режима движения частицы удобрений и ее формы. Во время своего движения частица совершает сложное поступательно-вращательное движение, что является следствием изменения миделевого сечения S_{mds}. В то же время форму тела и режим движения можно характеризовать числом Рейнольдса [12, с. 133].

$$R_e = \frac{\upsilon_{otn} d_{udb} \gamma_{vzd}}{g \mu_{vzd}}, \tag{4}$$

где υ_{otn} – относительная скорость движения частицы удобрений в воздушном потоке, м/с; d_{udb} – эквивалентный диаметр частицы удобрений, мм; μ_{vzd} – динамический коэффициент вязкости воздуха, кг·с/м².

Для частиц сферической формы С. И. Назаров [13, с. 90] получил следующую формулу для определения коэффициента лобового сопротивления:

$$k_{lbv} = \frac{2 g \gamma_{udb}}{3 \gamma_{vzd}} \frac{d_{udb}}{\upsilon_{otn}^2}, \tag{5}$$

где γ_{udb} – удельный вес частиц удобрений, кг/м³.

Для определения зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса воспользуемся выражением, полученным С. И. Назаровым [13, с. 90]

$$k_{lbv} = \frac{2 \gamma_{udb} \gamma_{vzd}}{3 g \mu_{vzd}^2} \frac{d_{udb}^3}{R_e^2}. \tag{6}$$

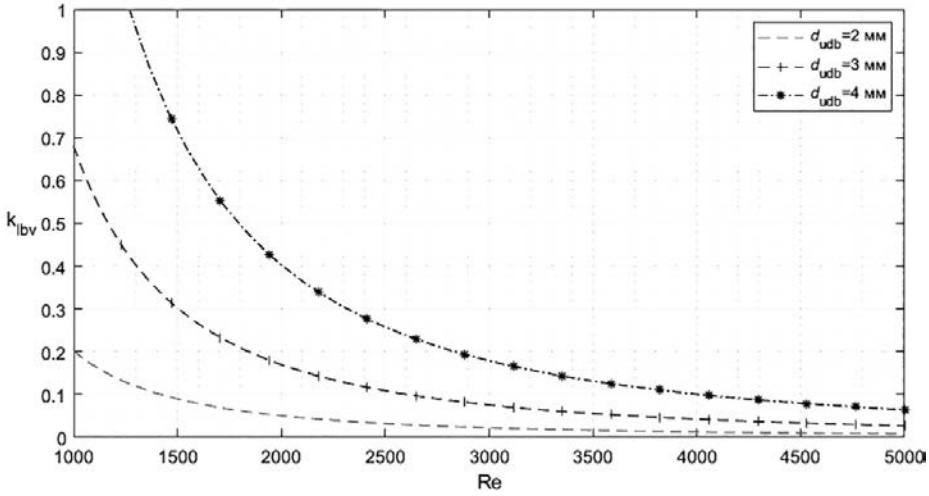


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления частиц минеральных удобрений от значения числа Рейнольдса

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента лобового сопротивления частиц минеральных удобрений от значения числа Рейнольдса.

Результаты измерения коэффициента парусности и критической скорости некоторых твердых минеральных удобрений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Результаты измерения коэффициента парусности и критической скорости некоторых твердых минеральных удобрений**

Наименование минеральных удобрений	Плотность, кг/м^3	Средняя масса 1 частицы, г	Средний диаметр частиц, мм	Скорость витания (min/max), м/с	Среднее значение коэффициента парусности
Аммиачная селитра	823,52	0,664	3,67	5,5/9,8	0,167
Карбамид	774,67	0,312	2	0,9/9,3	0,377
Суперфосфат двойной	1 086,67	0,660	4,3	4,2/10,6	0,206
Хлористый калий	1 070,47	0,349	3,25	5,5/9,9	0,165

Из таблицы 1 видно, что скорость витания частиц карбамида изменяется в сравнительно широком диапазоне – от 0,9 до 9,3 м/с в зависимости от размера частиц. Такой широкий размах данного показателя усложняет процесс моделирования методом дискретных элементов для материала. Аммиачная селитра, суперфосфат и хлористый калий схожи по усредненным показателям скорости витания, различие между минимальной и максимальной скоростью витания не превышает 45 %, однако средняя масса частиц хлористого калия и его геометрические параметры усложняют моделирование поведения частиц в вертикальном воздушном потоке.

Результаты определения критического напора для удобрений, разделенных на фракции, представлены на рисунке 6. Для построения графиков брали 3–5 фракций удобрений различного вида. Затем навеску 0,07 кг удобрений помещали на приемную сетку парусного классификатора. После включения в работу электродвигателя повышали скорость воздушного потока путем увеличения частоты вращения вентилятора и регулировки заслонки.

По результатам попадания в стакан затвора частиц удобрений по микроманометру определяли динамический напор H_{dnm}. Через 1 минуту отбирали удобрения из стакана затвора и определяли их массу, стакан устанавливали на место, а динамический напор увеличивали на 5 мм. Опыты повторяли до полного выхода всех удобрений на приемную сетку парусного классификатора.

По полученным данным построены графики, представленные на рисунке 5. По оси ординат отложен процент выхода удобрений P_{udb} из взятой навески в зависимости от величины динамического напора H_{dnm}. Далее по полученным графикам определяли напор, который соответствует пик.

На рисунке 7 представлены результаты определения зависимости критической скорости и коэффициента парусности от размеров частиц удобрений D_{frc}.

Полученные данные позволили вычислить критическую скорость витания частиц в вертикальном воздушном потоке U_{krt} и коэффициент парусности K_{par} по формулам (2) и (3) соответственно.

Для построения имитационной модели процесса витания частиц твердых минеральных удобрений в вертикальном воздушном потоке использовали вычислительный модуль динамики

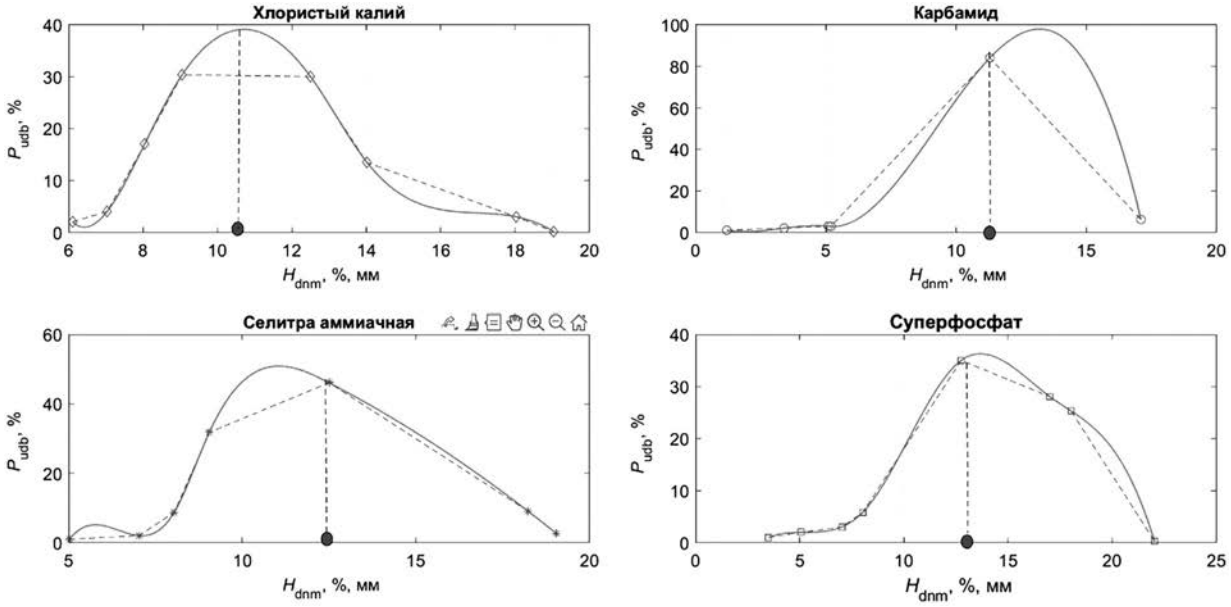


Рисунок 6 – Результаты определения критического напора для удобрений, разделенных на фракции

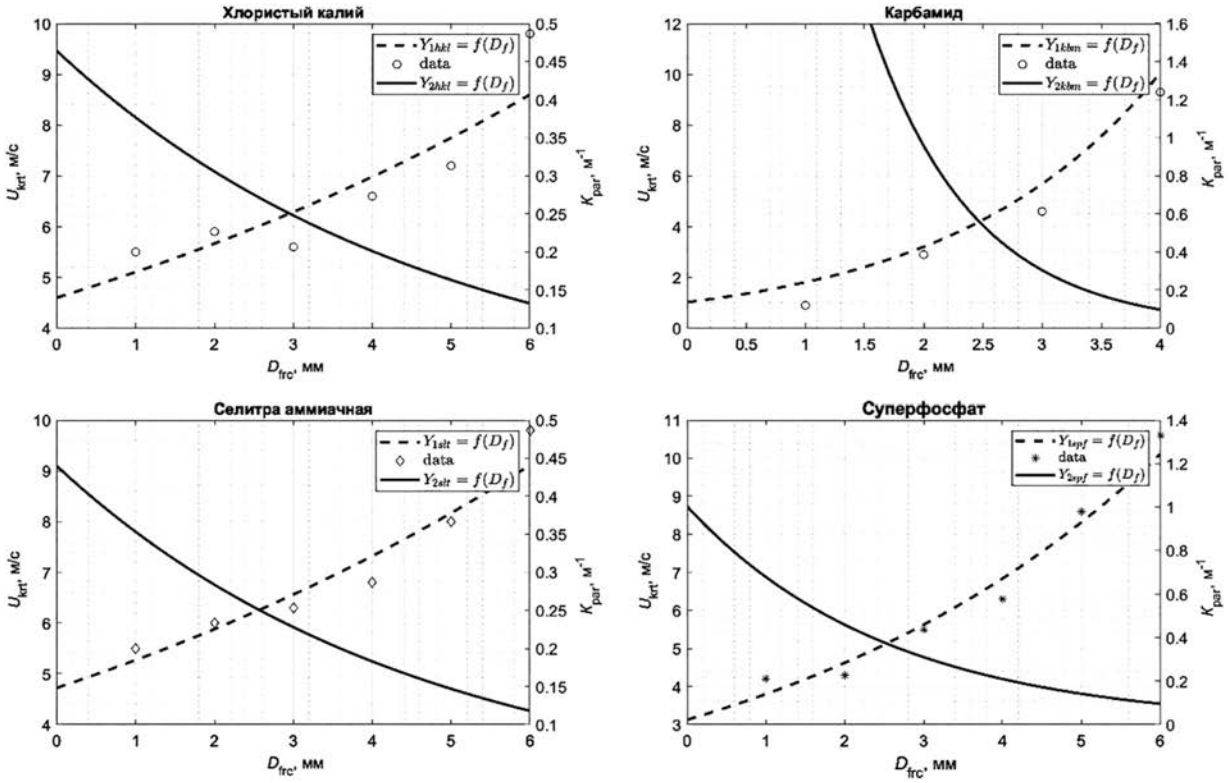


Рисунок 7 – Результаты определения зависимости критической скорости и коэффициента парусности от размеров частиц удобрений

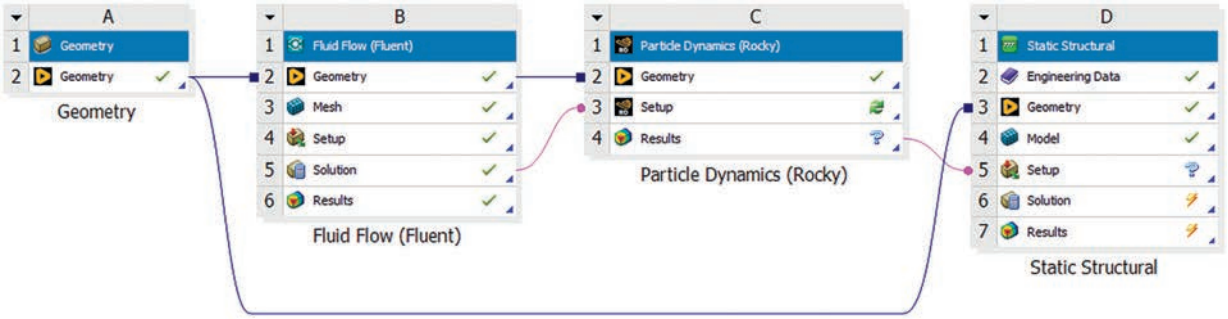
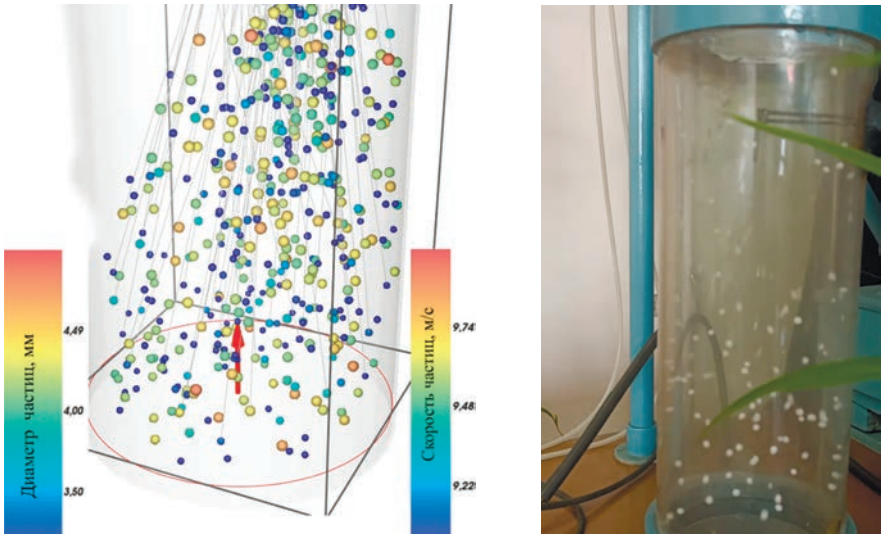


Рисунок 8 – Схема проекта CFD – DEM-модели



а *б*

Рисунок 9 – *CFD – DEM*-модель и ее физический эквивалент для определения скорости витания частиц в вертикальном воздушном потоке: *а* – *CFD – DEM*-модель, *б* – экспериментальная установка

жидкости и газов *CFD* и модуль моделирования динамики частиц дискретным методом *DEM* пакета *Ansys* (рисунок 8).

На рисунке 9, *а* представлена *CFD – DEM*-модель, на рисунке 9, *б* – экспериментальная установка для проверки сходимости модельных данных.

В таблице 2 представлены результаты моделирования процесса витания частиц твердых двойного суперфосфата в вертикальном воздушном потоке (фрагмент данных).

Таблица 2 – **Результаты моделирования процесса витания частиц твердых минеральных удобрений (суперфосфат двойной) в вертикальном воздушном потоке (фрагмент)**

Время моделирования, с	Средний эквивалентный диаметр частиц, мм	Средние значения поступательной скорости (проекции на оси координат *XYZ*), м/с		
		X	*Y*	*Z*
1,50	–0,03	3,58	0,03	–0,98
1,60	–0,03	3,56	0,03	–1,07
1,70	–0,03	3,53	0,02	–1,15
1,80	–0,02	3,39	0,01	–1,12
1,90	–0,01	3,15	–0,00	–0,98
2,00	–0,01	3,04	–0,01	–0,88
2,10	0,00	3,01	–0,01	–0,85
2,20	0,00	3,01	–0,01	–0,83

Окончание табл. 2

Время моделирования, с	Средний эквивалентный диаметр частиц, мм	Средние значения поступательной скорости (проекции на оси координат *XYZ*), м/с		
		X	*Y*	*Z*
2,30	–0,01	3,00	–0,00	–0,78
2,40	–0,01	3,00	0,00	–0,77
2,50	0,00	3,00	–0,00	–0,78
2,60	0,01	3,00	–0,03	–0,73
2,70	0,02	3,00	–0,03	–0,69
2,80	0,02	3,00	–0,03	–0,72
2,90	0,02	3,00	–0,03	–0,76
3,00	0,01	3,00	–0,03	–0,80

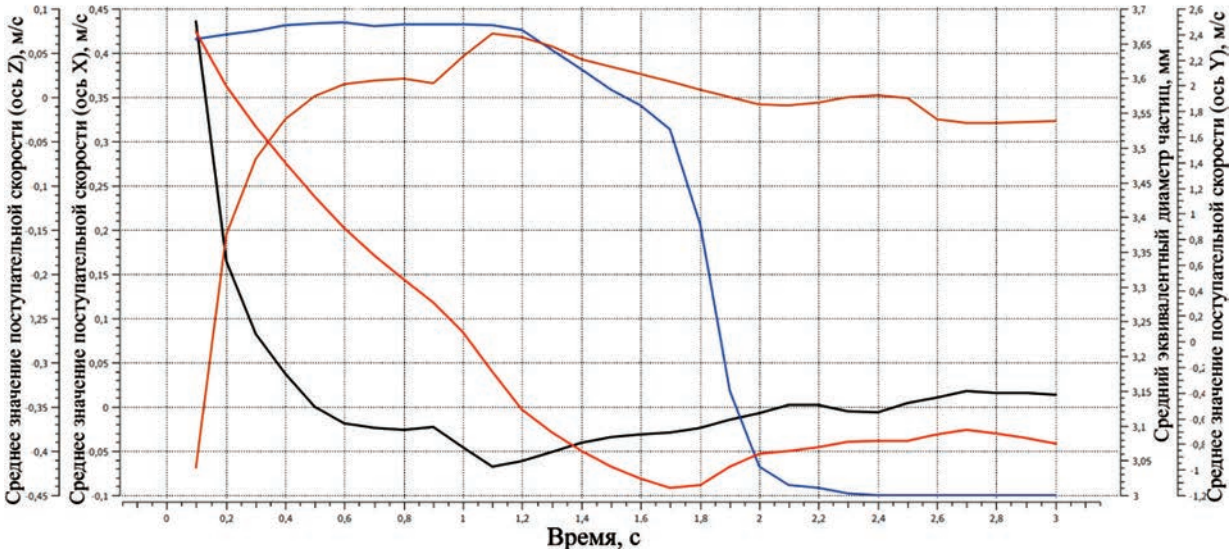


Рисунок 10 – Значения основных показателей моделирования движения частиц твердых минеральных удобрений в вертикальном воздушном потоке

На рисунке 10 представлены графики изменения проекций поступательной скорости частиц удобрений и эквивалентного диаметра в зависимости от времени моделирования.

Заключение

Следует отметить высокую сходимость экспериментальных данных, полученных при физическом моделировании и результатов, полученных методом дискретного моделирования, где расхождение не превысило 8 %. Для проверки адекватности модели, полученной методом дискретного моделирования, использовали проверку корректности, сравнивали результаты с реальными данными, выполнили анализ чувствительности модели и проверку на устойчивость. Таким образом, полученные результаты целесообразно использовать для обоснования основных конструктивно-технологических параметров подающих и распределяющих рабочих органов машин химизации земледелия [14].

Список использованных источников

1. ОАО «Гомельский химический завод» : офиц. сайт. – Гомель, 2016–2025. – URL: https://belfert.by/news/all (дата обращения: 18.04.2025).

2. ОАО «Гродно Азот» : офиц. сайт. – Гродно, 2012–2025. – URL: https://azot.by/products/osnovnoe-proizvodstvo (дата обращения: 22.07.2024).

3. ОАО «Беларуськалий» : офиц. сайт. – Солигорск, 2025. – URL: https://belaruskali.by (дата обращения: 22.07.2024).

4. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader / P. V. Liedekerke, E. Tijskens, E. Dintwa [et al.] / Powder Technology. – 2009. – P. 348–360.

5. Yinyana, S. Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software / Sh. Yinyana, Ch. Manb, W. Xiaochana // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – P. 249–259.

6. Arturo, M. R. Model and Software for the Parameters Calculation in Centrifugal Disk of Fertilizer Spreaders / M. R. Arturo, M. V. Gómez-Águila, M. S. Escobar // Ciencias Técnicas Agropecuarias. – 2021. – Vol. 30. – № 1. – P. 82–101.

7. Ismail, Z. E. Agitator Unit in Auger Metering Device for Fertilizer Applicator / Z. E. Ismail, M. M. Ibrahim, M. A. El-Saadany // Agricultural mechanization in Asia, Africa, and Latin America. – 2011. – Vol. 42. – P. 36–41.

8. The engineering parameters affecting the auger-type metering devices for fertilizing distribution / M. M. Ibrahim, Z. E. Ismail, M. A. El-Saadany, O. A. Fouda // Farm Machinery and Power. – Misr J. Ag. Eng. – 2008. – 25(3). – P. 641–654.

9. Angel, P. Auger-type granular fertilizer distributor: mathematical model and dynamic simulation / P. Angel, N. Garcia, Nelson // Eng. Agríc., Jaboticabal. – 2012. – Vol. 32. – № 1. – P. 151–163.

10. A Semi-Automated DEM Parameter Calibration Technique of Powders Based on Different Bulk Responses Extracted from Auger Dosing Experiments / B. E. Kassem, N. Salloum, T. Brinz [et al.] // KONA Powder and Particle Journal. – 2021. – № 38. – P. 235–250.

11. Машины и оборудование в растениеводстве. Практикум : учеб.-метод. пособие в 3 ч. / В. П. Чеботарев, Г. А. Радишевский, Н. П. Гурнович [и др.]. – Мн. : БГАТУ, 2021. – Ч. 3. – 256 с.

12. Адамчук, В. В. Теория центробежных рабочих органов машин для внесения минеральных удобрений : монография / В. В. Адамчук. – К. : Аграрная наука, 2010. – 178 с.

13. Назаров, С. И. Экспериментально-теоретические основы механизации процесса сплошного внесения минеральных удобрений : дис. … д-ра техн. наук : 05.20.01 / Назаров Сергей Иванович ; ЦНИИМСХ. – Мн., 1969. – 393 л.

14. Степук, Л. Я. Недобор и потери урожая как следствие наличия проблем в сфере технического обеспечения сельского хозяйства / Л. Я. Степук, В. Р. Петровец, И. В. Барановский // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – Горки, 2017. – № 2. – С. 132–136.

УДК 631.171:004.8

Поступила в редакцию 03.02.2026
Received 03.02.2026

В. П. Селиванова, Д. И. Комлач, В. В. Голдыбан, М. И. Курилович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ВНЕСЕНИЯ ГЕРБИЦИДОВ В УСЛОВИЯХ АВТОНОМНОГО ВОЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрена задача разработки требований к системе распознавания растений для прецизионного внесения гербицидов в условиях автономного вождения мобильной роботизированной платформы. Проанализированы особенности функционирования системы распознавания в составе автономного робототехнического комплекса, включая требования к быстродействию, энергопотреблению и интеграции с системой управления. Сформулирован комплекс функциональных, аппаратных, программных и интеграционных требований, обеспечивающих возможность автономной работы в полевых условиях. Полученные результаты могут быть использованы для анализа существующих аналогов и при проектировании систем прецизионного внесения средств химической защиты растений.

Ключевые слова: прецизионное земледелие, роботизированная платформа, распознавание растений, автономное вождение, машинное зрение.

V. P. Selivanova, D. I. Komlach, V. V. Holdyban, M. I. Kurylovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru

REQUIREMENTS FOR A PLANT RECOGNITION SYSTEM FOR PRECISION HERBICIDE APPLICATION IN AUTONOMOUS DRIVING CONDITIONS

Abstract. The paper addresses the problem of developing requirements for a plant recognition system intended for precision herbicide application under conditions of autonomous operation of a mobile robotic platform. The operational features of the recognition system as part of an autonomous robotic complex are analyzed, including requirements for processing speed, energy consumption, and integration with the control system. A set of functional, hardware, software, and integration requirements are formulated to ensure autonomous operation in field conditions. The obtained results can be used for the analysis of existing analogues and for the design of precision plant protection application systems.

Keywords: precision Agricultural, robotic platform, plant recognition, autonomous operation, machine vision.

Введение

Развитие технологий прецизионного земледелия является одним из ключевых направлений для повышения эффективности и экологической устойчивости сельскохозяйственного производства. Существенную роль в этом процессе играет снижение объемов применяемых средств химической защиты растений за счет повышения точности их внесения. Традиционные способы сплошной обработки посевов, как правило, приводят к перерасходу препаратов и увеличению пестицидной нагрузки на окружающую среду и человека [1, 2].

Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является использование мобильных роботизированных платформ, способных выполнять технологические операции в автономном режиме. Оснащение таких платформ системами распознавания растений на основе машинного зрения позволяет реализовать точечное внесение гербицидов с учетом фактического размещения культурных и сорных растений. Однако эффективность подобных решений в значи-

тельной степени определяется корректностью выбора архитектуры и параметров системы распознавания [3].

Несмотря на наличие значительного числа исследований и практических разработок в области применения машинного зрения в сельском хозяйстве, требования к системам распознавания растений, функционирующим в составе автономных роботизированных платформ, остаются недостаточно формализованными. В большинстве работ [4–6] основное внимание уделяется алгоритмам обработки изображений и методам классификации, тогда как вопросы интеграции с системой управления, ограничения по энергопотреблению и условия эксплуатации в реальной полевой среде рассматриваются фрагментарно.

В связи с этим актуальной является задача разработки комплексных требований к системе распознавания растений, ориентированной на использование в условиях автономного вождения мобильной роботизированной платформы. Формализация таких требований позволит создать основу для объективной оценки существующих аналогов, а также для последующего проектирования и реализации систем прецизионного внесения средств химической защиты растений.

Основная часть

Для обеспечения корректной работы системы распознавания растений в составе автономной роботизированной платформы необходимо формализовать совокупность требований, определяющих ее функциональные возможности, аппаратную и программную реализацию, а также условия эксплуатации. Указанные требования должны учитывать специфику работы в полевых условиях, ограничения по вычислительным и энергетическим ресурсам, а также необходимость взаимодействия с системой управления платформой и исполнительными механизмами.

С целью систематизации требований и повышения наглядности они были сгруппированы по функциональному признаку и представлены в виде отдельных категорий.

Функциональные требования определяют задачи, которые система распознавания растений должна решать для обеспечения корректной работы автономной роботизированной платформы. Основной целью таких требований является формализация функций, необходимых для реализации точечного внесения гербицидов с минимальными потерями химических средств и соблюдением экологических стандартов. В частности, функциональные требования обеспечивают идентификацию культурных и сорных растений, определение их пространственного положения на поле, а также передачу информации в систему управления для активации исполнительных механизмов платформы в режиме реального времени.

При формулировании функциональных требований учитываются следующие ключевые аспекты: высокая точность распознавания объектов, минимальная задержка обработки данных, способность работать в динамически изменяющихся условиях освещенности и погодных факторов, а также возможность непрерывной работы в течение всего цикла технологической операции. Кроме того, функциональные требования задают условия для интеграции алгоритмов машинного зрения с системами навигации и контроля движения платформы, что позволяет реализовать согласованное взаимодействие всех подсистем. Основные функциональные требования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Функциональные требования**

Требования	Обоснования
Обнаружение и классификация растений в реальном времени (≥10 FPS)	Обеспечение своевременной реакции исполнительных механизмов при движении
Поддержка базой данных системы как культурных, так и сорных растений	Необходимость различать объекты для избирательного внесения гербицидов
Формирование карты распознанных объектов с привязкой к координатам	Интеграция с системой навигации и точечное внесение препаратов
Выходной сигнал – бинарная маска/метка класса с координатами	Унификация для передачи в управляющую систему
Возможность непрерывной работы в полевых условиях ≥4 ч	Соответствие рабочим циклам агротехнологических операций

Технические требования к аппаратному обеспечению системы распознавания растений формируют основу для выбора сенсорных и вычислительных модулей, обеспечивающих стабильную и точную работу роботизированной платформы в полевых условиях. При их разработке учитываются физические, энергетические и эксплуатационные ограничения, включая габаритные размеры платформы, массу оборудования, энергопотребление, вибрационные и температурные воздействия, а также воздействие пыли и влаги, характерных для открытых агроценозов.

Ключевым аспектом является обеспечение достаточной производительности вычислительных модулей для обработки видеопотока с камер в режиме реального времени. Это необходимо для своевременного обнаружения и классификации объектов, передачи команд исполнительным механизмам и поддержания автономного функционирования платформы. Особое внимание уделяется подбору сенсоров и камер с высокой разрешающей способностью, широким динамическим диапазоном и устойчивостью к изменяющимся условиям освещенности, что позволяет минимизировать ошибки распознавания и обеспечить точное локализованное внесение гербицидов.

Также технические требования задают параметры совместимости оборудования с остальными подсистемами роботизированной платформы, включая систему управления и исполнительные органы, а также требования к защите от внешних воздействий (пыль, вода, вибрации). Это обеспечивает надежность и долговечность системы в полевых условиях, а также позволяет соблюдать баланс между производительностью и энергопотреблением, что критично для автономной работы в течение нескольких часов. Технические требования к аппаратному обеспечению представлены в таблице 2.

Таблица 2 – **Технические требования к аппаратному обеспечению**

Требования	Обоснования
Использование камер высокого разрешения (не менее 2 МП)	Устранение артефактов при движении, повышение точности распознавания
Компактность и защищенность оборудования (IP65 и выше)	Работа в агрессивной среде: пыль, влага, вибрации
Наличие аппаратной платформы для обработки данных на борту (напр., Raspberry Pi 4)	Обеспечение автономной работы и минимизация задержек
Возможность установки мультиспектральных или гиперспектральных сенсоров	Повышение точности классификации по спектральным признакам
Интеграция с ЛИДАР/RTK-GNSS системой	Улучшение привязки объектов к координатам поля

Программные и интеграционные требования определяют архитектуру и принципы функционирования программного обеспечения системы распознавания растений, а также ее взаимодействие с другими подсистемами мобильной роботизированной платформы. Эти требования направлены на обеспечение корректной работы алгоритмов обнаружения и классификации растений в режиме реального времени, надежной передачи данных на систему управления и согласованного функционирования всех исполнительных механизмов.

Особое внимание при формировании программных требований уделяется обеспечению совместимости с существующей системой управления платформой и навигационными модулями. Программное обеспечение должно поддерживать стандартизированные интерфейсы для обмена данными с сенсорными и вычислительными блоками, обеспечивая согласованное взаимодействие подсистем в условиях автономного движения. Это позволяет платформе корректно реагировать на выявленные объекты, обеспечивая точечное внесение гербицидов и минимизацию ошибок при обработке посевов.

Программные требования также включают аспекты масштабируемости и адаптируемости: возможность обновления алгоритмов распознавания, добавления новых моделей машинного зрения и перенастройки под различные культурные растения и условия освещенности. Это особенно важно для долгосрочной эксплуатации платформы и ее применения в разных агроэкосистемах, где изменяются сорта растений, плотность засева и погодные условия.

Интеграционные требования задают параметры взаимодействия программного обеспечения с аппаратной частью и внешними системами: синхронизация обработки данных с движением платформы, корректное формирование управляющих сигналов для исполнительных органов, обеспечение надежной коммуникации и логирования событий для последующего анализа. Такие требования создают основу для построения модульной и устойчивой системы, которая может быть модернизирована или дополнена без значительного вмешательства в функционирующую платформу. Программные и интеграционные требования к системе распознавания растений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – **Программные и интеграционные требования**

Требования	Обоснования
Поддержка обучения/дообучения модели	Адаптация под конкретные культуры и условия
Поддержка логирования результатов и диагностики	Анализ производительности и последующее улучшение
Возможность удаленной настройки и обновления	Удобство эксплуатации и тестирования
Совместимость с системой управления автономной роботизированной платформы	Возможность апробации на конкретном роботизированном агрегате
Энергопотребление ≤60 Вт	Совместимость с энергетическими возможностями платформы

Эксплуатационные требования определяют условия и ограничения, при которых система распознавания растений сохраняет свою работоспособность и заявленные характеристики. В рамках автономной мобильной роботизированной платформы такие требования играют ключевую роль, поскольку эффективность и надежность системы напрямую зависят от ее способности функционировать в реальной полевой среде на протяжении всего цикла технологической операции. Учитываются также требования к безопасности эксплуатации, включая защиту оператора и окружающей среды, от непредвиденных срабатываний исполнительных механизмов и ошибок системы распознавания.

Особое внимание уделяется поддержанию функциональности платформы при различных режимах работы и изменяющихся условиях окружающей среды. Это включает возможность корректной работы системы распознавания растений при разной интенсивности солнечного света, изменении состояния почвы и плотности растительных рядов, а также обеспечение стабильной работы на протяжении всего периода автономного функционирования. Кроме того, эксплуатационные требования предусматривают возможность быстрой замены или модернизации отдельных модулей системы без остановки работы платформы. Эксплуатационные и пользовательские требования к системе распознавания растений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – **Эксплуатационные и пользовательские требования**

Требования	Обоснования
Интуитивно понятный интерфейс для настройки и отображения статуса	Упрощение ввода в эксплуатацию и контроля
Быстрая замена/обновление компонентов	Повышение ремонтопригодности и надежности
Работа в условиях освещенности от 5 000 до 100 000 лк	Обеспечение стабильности работы в различных погодных условиях
Температурный диапазон работы от –10 до +45 °C	Соответствие климатическим условиям

Сформированный комплекс функциональных, технических, программных и эксплуатационных требований обеспечивает системное описание разрабатываемой роботизированной платформы и отражает взаимосвязь между задачами мониторинга, автономного движения и точечного внесения средств химической защиты растений. Совокупность требований направлена на достижение устойчивой автономной работы в полевых условиях, повышение точности технологических операций и снижение негативного воздействия на окружающую среду, а также служит основой для последующей разработки архитектуры системы и реализации макетного образца.

Заключение

В рамках данной работы на основе анализа условий эксплуатации и задач, возлагаемых на систему, сформирован структурированный перечень требований, охватывающий функциональные возможности, аппаратное и программное обеспечение, а также эксплуатационные аспекты.

Разработанные требования позволяют обеспечить согласованность между подсистемами мониторинга, навигации и управления исполнительными механизмами, что является ключевым фактором для достижения высокой эффективности и надежности автономной работы в полевых условиях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации роботизированных агротехнических комплексов, а также служат методической основой для дальнейших исследований, направленных на разработку алгоритмов распознавания растений и принятия решений в задачах точного земледелия.

Авторы статьи выражают благодарность за поддержку и финансирование данного исследования Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. Precision weeding in Agricultural: a comprehensive review of intelligent laser robots leveraging deep learning techniques / C. Wang, C. Song, T. Xu, R. Jiang // Agricultural. – 2025. – Vol. 15. – № 11. – Art. 1213.

2. Wang, W. A review of computer vision technologies in precision Agricultural / W. Wang, Y. Kang // Theoretical and Natural Science. – 2025. – Vol. 101. – P. 35–40.

3. Precise robotic weed spot-spraying for reduced herbicide usage and improved environmental outcomes: a real-world case study / A. Smith, M. R. Azghadi, A. Olsen [et al.]. – 2024.

4. Machine vision systems in precision Agricultural for crop farming / R. R. Shamshiri [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2023. – Vol. 16. – № 1. – P. 1–15.

5. Agricultural robot automatic plant detection integrating visual navigation and phenotype recognition / Y. Li, H. Zhang, Q. Chen [et al.] // Discover Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 6. – Art. 12.

6. Key technologies for machine vision for picking robots: review and benchmarking / J. Liu, Z. Wang, K. Zhao [et al.] // Machine Intelligence Research. – 2025. – Vol. 22. – № 2. – P. 145–162.

УДК 631.171:004.8

Поступила в редакцию 04.02.2026
Received 04.02.2026

В. П. Селиванова, Д. И. Комлач, В. В. Голдыбан, М. И. Курилович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И СТАДИЙ ОНТОГЕНЕЗА СОРНЫХ РАСТЕНИЙ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Аннотация. В статье систематизированы морфологические признаки сорных растений, релевантные для задач автоматизированного распознавания на изображениях. Описаны четыре основных класса признаков – геометрические, архитектурные, поверхностные и динамические – и показано их взаимодополнение при формировании устойчивых дескрипторов. Обоснована необходимость учета онтогенетической изменчивости и стандартизации фенофаз с использованием шкал BBCH и Zadoks, а также адаптации этих шкал для сорных видов. На основе анализа выделены приоритетные группы сорняков для агроценозов Беларуси и предложены критерии отбора стадий развития для репрезентативных обучающих выборок.

Ключевые слова: распознавание растений, морфологические признаки, фенофаза, онтогенетическая динамика, прецизионное внесение гербицидов, автономное движение, техническое зрение.

V. P. Selivanova, D. I. Komlach, V. V. Holdyban, M. I. Kurylovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru

ANALYSIS OF MORPHOLOGICAL FEATURES AND STAGES OF ONTOGENESIS OF WEEDS IN AUTOMATED RECOGNITION TASKS

Abstract. This article systematizes the morphological features of weeds relevant to automated image recognition tasks. Four main classes of features–geometric, architectural, surface, and dynamic–are described, and their complementarity in the formation of stable descriptors is demonstrated. The need to account for ontogenetic variability and standardize phenophases using the BBCH and Zadoks scales, as well as adapt these scales for weed species, is substantiated. Based on the analysis, priority weed groups for Belarusian agrocenoses are identified, and criteria for selecting developmental stages for representative training samples are proposed.

Keywords: plant recognition, morphological features, phenophase, ontogenetic dynamics, precision herbicide application, autonomous movement, machine vision.

Введение

Разработка системы распознавания растений для прецизионного внесения гербицидов в условиях автономного вождения требует целенаправленного исследования стадий развития сорных и культурных растений с единой прикладной целью: научить систему надежно различать культурное растение и сорняк в реальном времени и принимать безопасные решения о локальном внесении пестицидов [1]. В отличие от общей морфологической классификации, прикладное исследование фенофаз должно фокусироваться на тех визуальных критериях, которые прямо коррелируют с эффективностью обработки и риском повреждения культуры.

Практическая реализация требует многомасштабного сбора данных и аннотации: сочетания геометрических и архитектурных дескрипторов для быстрой детекции, микроструктурных и спектральных признаков для точной таксономии, а также временных рядов для оценки темпов роста и изменения чувствительности к гербицидам. Для условий автономного вождения критичны требования к датасету: высокая частота съемки, устойчивость к артефактам движения и теням, синхронизация мультисенсорных каналов (RGB, спектр, глубина) и разметка фенофаз, ориентированная на оперативные временные окна агротехнических операций.

Основная часть

Распознавание растений на изображениях основывается на выделении информативных морфологических признаков, позволяющих не только определить вид, но и корректно интерпретировать текущее состояние растения. Поэтому формирование обучающих выборок требует учета как структуры органов, так и динамики их изменения.

Геометрические признаки включают размеры и формы органов, контуры, углы и пропорции, обеспечивая модель крупномасштабными ориентирами и хорошей наблюдаемостью в полевых условиях. Архитектурные признаки характеризуют пространственную организацию растения – тип ветвления, расположение листьев и общую компоновку, отражающие генетические особенности и адаптивные реакции. Эти характеристики легко извлекаются из изображений, обладают высокой наблюдаемостью в полевых условиях и позволяют моделям уверенно выделять крупномасштабные морфологические шаблоны.

Признаки поверхности и микрорельефа описывают эпидермальные структуры, такие как трихомы, устьица и текстура поверхности. Эти элементы обладают высокой таксономической ценностью и менее изменчивы под влиянием внешних факторов. Динамические и временные признаки фиксируют изменения формы, окраски и структуры во времени, включая сезонные вариации и темпы роста, что позволяет учитывать «поведение» растения в онтогенезе. Эти параметры обладают высокой таксономической значимостью, поскольку менее подвержены влиянию внешних условий по сравнению с некоторыми макроморфологическими формами. Схематическая классификация морфологических признаков сорных растений представлена на рисунке 1.

Границы между категориями признаков не всегда четкие: для методики распознавания это означает необходимость многомасштабного подхода, при котором формальные характеристики разных уровней объединяются в комплексные признаки, что повышает устойчивость алгоритма к внешней вариабельности, но одновременно увеличивает требования к объему и качеству аннотированных данных.

Учет онтогенетической изменчивости признаков является ключевым элементом классификации, поскольку морфология растения существенно меняется на разных этапах развития. Для формирования репрезентативных выборок требуется точная маркировка фенофаз, иначе модели теряют переносимость между возрастными группами и условиями выращивания.

Выделение стадий развития основано на представлении онтогенеза как последовательности физиологически и морфологически различимых фаз, формализуемых в виде шкал. Наиболее широко применяются универсальная система BBCH (от нем. Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie – Биологическая федеральная служба, Федеральное ведомство по сортам растений и химическая промышленность) и для злаков шкала Zadoks [2]. Их использование обеспечивает стандартизированное описание фенофаз и сопоставимость данных между



Рисунок 1 – Классификация морфологических признаков сорных растений

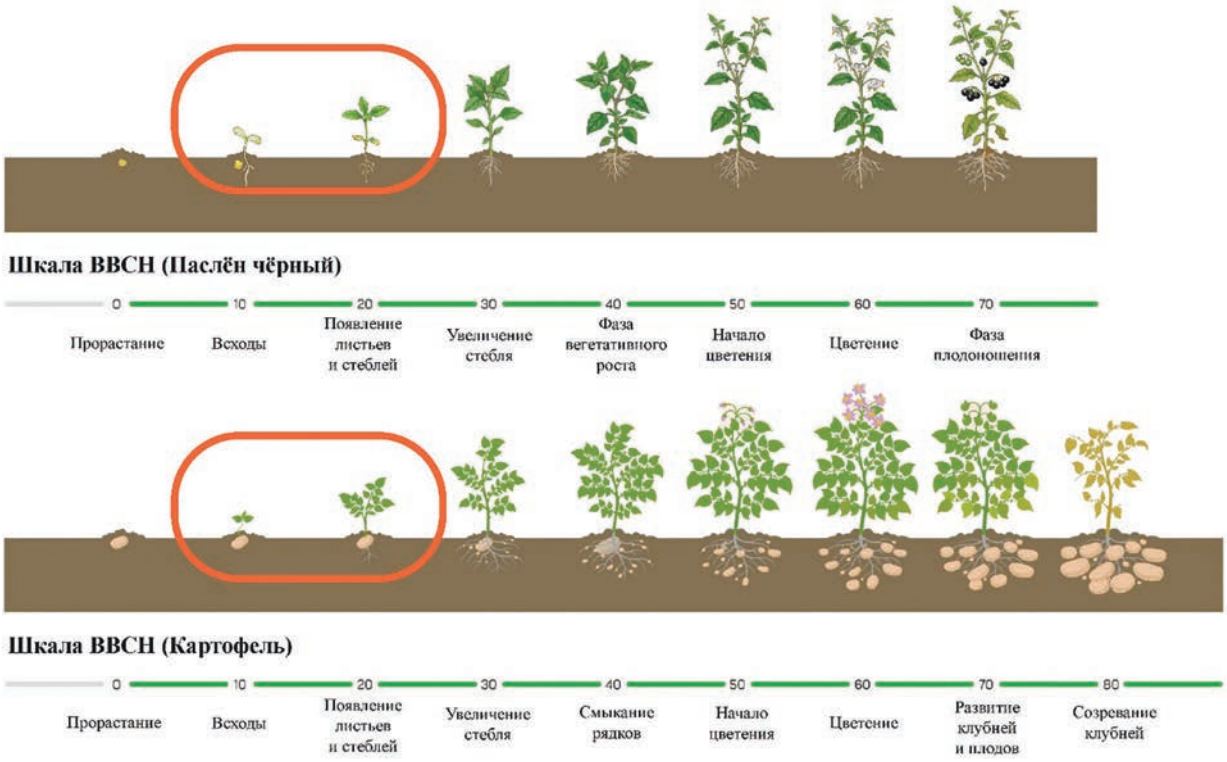


Рисунок 2 – Сравнение условных шкал BBCH

исследованиями и агротехническими условиями. На рисунке 2 показано сравнение разработанных шкал BBCH для картофеля и паслена черного – вида, выбранного благодаря его морфологическому сходству с картофелем.

Для культурных растений шкалы BBCH детализированы, тогда как для сорных видов их приходится адаптировать из-за разнообразия жизненных стратегий и темпов роста. Такая адаптация включает уточнение визуальных критериев фенофаз и при необходимости введение дополнительных подстадий, чтобы корректно выделять ключевые этапы, важные для контроля сорняков. Сравнение BBCH-шкал показало, что наиболее эффективным для технического зрения является диапазон ранних фаз (BBCH 10–19): в этот период видоспецифичные признаки наиболее выражены, а вариабельность минимальна. На средних стадиях (BBCH 30–39) различия сохраняются, но усложняются из-за перекрытия листьев, теневых артефактов и увеличения биомассы, что снижает точность классификации и требует более продвинутых методов обработки изображений.

Формирование перечня сорных растений и выбор стадий их развития для обучающей выборки должны опираться на реальную структуру агроценозов, характерных для сельскохозяйственного производства Беларуси [3]. Приоритетными являются виды, наиболее распространенные в посевах и обладающие высокой конкурентоспособностью, включая однолетние и многолетние двудольные сорняки, злаковые виды и устойчивые корневищные формы.

Однолетние двудольные сорняки (лебеда белая, звездчатка средняя, пастушья сумка, мелколепестник однолетний и др.) формируют массовые всходы и активно конкурируют с культурой в ранневесенний период. Наиболее информативны для распознавания их ранние фазы, когда четко различимы форма семядольных и первых настоящих листьев, жилкование, степень опушения и архитектура розетки.

Многолетние двудольные виды (осот, подорожник, полынь, золотарник канадский, одуванчик) отличаются устойчивостью и вегетативным размножением. Для их идентификации ключевыми являются признаки отрастания из подземных органов: форма и текстура листьев, строение розетки, особенности побегов и опушения.

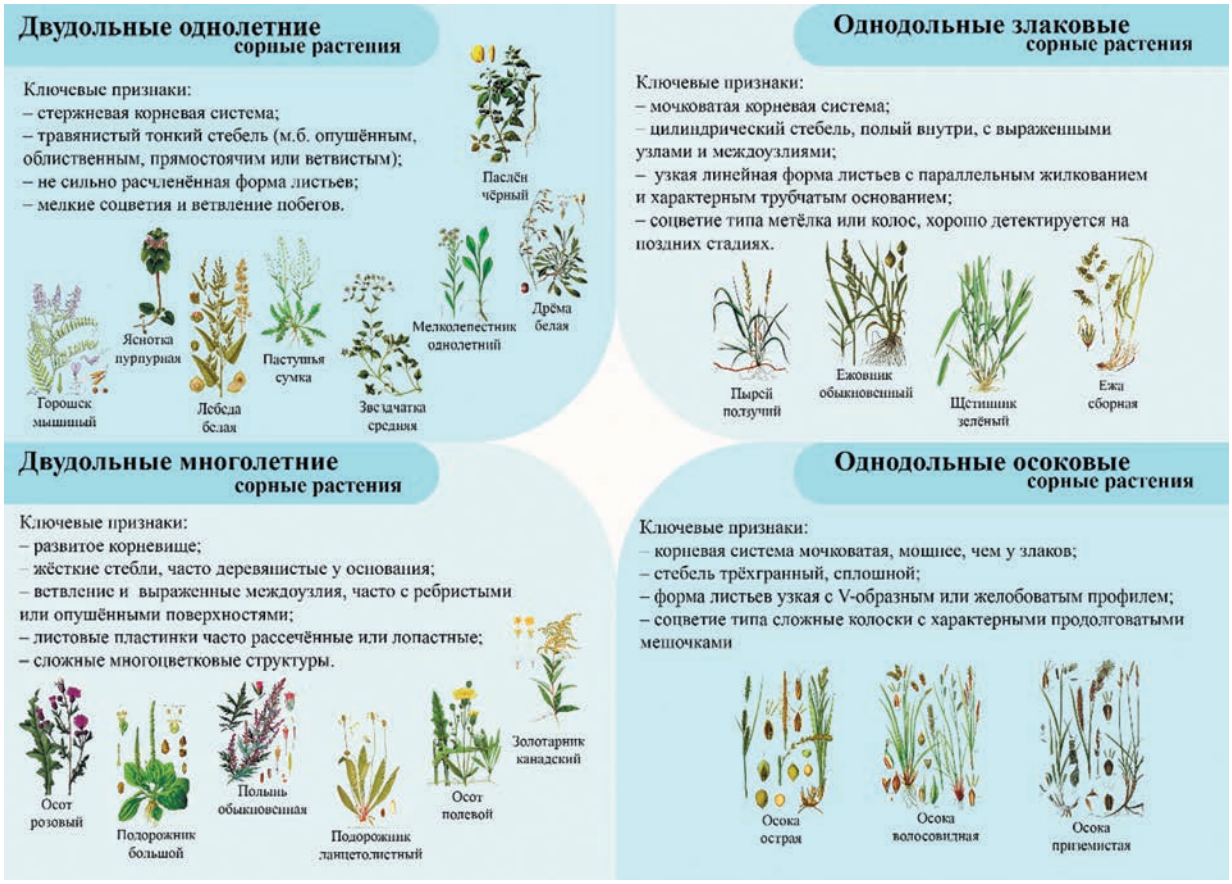


Рисунок 3 – Таксономо-морфологическая структура сорных растений
для задач автоматизированного распознавания

Злаковые сорняки (пырей ползучий, щетинник, ежовник) представляют сложную группу из-за сходства с культурными злаками на ранних стадиях. Существенными признаками являются линейная форма листьев, характер жилкования и опушения, расположение листьев, особенности корневищ и узлов, позволяющие отличить сорняки до начала кущения.

Отдельную категорию составляют декоративные и инвазивные виды (вьюнок полевой, лядвенец рогатый, василек луговой, зверобой продырявленный), характеризующиеся высокой морфологической вариативностью. Для их распознавания наиболее значимы форма листьев, архитектура побегов и структура соцветий. Схема таксономо-морфологической структуры сорных растений представлена на рисунке 3.

Практическое применение классификации морфологических признаков в системах машинного зрения требует их формализации в измеримые дескрипторы: контурные и формальные показатели, спектрально-текстурные характеристики, метрические индексы и статистику микроструктур. Подбор дескрипторов определяется задачей: для широкого распознавания видов эффективна комбинация масштабно-инвариантных признаков и многоканальных данных, тогда как для различения близкородственных видов требуется усиленный акцент на микроструктурах и временной динамике.

Заключение

Исследованы морфологические признаки ключевых сорных видов, включая сопоставление их фенологических шкал BBCH с культурными растениями. Комплексный учет геометрических, архитектурных, поверхностных и динамических признаков обеспечивает устойчивость систем машинного зрения к внешней вариабельности и повышает точность распознавания сор-

ных растений. Для практического применения разработаны репрезентативные выборки сорных растений, отражающие структуру агроценозов региона, и сделан акцент на ранних фазах развития, где видоспецифичные признаки наиболее выражены.

Авторы выражают благодарность за поддержку и финансирование данного исследования Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. Weed recognition using deep learning techniques on class-imbalanced imagery / A. S. M. Hasan , F. Sohel, D. Diepeveen [et al.] // Crop and Pasture Science. – 2022. – Vol. 74. – № 6. – P. 628–644. – DOI: 10.1071/CP21626.

2. Meier, U. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications / U. Meier, H. Bleiholder, L. Buhr [et al.] // Journal für Kulturpflanzen. – 2009. – Vol. 61. – № 2. – P. 41–52.

3. Справочник сорных растений / Национальная академия наук Беларуси, Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию, Институт защиты растений ; сост. А. В. Сташкевич [и др.] ; под общ. ред. Е. А. Якимович. – Мн. : Колорград, 2025. – 121 с.

УДК 637.112.5

Поступила в редакцию 01.10.2025
Received 01.10.2025

Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская, В. В. Никончук, Д. В. Бернацкая

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ЗООТЕХНИЧЕСКОГО УЧЕТА СВИНЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Аннотация. В статье рассмотрены существующие устройства для зоотехнического учета свиней в режиме реального времени, проведен анализ их использования, а также приведены преимущества и недостатки этих устройств.

Ключевые слова: племенной учет, метод, камера, RFID-метка, подсчет поголовья, программно-аппаратный комплекс, система подсчета, роботизированная каретка.

E. L. Zhilich, Yu. N. Rogalskaya, V. V. Nikonchuk, D. V. Bernatskaya

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru

MODERN DEVICES DESIGNED FOR ZOOTECHNICAL RECORDING OF PIGS IN REAL-TIME MODE

Abstract. The existing devices for real-time zootechnical recording of pigs are reviewed, an analysis of their use is conducted, and the advantages and disadvantages of these devices are given.

Keywords: breeding records, method, camera, RFID tag, livestock count, software and hardware complex, counting system, and robotic carriage.

Введение

Зоотехнический учет представляет собой систему регистрации племенных и производственных данных в животноводстве. Практика высокопродуктивного скотоводства показывает, что выдающихся результатов достигают только те фермы, заводы и регионы, где налажен качественный зоотехнический и племенной учет. Надежный и точный первичный зоотехнический учет служит основой для племенного скотоводства, которое, в свою очередь, влияет на эффективность всех селекционно-племенных мероприятий, направленных на улучшение пород, популяций и групп животных. Без правильно организованного учета невозможно повысить продуктивность и племенные качества животных.

Как зоотехнический, так и племенной учет базируются, прежде всего, на идентификации животных посредством мечения. Без достоверного, своевременного и точного учета невозможно эффективно организовать производство продукции скотоводства, а без надежного метода мечения учет становится невозможным. Важным элементом учета является индивидуальная идентификация каждого животного. В этой сфере разработка надежного способа мечения крупного рогатого скота остается нерешенной задачей, поскольку существующие методы имеют значительные недостатки, снижающие их эффективность [1, 2].

Основная часть

Учет поголовья свиней – это ключевая задача, которая значительно усложняется при переводе животных с этапа доращивания на откорм, а также во время отгрузки и приемки. Эта проблема актуальна как для небольших ферм, так и для крупных предприятий по убою и мясопереработке.

Хаотичное движение животных, высокая скорость передвижения, затаптывание сородичей, еще не убранные туши падежа в коридоре и другие факторы могут затруднить процесс. Учет требует высокой концентрации работника и нередко приводит к ошибкам в счете. Неверный учет может привести к значительным потерям дохода и нарушениям в работе фермы [3].

При помощи простого сервиса можно учитывать поголовье, а при помощи универсального продукта можно не только считать прирост животных, но и вести планирование рациона, проводить операции по реализации продукции, координировать и контролировать работу персонала, анализировать деятельность и совершать другие операции в зависимости от потребностей управления. Программа для учета поголовья – современный инструмент управления деятельностью в животноводстве. Программы могут быть узкоспециализированными и универсальными. Узкоспециализированные сервисы обслуживают одну или несколько областей хозяйства, а универсальные охватывают максимально возможные участки трудовой деятельности. Программа учета поголовья животных дает возможность вести своевременный учет поголовья при приросте и убытии особей. Универсальные программы могут разрабатываться специально под пользователя системы с учетом потребностей хозяйства.

Используемые программные системы позволяют производить учет свиней по полному циклу от осеменения свиноматок до откорма и передачи поголовья на убой и переработку. Каждый цикл производства имеет важное значение, в каждом цикле существуют свои особенности содержания и кормления поголовья и, соответственно, особенности учета свиней.

Известна умная видеоаналитика для автоматического учета свиней Vmx SILA: LSI (AI and CV for Pigs Inventory) фирмы Videomatrix (рисунок 1).

Videomatrix – компания-разработчик, которая предлагает агропромышленным комплексам решение Vmx SILA: LSI на базе ИИ и машинного зрения. Эта система ведет автоматический учет количества свиней в режиме реального времени при переводе животных на доращивание, а затем передает данные во внутренние системы учета. Точность работы системы – до 99 % [4].

К преимуществам данной системы можно отнести то, что учет свиней происходит в режиме реального времени, а также все животные учитываются, даже те, которые перекрыты другими. Есть у системы и недостатки. Это аномальные данные, которые появляются из-за насекомых, садящихся на объектив во время съемки. Подсчет ведется только при переводе животных на доращивание – еще один недостаток, а также дорогостоимость оборудования и ПО.

Российская компания «Центр Программ Систем: CPS» (рисунок 2) выпускает систему подсчета поголовья, которая представляет собой программно-аппаратный комплекс, в основе которого – программное обеспечение, обрабатывающее видеоизображение, производящее распознавание и подсчет животных.

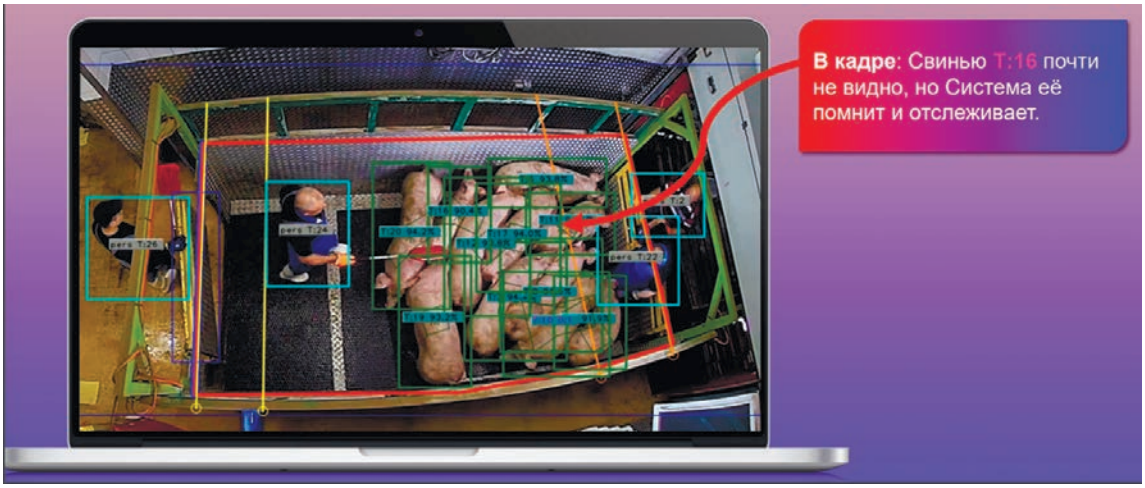


Рисунок 1 – Умная видеоаналитика для автоматического учета свиней Vmx SILA: LSI (AI and CV for Pigs Inventory)



Рисунок 2 – Система подсчета поголовья «Центр Программ Систем: CPS»

Система представляет собой набор, в состав которого входят блок управления и видеокамера. Данное оборудование может быть установлено в любом месте, где необходимо произвести подсчет.

Система автоматического подсчета поголовья может быть успешно применена на свиноводческих и мясоперерабатывающих предприятиях. Решение по подсчету количества животных может применяться на крупных фермерских хозяйствах, специализирующихся на свиноводстве, и быть задействована в таких бизнес-процессах, как, например, отгрузка продукции покупателям.

На мясоперерабатывающих предприятиях система может быть использована в бизнес-процессе приемки свиней и легко интегрирована в учетную систему предприятия [5].

К преимуществам данной системы подсчета поголовья можно отнести то, что учет свиней происходит в режиме реального времени, может применяться на крупных фермерских хозяйствах. А в качестве недостатка отметим тот факт, что камера устанавливается только в одном месте, и не все животные учитываются из-за перекрытия другими. Разработан также сервис по распознаванию и подсчету животных по видео с роботизированной кареткой для перемещения видеокамеры (рисунок 3).



Рисунок 3 – Видеоаналитический сервис с роботизированной кареткой для перемещения видеокамеры

Данный сервис оснащен специальным оборудованием: IP-камеры, тепловизоры и роботизированные каретки, на которых эти сенсоры расположены.

Ежедневно системы сбора данных получают тысячи фотографий и видео, а затем используют их для обучения нейросетей. Не потеряться в таком объеме данных им помогает S3-совместимое хранилище MinIO и базы данных – в них лежат файлы с метаданными по каждому видео и фото. Таким образом сотрудники узнают, что и где было снято, когда, на какой сенсор, для какого проекта и где это хранится. Это позволяет оперативно фильтровать данные, генерировать новые датасеты, забирать новые фото и видео в сервисы.

Сборщики сохраняют данные в хранилище. А далее – Инференс пайплайн забирает данные и генерирует результаты. На следующем этапе эти результаты получают ветеринары, служба безопасности и все остальные специалисты, которым для работы необходима эта информация. Трейнинг пайплайн позволяет регулярно обновлять модели для сервисов с учетом новых данных.

Чтобы сервисы выдавали стабильный качественный результат, нужно непрерывно обучать модели. Для этого CV-инженеры при помощи методов активного обучения оценивают новые изображения и проверяют, с какими из них сервисы справляются хуже. Далее эти фото и видео забирают для переобучения системы. Процесс инференса строится при помощи оркестратора Prefect, который легко разворачивается и настраивается, в нем удобно планировать и управлять задачами для сервисов по видеоаналитике: фактически результаты работы модели генерируются на одном из шагов Prefect-пайплайна. Также в работе помогают Grafana, Prometheus и Телеграм-боты для мониторинга и оперативного реагирования на возникающие ситуации.

Группа компьютерного зрения провела исследование, в результате которого было установлено, что для человека точность подсчета поголовья свиней составляет 96–97 %. У сервиса видеоаналитики этот показатель должен быть не менее 99 %. Для начала группа компьютерного зрения ввела кросс-проверку. Для съемки использовали три независимых разметчика – каждый на видео подсчитывает животных. Четвертый разметчик собирает данные, находит ошибки в подсчетах и усредняет. Такое усредненное значение принимается за истинное. Практически сразу сервис по подсчету показал точность 97 %. Оставалось только снизить количество ошибок. Еще один процент точности дал тюнинг гиперпараметров после оптимизации пороговых значений для алгоритмов детекции, трекинга и счета животных. Активная зона – это область на изображении, в котором подсчитывается животное с уникальным ID. Для разных по размерам загонов нужна разная область. Но так как сервис знает, какой загон снят, то может выбрать необходимую область.

Группа компьютерного зрения прокатывает каретку три раза в день, а данные усредняет. Съемка выполняется с разницей в несколько часов. Это дает больше шансов увидеть тех животных, которые были перекрыты другими во время одного из проездов. А алгоритм подсчета может отбросить аномальные данные, которые появились из-за севших на объектив насекомых во время съемки [6].

Преимущества данного сервиса по распознаванию и подсчету свиней состоят в том, что учет животных происходит по полному циклу и в режиме реального времени, а также точность распознавания и подсчета. Еще один плюс в пользу этой системы – все животные учитываются, даже те, которые перекрыты другими. А к недостаткам относятся аномальные данные, которые появляются из-за севших на объектив насекомых во время съемки, а также дорогостоимость оборудования и ПО.

Шведская компания Smart Agritech создала Pigxcel – программно-аппаратный комплекс для автоматического взвешивания свиней (рисунок 4). Pigxcel отслеживает, как растут свиньи с помощью камер и искусственного интеллекта, чтобы своевременно оптимизировать их вес и количество корма.

Система избавляет работников фермы от необходимости вручную взвешивать животных, при этом снижается риск стресса и травм для свиней и людей. Система Pigxcel заранее предупреждает о любых проблемах. Она незаметно для животных взвешивает их несколько раз в день. Персонал может легко узнать вес свиней с помощью компьютера, планшета или телефона [7].



Рисунок 4 – Программно-аппаратный комплекс для автоматического взвешивания свиней Pigxcel

К преимуществам данного программно-аппаратного комплекса для автоматического взвешивания свиней можно отнести то, что взвешивание животных происходит в режиме реального времени. Использование данной системы позволяет снизить физические затраты, а также риск стресса и возможных травм при взвешивании для свиней и людей. А к недостаткам можно отнести дорогостоимость оборудования и ПО.

Еще известна система взвешивания камерами iDOL 65 – это составная часть системы ProGrow от компании SKOV (рисунок 5).

Ручное взвешивание откормочных свиней является сложной процедурой, которая отнимает много времени. Система ProGrow производит взвешивание свиней при помощи камеры, установленной в помещении над одним или несколькими загонами. Алгоритм анализирует полученные изображения животных и определяет их вес.

Система взвешивания свиней при помощи камер предоставляет фермеру ценную информацию о текущем среднем весе животных в загоне, а также распределении их веса. Это позволяет производителю вовремя реагировать на факторы, влияющие на привес свиней.

К преимуществам можно отнести отсутствие необходимости в ручном взвешивании свиней, возможность в любое время получать данные взвешивания 24 ч в сутки, 7 дней в неделю, круглый год. Эти данные в реальном времени всегда доступны для системы управления. При использовании данной системы нет необходимости держать механические весы в загоне. Экономически эффективные решения – простота реализации в большинстве загонов.

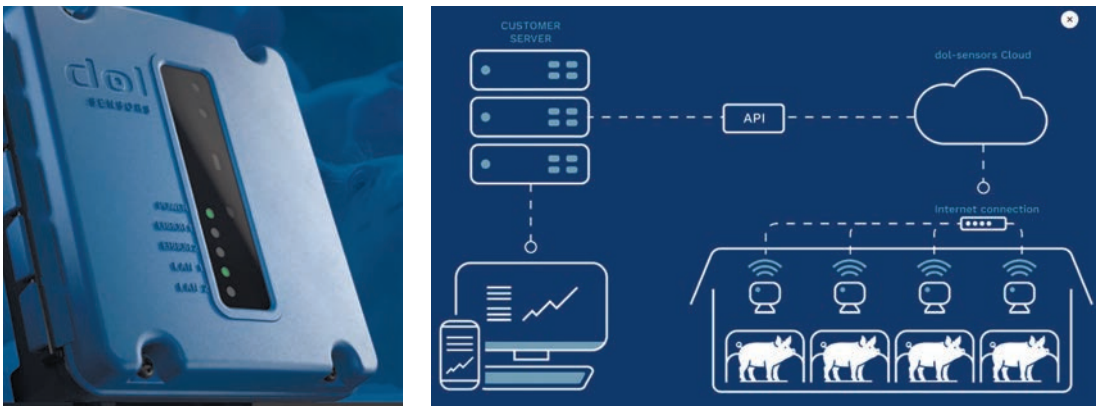


Рисунок 5 – Система взвешивания камерами iDOL 65

Целью применения такой методики является измерение веса животного без прямого контакта с ним. Стресс при механическом взвешивании неминуем, из-за него животные теряют привес. В то же время обойтись без регулярного взвешивания нельзя, потому что за весом животных нужно тщательно следить, чтобы на ранних стадиях определить свиней, которые плохо набирают вес, и не тратить ресурсы на их откорм. Система предполагает размещение видеокамер над зоной кормления перпендикулярно поверхности пола. Камера фиксирует длину свиньи, обхват туловища под грудиной, упитанность [8].

Заключение

Низкий уровень автоматизации в хозяйствах приводит к появлению неточностей при оформлении первичных документов и организации данных. Даже незначительные погрешности в управлении зоотехническим учетом животных способны существенно ухудшить показатели эффективности и нарушить систему контроля в отрасли животноводства. В связи с этим необходимость в разработке отечественного программно-аппаратного комплекса для автоматического учета свиней, который будет считать количество и вес свиней, а также их активность, является актуальной задачей.

Список использованных источников

1. Чернобай, Е. Н. Методические указания по дисциплине зоотехнический и племенной учет : учеб.-метод. пособие / Е. Н. Чернобай, И. С. Исмаилов, О. Н. Онищенко. – Ставрополь : АГРУС, 2023. – 61 с.

2. Деко, А. Ф. Зоотехнический учет в племенном животноводстве / А. Ф. Деко, А. И. Луценко // докл. Междунар. семинара для стипендиатов ФАО «Статистика численности скота и производства продукции животноводства», окт. 1968 г., г. Москва. – М. : [б. и.], 1968. – 16 с.

3. Агейкин, А. Г. Основы зоотехнии: практикум / А. Г. Агейкин, Т. А. Удалова, А. А. Нагибина. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2022. – 285 с.

4. Учет животных в АПК : сайт ООО «ВидеоМатрикс». – Екатеринбург, 2022–2026. – URL: https://videomatrix.ru/solutions/pigs/ (дата обращения: 02.10.2025).

5. Система подсчета поголовья животных : сайт компании «Центр Программ Систем: CPS». – Белгород, 2022–2026. – URL: https://sps.1cps.ru/ (дата обращения: 02.10.2025).

6. Как оптимизировать видеоаналитические сервисы: сайт компании «Селектел». – Санкт-Петербург, 2008–2026. – URL: https://selectel.ru/blog/ml-rusagro/ (дата обращения: 02.10.2025).

7. Автоматическое взвешивание свиней: сайт ООО «ТЕНЧАТ». – М., 2001–2026. – URL: https://tenchat.ru/media/2847793-avtomaticheskoye-vzveshivaniye-sviney/ (дата обращения: 02.10.2025).

8. Система взвешивания камерами iDOL 65: сайт компании «SKOV» – URL: https://www.skov.com/ru/produkty/vzveshivanie-i-zapis/sistema-vzveshivaniya-kamerami-idol-65/ (дата обращения: 02.10.2025).

УДК 636.084.74

Поступила в редакцию 05.09.2025
Received 05.09.2025

Е. Л. Жилич, С. А. Цалко

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОРМОВ

Аннотация. В статье представлены устройства для определения качества кормов.

Ключевые слова: продуктивность животных, корма, анализатор, интерфейс, корректировка, фронтальный погрузчик, компонент, рацион.

E. L. Zhilich, S. A. Tsalko

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru

FEED QUALITY CONTROL

Abstract. The article presents devices for determining feed quality.

Keywords: animal productivity, feed, analyzer, interface, adjustment, front loader, component, ration.

Введение

Качество корма – залог здоровья и продуктивности животных. Зерно, как основной компонент рациона многих видов животных, требует особого внимания. Испорченное зерно не только не приносит пользы, но и может стать причиной отравлений, заболеваний и даже гибели поголовья.

Внешний вид зерна – первый показатель его качества. Здоровое зерно имеет характерный цвет и форму, оно без признаков плесени, гнили или механических повреждений. Влажность зерна также играет важную роль. Повышенная влажность создает благоприятную среду для развития микроорганизмов, что может привести к порче корма. Оптимальная влажность зерна обычно составляет 14–16 %.

Однако не только внешние признаки позволяют оценить качество корма. Запах зерна также может многое рассказать о его состоянии. Свежее зерно имеет характерный, приятный аромат. Запах рыбы указывает на наличие в продукте спор грибков, а горький запах свидетельствует о том, что жир в составе зерна (обычно дробленого) окислился и прогорк. Сладковатый запах может быть признаком того, что зерно было собрано в сыром виде и под воздействием низких температур (возможно, заморозков) при хранении часть крахмала преобразовалась в сахара, либо зерно начало прорастать. Медовый запах указывает на значительное поражение зерна клещами. Хлебный или спиртовой запах возникает у зерна, пораженного дрожжами, а затхлый аромат говорит о заражении плесенью. Результаты скармливания зерновых кормов, их питательная ценность и степень усвояемости зависят не только от типа зерна, но и от методов его обработки. Зерновой корм можно готовить различными способами: проращивание, измельчение, запаривание после измельчения, плющение, поджаривание, микронизация, экструзия, осолаживание и дрожжевание [1].

Концентрированные корма характеризуются высоким содержанием питательных веществ (белков, жиров, углеводов) при небольшом объеме. Они являются основным источником энергии и белка для животных. К основным видам концентрированных кормов относят зерновые (пшеница, ячмень, кукуруза, овес), продукты переработки зерновых и масличных культур (отруби, жмых и шроты), бобовые культуры (горох, соя).

Основная часть

Проверка концентрированных кормов – один из основных приемов зоотехнического контроля. В этом случае сопоставляют фактическую питательность рациона с потребностью животных (для конкретной производственной группы коров) в энергии, протеине, углеводах, жире, минеральных веществах и витаминах.

Принципы составления полноценных рационов и их оптимизация для получения максимальной рентабельности производства молока сводятся к следующим основополагающим аспектам:

– использование фактических данных по питательности кормов;

– при определении нормы кормления необходимо учитывать все факторы, влияющие на ее величину, такие как живая масса (ЖМ), период лактации, суточный удой, состав молока, возраст, балл упитанности, условия содержания и т. д.;

– достижение минимально необходимой концентрации обменной энергии в 1 кг сухого вещества наряду с обеспечением необходимого уровня потребления сухого вещества – это основное условие для достижения запланированного суточного удоя [2, 3].

Представителем системы интеллектуального кормления является система кормления со встроенным анализатором кормов (DTM IC CLOUD + анализатор кормов NIR) (рисунок 1). Система корректирует рацион по сухому веществу в режиме реального времени.

Данная система представляет собой комплекс оборудования и программного обеспечения, позволяющего проводить корректировку рациона по сухому веществу на лету при загрузке компонентов в кормосмеситель. Основу системы составляют программа DTM IC и система контроля приготовления и раздачи кормов на базе программируемого весового терминала DG 8000 IC, а также анализатор кормов, встраиваемый в ковш погрузчика. Система монтируется на самоходных кормосмесителях.

Зоотехник, используя программу DTM IC, программирует технологию кормления и передает данные на весовой индикатор кормосмесителя. Погрузчик при загрузке компонента, например, силоса, набирает компонент и нажимает кнопку анализа. Через 15 сек система выдает 7 химических показателей и предлагает скорректировать вес загружаемого компонента, исходя из новых данных по сухому веществу. Механизатор нажимает кнопку «ввод» на компьютере или мобильном устройстве, и система автоматически меняет вес компонента на весовом терминале кормосмесителя. Анализ может проводиться сколько угодно раз.

Таким образом получается полностью сбалансированная смесь корма по сухому веществу. Фактически можно добиться тотального контроля над процентным содержанием сухого вещества в смеси.

Недостатком данной системы является высокая стоимость и невозможность добавления в рацион жидких компонентов [4].



Рисунок 1 – Система интеллектуального кормления со встроенным анализатором кормов (DTM IC CLOUD + анализатор кормов NIR)

Существует также инфракрасный анализатор кормов (зерна пшеницы, силоса трав, ОСР и др.) производства итальянской компании Dinamica Generale (рисунок 2).

Портативный анализатор кормов AgriNiR выполнен в виде чемодана. Он имеет ударопрочный корпус, колесики и ручку для удобства перевозки. Прибор запитывается от розетки 220 В или от прикуривателя автотранспорта. Фактически прибор выполняет функцию передвижной лаборатории. Это единственный прибор в своем роде, способный за 15 сек. провести измерение образца.

Портативный экспресс-анализатор кормов AgriNiR является полноценной мобильной лабораторией, способной всего за 1 мин произвести анализ зерна (пшеницы, сои, кукурузы), ОСР, силоса трав, шрота, сенажа и других кормов.

Использование данного прибора позволит более точно сбалансировать рацион питания КРС, что в свою очередь приведет:

– к увеличению жирности молока;

– экономии кормов;

– улучшению здоровья и продуктивности крупного рогатого скота (КРС).

Принцип работы прибора основан на электромагнитном излучении в ближней инфракрасной зоне спектра. ИК-анализатор кормов идеально подходит для ферм КРС и молочных хозяйств. Для проведения анализа не нужно делать пробоподготовку. В любом месте и всего за несколько минут зоотехник может произвести анализ питательности корма и сбалансировать рацион питания КРС. Базовая версия прибора – 7 видов корма, без анализа зерна. По желанию можно приобрести дополнительные анализируемые показатели.

БИК-анализатор кормов AgriNIR имеет интерфейс и руководство по эксплуатации на русском языке, что упрощает работу. Результаты анализа зерна передаются сразу на программу управления кормлением стада. Прибор очень компактен, что позволяет использовать его повсеместно. Дополнительным преимуществом является адаптация к суровым условиям эксплуатации, что актуально для северных районов страны. Прибор практически не требует технического обслуживания [5].

Недостатком данного анализатора является высокая стоимость и то, что он работает только от розетки или прикуривателя.

Известен также ручной анализатор (рисунок 3) для кормов и зерна, который измеряет массовую долю (в процентах) влаги (сухого вещества), крахмала, сырого протеина, клетчатки (КДК и НДК), золы и сырого жира в кормах и кормовом сырье за несколько секунд. Позволяет контролировать рацион в режиме реального времени ежедневно.

X-NIR выполняет полный БИК-анализ менее чем за одну минуту, результаты могут храниться во внутренней памяти анализатора X-NIR или на USB-накопителе. С помощью портативного БИК-анализатора X-NIR можно за несколько секунд измерить не только содержание сухого



Рисунок 2 – Портативный экспресс анализатор кормов AgriNiR (стандарт)



Рисунок 3 – X-NIR портативный экспресс БИК-анализатор кормов и зерна



Рисунок 4 – Программа управления данными

вещества, но также содержание протеина, сырого жира, золы, ADF, NDF и другие показатели питательной ценности. Для работы с анализатором X-NIR не требуется никаких специальных знаний: оператор просто выбирает объект анализа, номер образца и количество его сканов при каждом анализе, а затем нажимает на кнопку пуска. Анализатор X-NIR прямо повышает рентабельность хозяйства, позволяя значительно увеличить количество анализов на рабочем месте без увеличения стоимости анализа. Недостатками данного анализатора является то, что используется он только вручную и то, что у него невысокая точность измерения.

ПО NIRTM Trace является программой управления данными (рисунок 4), которая позволяет собирать и отображать результаты БИК-анализа, а также обеспечивает ведение архива данных анализов для анализатора; возможность выбирать показатели и проводить тщательную статистическую обработку; вывод в PDF и Excel форматах данных о всех анализах, хранящихся в базе ПО; отслеживание работы нескольких анализаторов с использованием различных идентификаторов приборов IDs; построение графиков, возможность вывода различных графиков на один экран; перенос данных из ПО NIRTM Trace в анализатор X-NIRTM и обратно. Обзор данных клиента – прямо на экране анализатора X-NIRTM; все результаты анализов переносятся в ПО NIR™ Trace, а затем в ПО DTM™ IC, чтобы было легко пересчитать рацион, используя реальные значения его показателей [6].

Автоматическая система корректировки рациона по сухому веществу для фронтального погрузчика представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Система оптимального кормления для прицепного миксера и фронтального погрузчика

Данная система предназначена для организации оптимального кормления на ферме. Суть системы заключается в ее способности проводить экспресс-анализ кормов в реальном времени и производить корректировку веса компонента, необходимого к загрузке на лету. Вы фактически получаете портативную лабораторию на своем самоходном миксере.

Программа управления данными системы представлена на рисунке 6.

Система DG Precision FEEDING-FL работает следующим образом:

– базовые значения химических показателей для каждого из компонентов вводятся в ПО управления кормлением DTM IC™, основываясь на результатах лабораторных анализов. Рецепт кормления вводится специалистом по кормлению;

– введенные рационы передаются по беспроводной связи из ПО DTM IC на весовой индикатор DG 8000 IC, установленный на тракторе или кормосмесителе;

– БИК-анализатор IRM устанавливается в ковш фронтального погрузчика и выполняет БИК-анализ сухого вещества и прочих химических показателей компонентов корма при загрузке рациона в реальном времени;

– результаты анализа передаются по беспроводной связи на индикатор DG 8000 IC, который корректирует загружаемый вес каждого из компонентов, основываясь на реальных значениях сухого вещества, для соответствия рекомендациям специалиста по кормлению;

– скорректированный загружаемый вес передается по беспроводной связи на ПДУ Dina Tel 3 для оператора фронтального погрузчика;

– оператор погрузчика получает возможность точно загрузить вес компонентов ОСР для максимального соответствия рациона рекомендациям специалиста по кормлению;

– коровы получают оптимальный сбалансированный рацион, в результате повышается продуктивность и улучшается здоровье животных при снижении затрат на кормление, уменьшении количества несъеденного корма и расхода компонентов;

– все данные по загрузкам и раздачам ОСР сохраняются на индикаторе DG 8000 IC и передаются по беспроводной связи в ПО DTM IC, установленное в офисе фермы;

– ПО DTM IC сохраняет все данные и создает подробные статистические отчеты, на основании которых специалист по кормлению может вносить коррективы в технологические процессы на ферме для повышения продуктивности [7].

Недостатком данного анализатора является высокая стоимость.

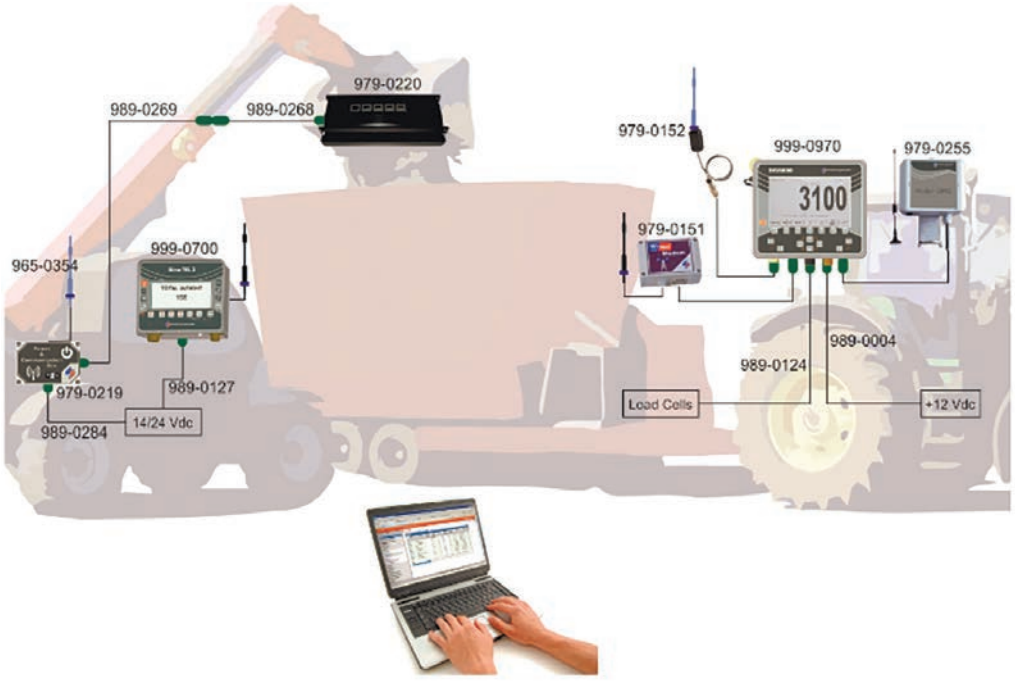


Рисунок 6 – Программа управления данными системы

Заключение

Современные компьютерные технологии и специализированные программные продукты позволяют оперативно разрабатывать оптимизированные кормовые рационы для различных производственных групп животных с учетом планируемой продуктивности. Главная задача заключается в точной дозированной выдаче сбалансированных кормовых рационов коровам с учетом пола, возраста и состояния здоровья, обеспечивая необходимое белково-витаминно-минеральное соотношение и количество. В связи с этим необходимость в разработке отечественного экспресс-анализатора, который будет устанавливаться в бункер кормораздатчика для измерения качественных показателей кормов, является актуальной задачей.

Список использованных источников

1. Иванов, А. В. Качество зерновых компонентов в рационах сельскохозяйственных животных: показатели и риски / А. В. Иванов, М. С. Петрова, К. Н. Сидоров // Вестник животноводства. – 2022. – № 48 (1). – С. 45–52.

2. Кузнецова, Е. Л. Влажность зерна как фактор порчи кормов и ее влияние на продуктивность скота / Е. Л. Кузнецова, В. П. Михайлов // Журнал аграрной науки. – 2020. – № 9 (3). – С. 112–119.

3. Лебедев, С. Т. Оценка качества зернового сырья для кормления животных: внешние и внутренние показатели / С. Т. Лебедев, Т. А. Романова // Сельскохозяйственная биология. – 2019. – № 54 (5). – С. 789–796.

4. NIRS DA1650 Анализатор для кормов и силоса, Foss : оф. сайт ООО «Колба». – Воронеж, 2026. – URL: https://kolba24.ru/product/nirs_da1650 (дата обращения: 05.09.2025).

5. Портативный экспресс анализатор кормов AgriNiR (стандарт) : оф. сайт компании «Про Ферма». – СПб., 2026. – URL: https://pro-ferma.ru/catalog/sistemy-yekspress-analiza-kormov-krs/portativnyi-yekspress-anali-item1 (дата обращения: 05.09.2025).

6. Анализатор кормов X-NIR (портативный) : оф. сайт ООО «Колба». – Воронеж, 2026. – URL: https://kolba24.ru/product/x-nir (дата обращения: 05.09.2025).

7. Система оптимального кормления DG Precision FEEDING™ : сайт компании «Динамика развития». – Мн., 2020–2026. – URL: https://dynamic.by/sistema-optimalnogo-kormleniya-dg-precisionfeedingtm.html (дата обращения: 05.09.2025).

УДК: 631.353.24

Поступила в редакцию 16.01.2016
Received 16.01.2016

Э. В. Дыба, А. М. Хартанович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАГОТОВКИ СУРЕПИЦЫ НА ЗЕЛЕНЫЙ КОРМ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности возделывания озимой сурепицы на зеленый корм, а также представлен обзор и анализ технологий заготовки сурепицы на корм.

Ключевые слова: технология, показатели, урожайность, корма, сурепица, силосование, сенажирование, приготовление сена, гранулирование, питательность.

E. V. Dyba, A. M. Khartanovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

SUREPITSA PROCUREMENT TECHNOLOGY ANALYSIS TO GREEN FEED

Abstract. The article discusses the peculiarities of cultivating winter marmot for green feed, and also provides an overview and analysis of the technologies for harvesting marmot for feed.

Keywords: technology, indicators, yield, feed, marmot, silage, hay cutting, hay preparation, granulation, nutrition.

Введение

В республике сурепицей ежегодно засеивается около 51 тыс. га, из которых порядка 50 тыс. – на корм (ранний корм и белковый концентрат). В семенах сурепицы содержится 33–42 % масла, которое по своим свойствам приближается к маслу рапса. Применяют масло в основном для технических целей в различных отраслях промышленности (мыловаренной, лакокрасочной, металлургической), а также для производства биодизельного топлива. Жмых содержит до 40 % полноценного белка и является хорошим концентрированным кормом для животных [1–4].

Скармливают его небольшими дозами, так как в нем содержатся вредные для организма животных глюкозиды. В зеленой массе сурепицы содержится до 25 % протеина в пересчете на сухое вещество, много витаминов и минеральных веществ и мало клетчатки. В сухом веществе этой культуры содержится обменной энергии – 11 МДж, сырого протеина – 18–24 г, сахара – 10–14 г, КДК – 22–24 %, НДК – 55–67 %, протеина – до 29 %. Химический состав варьирует в зависимости от сорта, агрофона, времени уборки урожая, фазы вегетации, почвенно-климатических условий [2–4].

Фазы развития у сурепицы: всходы, листообразование, осенне-зимний покой у озимой сурепицы, возобновление вегетации весной, стеблевание, бутонизация, цветение, семяобразование, зеленая спелость, восковая спелость, техническая спелость, полная спелость. Сурепица более низкорослая и скороспелая культура, чем рапс, так как фазы проходят быстрее.

Озимая сурепица зимует в фазе развитой розетки из 6–8 листьев. Розетка имеет приземистый вид, точка роста не вытягивается вверх, а перед наступлением зимы за счет сокращения гипокотиля и главного корня втягивается в почву. В связи с этим озимая сурепица обладает более высокой зимостойкостью, чем рапс. Цветение яровой сурепицы начинается через 30–45 дней

после появления всходов и продолжается 20–30 дней. Растения озимой сурепицы зацветают на 5–7 дней и созревают на 10–15 дней раньше озимого рапса. Продолжительность вегетационного периода озимой сурепицы составляет 310–330 дней, а яровой – 75–90.

Яровая сурепица – одна из самых скороспелых масличных культур. По урожайности она уступает яровому рапсу на 5–6 ц/га. Выращивание ее оправдано в северных районах республики и на легких почвах. Дает в основном техническое масло. В перспективе – возделывание 000-сортов с низким содержанием эруковой кислоты, глюкозинолатов и клетчатки, что позволит более широко использовать ее на пищевые и кормовые цели.

Основная часть

Озимую сурепицу возделывают на плодородных дерново-подзолистых супесчаных, легко- и среднесуглинистых почвах, подстилаемых моренным суглинком. Посевы можно размещать на легких и торфяно-болотных почвах, где озимая сурепица дает более стабильные урожаи, чем озимый рапс. Для возделывания озимой сурепицы пригодны почвы с pH 5,8–6,0, содержанием подвижного фосфора и обменного калия не менее 100 мг/кг почвы, гумуса – не ниже 1,2 %. Для успешной перезимовки посевы озимой сурепицы следует размещать преимущественно на северных, восточных и северо-восточных склонах. Вероятность перезимовки озимой сурепицы выше в юго-западных регионах, при тщательном соблюдении технологии возделывания эта культура успешно возделывается во всех регионах республики [5, 6].

Хорошими предшественниками озимой сурепицы являются культуры, рано освобождающие поле: многолетние травы после первого укоса, однолетние травы на зеленый корм, ранний картофель, зернобобовые и раноубираемые зерновые. Сурепица является хорошим предшественником для всех зерновых культур. На прежнее поле посевы озимой сурепицы возвращают не ранее, чем через 3–4 года. При размещении в одном хозяйстве посевов рапса и сурепицы необходимо соблюдать пространственную изоляцию: 500 м при отсутствии преград (лес, многолетние насаждения, строения) и 250 м при их наличии.

Основной обработкой почвы под посев озимой сурепицы является вспашка в агрегате с кольчато-шпоровым катком или пакером, прикатывание или выравнивание с прикатыванием проводятся перед посевом. Разрыв от вспашки до посева сурепицы должен быть не менее двух недель. Предпосевная обработка почвы проводится в день посева или не раньше, чем за 1 день до посева. Основное условие обработки: верхний слой почвы должен быть рыхлым, а с глубины 2–3 см – уплотненным. Для предпосевной обработки почвы используют комбинированные посевные агрегаты типа Amazone, Horsch, Lemken, АКК-6 и др., а также комбинированные агрегаты АКШ-6, АКШ-7,2 или применяют сцепку культиватор-борона-каток [5, 6].

Озимая сурепица отличается повышенным выносом элементов питания. Дозы минеральных удобрений рассчитывают балансовым методом с учетом планируемого урожая и содержания элементов питания в почве. При урожайности 25–30 ц/га оптимальная доза внесения минеральных удобрений составляет $N_{120–150}$ $P_{60–80}$ $K_{100–150}$. Органические удобрения вносят под предшествующую культуру. Минеральные удобрения вносят: фосфорные, калийные и 1/4 (30–40 кг/га) нормы азотных – под основную или предпосевную обработку почвы, при посеве по зерновому предшественнику или на бедных почвах. Оставшуюся часть азотных удобрений – весной в один-два приема. Первая весенняя азотная подкормка проводится с наступлением весенней вегетации при установлении успешной перезимовки при наличии не менее 40 шт/м^2 живых хорошо развитых растений. В первую подкормку вносится основная доза азота – 100–120 кг/га. При необходимости вторая подкормка проводится в фазе стеблевания – начала бутонизации в норме 30–40 кг/га. Лучшая форма азотных удобрений – карбамид, аммиачная селитра. Сульфат аммония вносят только в первую основную подкормку. При наличии в почве бора менее 1 мг/кг под озимую сурепицу используют борные удобрения: борсодержащий суперфосфат, борную кислоту, буру в дозах 1,5–2,0 кг бора на 1 га. Минеральные удобрения, обогащенные микроэлементами, вносят как основное удобрение или локально сеялкой в рядки. При их отсутствии готовят путем механического смешивания. Основным способом внесения микроэлементов являются внекорневые

подкормки, которые совмещают с внесением азотных удобрений и обработкой средствами защиты растений [5].

Микроэлементы (200–250 г/га бора, 100–150 г/га молибдата аммония, 300–350 г/га сульфата меди и др.) предварительно растворяют в небольшом объеме теплой воды, смешивают с раствором азотных удобрений и пестицидов или используют комплексные хелатные микроудобрения Эколист, Адоб, Басфолиар и др. Расход воды – 250–300 л/га. Обработку посевов проводят опрыскивателями – Мекосан, Berthud Boxer, Rau, Rall, Jecto и др. Под озимую сурепицу пригодны почвы со слабощелочной и нейтральной реакцией (pH 5,8–6,0). При повышенной кислотности их следует обязательно произвестковать перед посевом предшественника. Известкование проводят с предпочтением Mg-содержащих известковых удобрений, рассчитанных по гидролитической кислотности почв [5, 6].

Для посева используют семена районированных и перспективных сортов озимой сурепицы трехнулевого качества (содержание эруковой кислоты – не более 1 %, глюкозинолатов – 15–20 мкМоль/г сухого вещества или не более 0,6–0,8 %). Мировым стандартам соответствует районированный отечественный сорт Вероника. Сорт озимой сурепицы Вероника выведен в РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию». Семена желтые или сизо-желтые, округлые. Масса 1 000 семян – 2,6–3,5 г. Урожайность семян в среднем за три года испытания составила 28,8 ц/га. Максимальный урожай – 49,8 ц/га получен в 2007 г. в Горецком Госсортоучастке. Содержание жира в семенах – 44–52 %, эруковой кислоты – 0 %, глюкозинолатов – 12–15 мкМоль/г. Зимостойкость – 72–76 %, вегетационный период – 315–327 дней. Сорт Вероника устойчив к осыпанию и среднеустойчив к поражению альтернариозом. Для посева используют кондиционные семена, откалиброванные (здоровые, спелые, чистые). Не допускаются к посеву семена щуплые, очень мелкие, недоразвитые, с наличием в них карантинных сорняков, вредителей и болезней [5, 6].

Перед посевом семена озимой сурепицы протравливают. Протравливание семян рекомендуется проводить в сочетании с микроэлементами (B – 200 г (борная кислота), Mn – 300 г/т семян), Эколист Моно бор 1,0 л/т + Эколист рапс 1,0 л/т + Эколист РК 1,0 л/т и др. Для протравливания семян сурепицы используют машины Xere-11, Ребер, ПС-10, ПС-10А, Мобитокс-супер и др. Регулируют протравочные машины на заданный режим работы в соответствии с требованиями инструкций по эксплуатации. После инкрустации семена должны быть равномерно покрыты препаратами, влажность семян не должна превышать 12–14 % [5, 6].

Оптимальным сроком сева является вторая-третья декада августа. На юге республики посев озимой сурепицы на семена должен быть завершен до 1 сентября. Оптимальная густота стояния растений перед уходом в зиму должна составлять 80–140 шт/м^2, после перезимовки – 70–120 растений на 1 м^2. Глубина заделки семян зависит от гранулометрического состава почвы: на легких песчаных почвах их заделывают на глубину 1,5–2,0 см, на суглинистых – 1,0–1,5 см. Способ посева озимой сурепицы – сплошной рядовой. Для посева сурепицы используют комбинированные посевные агрегаты типа Amazone, Horsch, Lemken, АПП-6 и другие или сеялки СПУ и СПР-6. Перед уходом в зимовку растения сурепицы должны иметь хорошо развитую корневую систему и розетку листьев [5].

Поле, предназначенное для посева озимой сурепицы, должно быть чистым от многолетних сорняков. При высокой их численности обрабатывается заблаговременно (за 1,5 месяца) до посева озимой сурепицы глифосатсодержащими препаратами (Раундап, Глиалка и др.). Условия проведения химпрополки озимой сурепицы: температура – 15–20 °С, скорость ветра до 5 м/с. При температуре воздуха ниже 10 °С и выше 20 °С эффективность химпрополки значительно снижается.

В посевах озимой сурепицы наиболее вредоносны крестоцветные блошки, рапсовый цветоед и скрытнохоботники, а из болезней – альтернариоз, склеротиниоз, серая гниль, пероноспороз, черная ножка и тифулез. Обработку посевов проводят опрыскивателями – Мекосан, Berthud Boxer, Rau, Rall, Jecto и др. Рабочий раствор готовят на АПЖ-12. Норма расхода рабочей жидкости – 200 л/га. При работе опрыскивателей штанги располагают над растениями на расстоянии, обеспечивающем смыкание факелов распыла расположенных рядом распылителей (500–700 мм).

Движение опрыскивающих агрегатов осуществляется вдоль рядков челночным способом с петлевыми поворотами. Скорость движения агрегатов поддерживают такой, на которой проводилась регулировка опрыскивателя на заданный режим работы. Маневрирование скоростями в процессе работы не допускается. Установленная норма расхода рабочей жидкости не должна меняться, периодически в течение смены проверяют и прочищают распылители и фильтры.

Уборку сурепицы необходимо начинать в фазе бутонизации – начало цветения (высота растений 25–40 см) – максимальное содержание протеина (16–22 %) и энергии, поздние фазы (цветение – образование стручков) приводят к огрубению стеблей и снижению кормовой ценности. Скашивание сурепицы проводят рано утром до 8–9 ч. Площадь убираемых трав должна соответствовать возможности быстрой уборки с поля при достижении оптимальной влажности. Высота скашивания – 8–12 см. Увеличение высоты среза растений на 1 см приводит к недобору урожая 2–3 ц/га. При более низком срезе масса загрязняется землей. Не допускается уборка прямым комбинированием по причине низкой концентрации сухого вещества в сенажируемой массе, поэтому растительную массу необходимо провяливать [5, 6].

Для скашивания трав применяют тракторные и самоходные косилки с ротационными и сегментно-пальцевыми режущими аппаратами, а также косилки-плющилки с ротационными режущими аппаратами. Для ускорения провяливания сурепицу плющат профилированными резиновыми вальцами. Благодаря такой обработке скорость сушки увеличивается на 35 %.

Существенное влияние на скорость сушки трав оказывает способ укладки скошенной массы в валок или расстил. Известно, что валки массой 8–10 кг/п. м сохнут в 3–4 раза дольше в сравнении с массой, уложенной в прокос (расстил). При урожайности сурепицы более 150 ц/га ее скашивают в прокос (расстил). В прокосах массу провяливают до 60–70 %, собирают в валки и досушивают до необходимой влажности [5, 6].

При заготовке сурепицы в полимерные материалы сельскохозяйственного назначения (агрострейч-пленка, полимерный рукав) первое ворошение скошенной массы рекомендуется проводить по мере просыхания верхнего слоя в валке (прокосе) до влажности 70 %, но не позже 2 ч после скашивания, затем через 2–3 ч по мере необходимости.

Для определения влажности массы применяют стационарные влагомеры (ВЧ, ВЗМ) или переносные (ВЛК-0,1). При отсутствии приборов – визуально следующими методами:

– при сжимании в горсти измельченные растения становятся влажными, но сока не выделяют, после разжимания руки комок рассыпается;

– из равномерно провяленной массы скрутить жгут и, если не наблюдается выделение сока, масса готова для подбора, влажность ее не более 60 %.

Подбор валков для приготовления сенажа начинают при влажности в среднем не менее 65 %, чтобы убрать основное количество массы с влажностью не менее 60 % (сухое вещество массы в среднем – 35–40 %).

При закладке измельченной массы в полимерный рукав в качестве упаковочного материала используется полимерный многослойный рукав диаметром 2,2–2,7 м и длиной до 75 м. Один рукав вмещает до 350 т сенажной массы. Этот способ отличается тем, что провяленная масса подбирается самоходным комбайном-измельчителем и подается в транспортные средства для доставки к месту закладки на хранение в полимерный рукав. При этом длина резки массы должно составлять 3–5 см. Поступающая к месту закладки масса выгружается в приемный бункер пресс-упаковщика, захватывается прессующим ротором и нагнетается в полимерный рукав. Плотность прессования кормов в рукаве в зависимости от влажности массы должна составлять не менее 650 кг/м^3 [5, 6].

В процессе ферментации корма выделяются газы, которые необходимо удалять из внутренней полости сразу же после загрузки и герметизации рукава. Для этого в 2–3 местах вставляют в рукава специальные дыхательные клапаны (или в рукаве делают надрез), которые закрываются после прекращения обильного газовыделения, примерно на 2–3 день после загрузки.

Сурепица – ценная кормовая культура с высоким содержанием протеина (16–22 %), но требует правильной заготовки, соблюдения оптимальных сроков, чтобы избежать потерь питательных веществ и проблем с перевариваемостью у животных. Качество основных видов кормов должно соответствовать требованиям ГОСТ 4808-87 (сено), ГОСТ 23637-90 (сенаж), ГОСТ 23638-90 (силос

из зеленых растений). Рассмотрим основные технологии заготовки сурепицы: силосование, сенажирование, приготовление сена и гранулирование [5–7].

Силосование сурепицы – это основной способ заготовки сочной массы с высокой влажностью (65–80 %). Оптимальная фаза скашивания: бутонизация – начало цветения (максимум протеина, минимум клетчатки).

Технология силосования сурепицы включает следующие операции (рисунок 1):

– прямое комбайнирование с измельчением (длина резки составляет 2–4 см) с одновременным внесением консервантов (биологические закваски: молочнокислые бактерии – «Биотроф», «Лаксил»; химические консерванты: муравьиная кислота, бензойнокислый натрий). Используются кормоуборочные агрегаты типа КВК-8060, КВК-800, Ягуар, Кроне, Джон-Дир, Нью Холонд и др.;

– транспортировка к месту трамбовки и последующего хранения. Используются прицепы и полуприцепы типа ПС-30-1, ПС-45, ПС-45А, ПС-60А, ПС-60Б, AMKODOR US303D, AMKODOR US213W, ПСС-36, ПСС-25, ПСС-20, ПСС-15 и др.;

– трамбовка и герметизация (укладка слоями по 30–40 см с тщательным уплотнением). Используются агрегаты типа Амкодор с навесным оборудованием, Кировец с навесным оборудованием, АРУК-5, КУС-5 и др.;

– укрытие пленкой и грузом (исключение доступа воздуха);

– хранение: 2–3 месяца (до скармливания).

В качестве плюсов силосования сурепицы можно отметить сочность и питательность корма, а также то, что он подходит для КРС, свиней, овец. В качестве минусов – риск закисания при нарушении технологии, а также невозможность скармливания сразу после закладки (нужно время для ферментации).

Сенажирование сурепицы – это альтернатива силосу при влажности 45–55 %. Технология включает следующие операции (рисунок 2):

– скашивание врастил или валки. Используются косилки типа КПР-9, КМР-9, КДН-310, КДП-3,1, КДН-210, КДН-240, КДН-9 и др.;

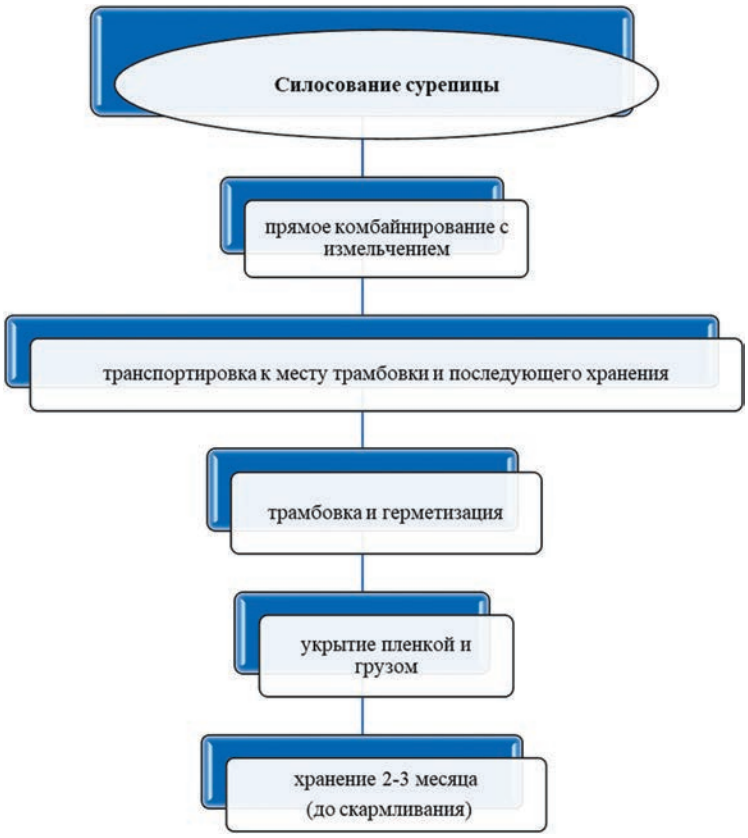


Рисунок 1 – Технология силосования сурепицы

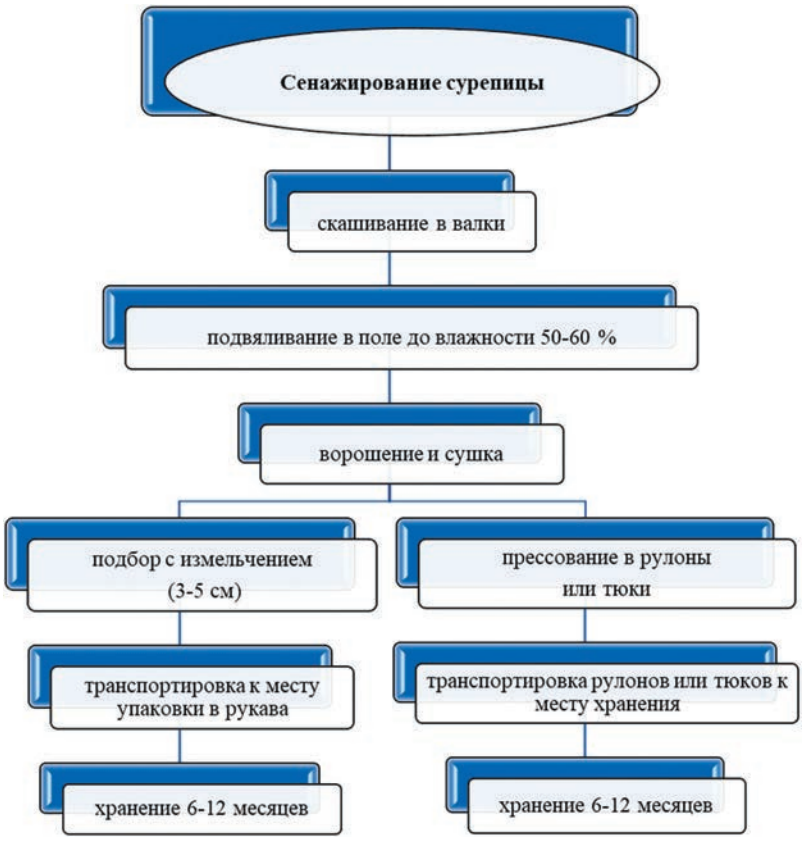


Рисунок 2 – Технология сенажирования сурепицы

– подвяливание в поле до влажности 50–60 % (1–2 дня в солнечную погоду);

– ворошение и сушка граблями-ворошилками. Используются грабли типа ГВР-420, ГВР-630, ГР-700П, ГВЦ-6,6, ГВБ-6,2, ГРЛ-8,5, ГРЛ-9,6, ГРЛ-9,6-01, ГРЛ-10,6, ГРЛ-11,7, ГК-630, ГВ-7,2/9,6 «Берестье», ГВВП-6,0 и др.;

– подбор с измельчением (3–5 см). Используются кормоуборочные агрегаты тип: КВК-8060, КВК-800, Ягуар, Кроне, Джон-Дир, Нью Холонд и др.;

– транспортировка к месту упаковки в рукав (полиэтиленовые пленки). Используются прицепы и полуприцепы типа ПС-30-1, ПС-45, ПС-45А, ПС-60А, ПС-60Б, AMKODOR US303D, AMKODOR US213W, ПСС-36, ПСС-25, ПСС-20, ПСС-15 и др.;

– прессование в рулоны или тюки (в пленке, по 200–300 кг) с последующей герметизацией (исключение доступа воздуха). Используются пресс-подборщики типа РППО «Фьюжн», РППО «Фьюжн-Ф5500», РППО «Фьюжн-Ф5500», РППО «Фьюжн Плюс», Кроне, Класс и др.;

– транспортировка рулонов или тюков к месту хранения. Используются прицепы типа ПМК-10, ПТР-12С, ПТК-10-2, ПТК-10-3, AMKODOR STS102P и др.;

– хранение: 6–12 месяцев.

Плюсы сенажирования сурепицы: меньше потерь питательных веществ, чем при силосовании; удобство транспортировки (тюки, рукав). Минусы: требует точного контроля влажности; дороже силоса из-за упаковки.

Приготовление сена из сурепицы – это заготовка сухого корма (влажность 14–17 %). Технология включает следующие операции (рисунок 3):

– скашивание в валки. Используются косилки типа КПР-9, КМР-9, КДН-310, КДП-3,1, КДН-210, КДН-240, КДН-9 и др.;

– ворошение и сушка граблями-ворошилками. Используются грабли типа ГВР-420, ГВР-630, ГР-700П, ГВЦ-6,6, ГВБ-6,2, ГРЛ-8,5, ГРЛ-9,6, ГРЛ-9,6-01, ГРЛ-10,6, ГРЛ-11,7, ГК-630, ГВ-7,2/9,6 «Берестье», ГВВП-6,0 и др.;

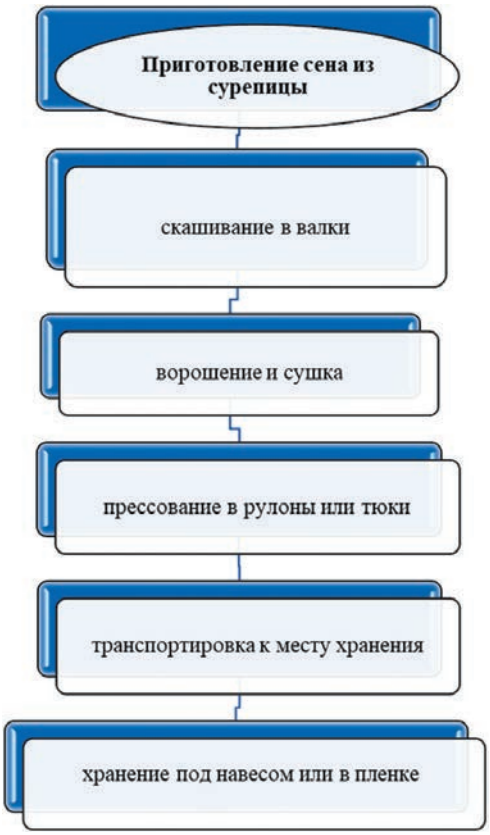


Рисунок 3 – Технология приготовления сена из сурепицы

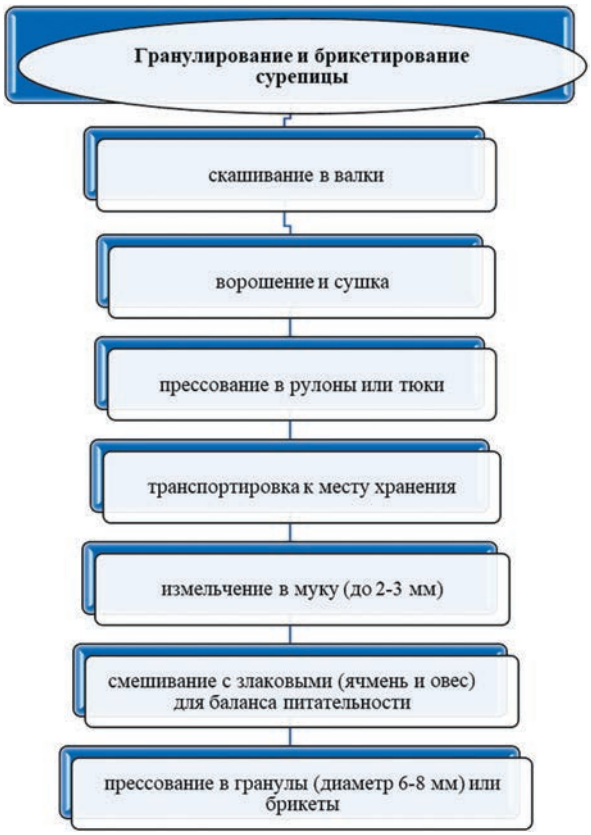


Рисунок 4 – Технология гранулирования и брикетирования сурепицы

– прессование в рулоны или тюки (круглые или прямоугольные). Используются пресс-подборщики типа РППО «Фьюжн», РППО «Фьюжн-Ф5500», РППО «Фьюжн-Ф5500», РППО «Фьюжн Плюс», Кроне, Класс и др.;

– транспортировка к месту хранения. Используются прицепы и полуприцепы типа ПМК-10, ПТР-12С, ПТК-10-2, ПТК-10-3, AMKODOR STS102P и др.;

– хранение под навесом или в пленке.

Плюсы приготовления сена из сурепицы: долгий срок хранения (1–2 года); удобно для транспортировки. Минусы: большие потери листьев (осыпание); снижение протеина при пересушивании.

Гранулирование и брикетирование сурепицы применяется для приготовления комбикорма и удобного хранения. Технология включает следующие операции (рисунок 4):

– скашивание в валки. Используются косилки типа КПР-9, КМР-9, КДН-310, КДП-3,1, КДН-210, КДН-240, КДН-9 и др.;

– ворошение и сушка граблями-ворошилками. Используются грабли типа ГВР-420, ГВР-630, ГР-700П, ГВЦ-6,6, ГВБ-6,2, ГРЛ-8,5, ГРЛ-9,6, ГРЛ-9,6-01, ГРЛ-10,6, ГРЛ-11,7, ГК-630, ГВ-7,2/9,6 «Берестье», ГВВП-6,0 и др.;

– прессование в рулоны или тюки (круглые или прямоугольные). Используются пресс-подборщики типа РППО «Фьюжн», РППО «Фьюжн-Ф5500», РППО «Фьюжн-Ф5500», РППО «Фьюжн Плюс», Кроне, Класс и др.;

– транспортировка к месту хранения. Используются прицепы и полуприцепы типа ПМК-10, ПТР-12С, ПТК-10-2, ПТК-10-3, AMKODOR STS102P и др.;

– измельчение в муку (до 2–3 мм);

– смешивание со злаковыми (ячмень, овес) для баланса питательности;

– прессование в гранулы (диаметр 6–8 мм) или брикеты.

Плюсы гранулирования и брикетирования сурепицы: компактное хранение; удобно для смешивания в рационах; минусы – дорогое оборудование; теряет часть витаминов при термообработке.

Заключение

На современном этапе развития сельского хозяйства актуальной остается проблема обеспечения населения продуктами питания отечественного производства и экспорта их за рубеж. В решении этой задачи основным направлением является увеличение производства высокобелковых кормов для животноводства. В последние годы на полях Республики Беларусь получила распространение масличная культура из семейства крестоцветных – сурепица, которая характеризуется высокой продуктивностью, скороспелостью и эффективно используется в качестве зеленого концентрата.

Рассмотрев основные технологии заготовки сурепицы – силосование, сенажирование, приготовление сена и гранулирование, – можно отметить, что для КРС лучше подходит в виде силоса или сенажа; для свиней – ограниченно (из-за глюкозинолатов); овцы и козы хорошо поедают в свежем и силосованном виде. Кроме того, следует отметить, что нельзя скармливать поздно убранную сурепицу (много клетчатки, плохая переваримость). При силосовании избегать попадания земли (риск ботулизма). Главное – убирать в ранние фазы (бутонизация) и соблюдать технологию консервации.

Оптимальный способ заготовки зависит от возможностей хозяйства: для максимальной сочности – силос; для долгого хранения – сенаж или сено; для комбикормов – гранулирование.

Список использованных источников

1. Программный комплекс мер по развитию кормопроизводства на 2021–2025 годы, утв. заместителем Премьер-министра Респ. Беларусь от 16 марта 2021 г. № 06/217-261/220.

2. Технология возделывания яровой сурепицы в Нечерноземной зоне (практическое руководство). – М. : РГАУ–МСХА, 2012. – 31 с.

3. Лукашевич, Н. П. Основы ботаники, агрономии и кормопроизводства. Практикум : учеб. пособие / Н. П. Лукашевич [и др.]. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2010. – 432 с.

4. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур : учеб.-метод. пособие / И. Р. Вильдфлуш [и др.] ; под ред. И. Р. Вильдфлуша, П. А. Саскевича. – Горки : БГСХА, 2016. – 383 с.

5. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, кормовых и технических растений : сборник отраслевых регламентов / НАН, РУП «НПЦ НАН Беларуси по земледелию» ; под ред. В. Г. Гусакова и Ф. И. Привалова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2023. – 506 с.

6. Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси : сб. науч. тр. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по земледелию». – 3-е изд., перераб. и доп. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2017. – 688 с.

7. Особенности технологий и техническое обеспечение заготовки кормов из трав и силосных культур : оф. сайт РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2017–2026. – URL: https://belagromech.by/news/osobennosti-tehnologij-i-tehnicheskoe-obes-pechenie-zagotovki-kormov-iz-trav-isilosnyhkultur (дата обращения: 11.03.2025).

УДК: 631.353.24

Поступила в редакцию 10.01.2026
Received 10.01.2026

Э. В. Дыба, А. М. Хартанович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВАЛКОВАНИЯ СУРЕПИЦЫ ГРЕБЕНЧАТЫМИ ГРАБЛЯМИ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Аннотация. В статье представлены исследования по оценке качества валкования сурепицы гребенчатыми граблями ГВГ-9,5 методом регрессионного анализа.

Ключевые слова: исследования, эксперимент, анализ, скорость, угол атаки, частота вращения, ротор, технология, показатели, урожайность, корма, сурепица, валок, проба.

E. V. Dyba, A. M. Khartanovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SURPITSA RAKE ROLLING BY REGRESSION ANALYSIS

Abstract. The article presents studies to assess the quality of raking of marmoset with rakes of GWG-9.5 by regression analysis.

Keywords: research, experiment, analysis, speed, angle of attack, frequency of injection, rotor, technology, indicators, yield, feed, marmot, roll, sample.

Введение

В результате теоретических исследований [1, 2] были получены аналитические выражения, позволяющие определить основные конструктивные и кинематические параметры рабочих органов граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5. Однако теоретические исследования не позволяют сделать вывод о том, что грабли-валкователи будут обеспечивать чистый подбор скошенной массы, так как при теоретическом исследовании невозможно учесть все факторы, влияющие на процесс. Кроме того, при теоретическом обосновании параметров граблей были приняты некоторые допущения. Поэтому необходимо проведение экспериментальных исследований.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось проверить достоверность полученных математических выражений, исследовать влияние основных конструктивных и кинематических параметров граблей-валкователей на качество валкования скошенной массы сурепицы, определить потери скошенной массы.

Экспериментальные исследования проводились в рамках договора от 21.04.2025 г. № 28 о научно-техническом сотрудничестве в производственных условиях с ОАО «Сейловичи». Исследовали влияние поступательной скорости движения агрегата, угловой скорости вращения ротора и угла атаки роторов на качество валкования скошенной массы сурепицы.

Основная часть

Влияние поступательной скорости движения агрегата, угловой скорости вращения ротора и угла атаки роторов на качество валкования скошенной массы сурепицы определяли, используя опытный образец граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5 (рисунок 1). Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5 предназначены для оборачивания, вспушивания и сгребания в валок сена,

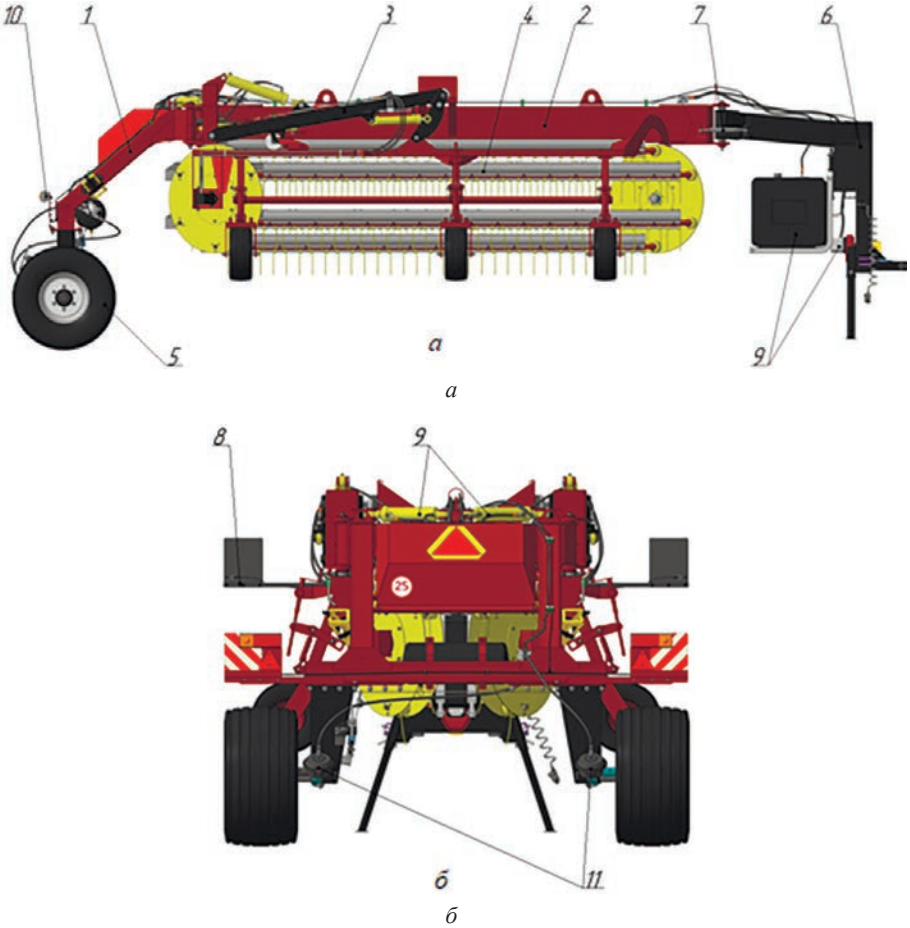


Рисунок 1 – Опытный образец граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5

соломы и провяленной зеленой массы (бобовых и злаковых трав) [3–6]. Грабли агрегатируются с сельскохозяйственными тракторами тягового класса 2, имеющими ВОМ частотой вращения 9,0 $с^{-1}$. Вид климатического исполнения У1 по ГОСТ 15150-69.

Грабли (рисунок 2) состоят из рамы *1*, дышла *2*, двух стрел поворотных *3*, двух секций с гребенчатыми роторами *4*, двух колес ходовых *5*, навески *6*, двух талрепов *7*, кронштейнов *8*, гидрооборудования *9*, электрооборудования *10*, тормозной системы *11* [4, 6].

Процесс сгребания (валкования) скошенной растительной массы осуществляется следующим образом – при движении граблей по прокосу роторы с гребенками правой и левой секций,



а

б

Рисунок 2 – Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5: *а* – вид сбоку; *б* – вид сзади; *1* – рама; *2* – дышло; *3* –стрела (поворотная); *4* – секция (с гребенчатым ротором); *5* – колесо ходовое; *6* – навеска; *7* – талреп; *8* – кронштейн; *9* – гидрооборудование; *10* – электрооборудование; *11* – тормозная система

вращаясь от привода гидромоторов под углом к направлению движения, подхватывают скошенную массу. Благодаря параллелограммному механизму рабочих секций зубья гребенок, совершая поступательное движение, перемещают подхваченную массу вдоль рабочей зоны, не давая ей при этом соприкоснуться с почвой до тех пор, пока масса не переместится в зону формирования валка. В процессе перемещения растительной массы в зону формирования валка рабочие органы граблей осуществляют их активное вспушивание и отделение от примесей (земли, пыли, камней и т. д.), обеспечивая таким образом «чистый» и хорошо продуваемый ветром валок.

Перечень основных средств измерений, применяемых при исследованиях, представлены в таблице 1. Приборы, определенные стандартными методиками, в таблице не приведены.

Таблица 1 – **Перечень основных средств измерений, применяемых при исследованиях**

Определяемая величина	Средство измерений	Погрешность
Температура воздуха, °С	Термометр ТЛ-40 ГОСТ 9177-74	±0,5
Относительная влажность воздуха, %	Психрометр	±2
Время, с	Секундомер типа СДС ГОСТ 5072-79	±0,2
Масса, кг, г	Весы типа ВНЦ, ВЛК-500Г-М Динамометр типа ДПУ	±0,1 ±10
Линейные размеры, мм	Линейка измерительная ГОСТ 427-75	±1
	Рулетка типа ЗПТЗ	±1
	Рулетка измерительная РИ-10-3-Д,кл.т. 3	±1
	Колесо измерительное INGCO электронное дорожное (HDMW23)	±0,5
Влажность, %	Инфракрасный анализатор кормов AgriNIR	±2,0
	Комбинированный прибор TESTO-44	±2,0
Частота вращения ротора, $с^{-1}$	Тахометр ручной ДО-01Р	±0,5

Для изучения комплексного влияния конструктивных и кинематических параметров граблей-валкователей на качество валкования скошенной массы сурепицы применили методы физического моделирования и математической теории планирования эксперимента.

Основной задачей планирования эксперимента является получение статистической математической модели объекта исследования в виде полинома (уравнения регрессии) чаще всего первой или второй степени [7–12]. Уравнение регрессии позволит оценить влияние воздействующих факторов x_1 на объем образованной диском канавки y:

$$y = b_0 + \sum_{i}^{k} b_i X_i + \sum_{i>j}^{k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=j}^{k} b_{ij} X_i^2, \quad (1)$$

где y – параметр оптимизации; X_i, X_j – кодовое обозначение факторов; b_o – свободный член, равный выходу при $x_i = 0$; b_i – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие на влияние того или иного фактора на изучаемый объект; b_{ij} – коэффициент регрессии соответствующих факторов двойного взаимодействия.

Чтобы устранить корреляцию между коэффициентами регрессии и трудности в оценке расчетных значений функции отклика, пользуются кодированными значениями факторов [7–12]

$$X_i = \frac{\overline{X}_i - \overline{X}_{i0}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

где $\overline{X}_i$ – натуральное значение i-го фактора; $\overline{X}_{i0}$ – натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i – значение интервала варьирования фактора.

$$\varepsilon_i = \frac{\overline{X}_i^{\text{в}} - \overline{X}_i^{\text{н}}}{2}, \quad (3)$$

где $\overline{X}_i^{\text{в}}$, $\overline{X}_i^{\text{н}}$ – соответственно верхняя и нижняя границы изменения величины X_i.

При планировании эксперимента необходимо выбрать параметр оптимизации, т. е. параметр, по которому оценивается исследуемый объект и который связывает воедино все факторы. Правильно выбранный критерий оптимизации дает четкое представление о цели работы. Поэтому задача состоит в том, чтобы при помощи создания математической модели минимизировать критерий оптимизации путем соответствующего подбора факторов, действующих на изучаемый объект. Необходимо стремиться, чтобы параметр оптимизации выражался одним числом, имел ясный физический смысл и количественную оценку. В нашем случае критерием оптимизации выбран коэффициент вариации (v, %), являющийся основным показателем качества работы граблей гребенчатого типа и характеризующий потери сгребаемой массы.

Главным условием, определяющим наиболее полное соответствие изучаемого процесса его математическому описанию, является правильный выбор факторов, влияющих на процесс, а также областей варьирования, соответствующих условиям работы, с учетом работоспособности конструкции и возможности конструктивного исполнения рабочего органа [9]. В процессе валкования сурепицы влияние на величину потерь оказывают следующие факторы: поступательная скорость движения агрегата (ϑ_a, м/с), угловая скорость вращения ротора (ω, $с^{-1}$) и угол атаки роторов (ζ, град.). Уровни варьирования факторов были определены из следующих соображений:

– пределы изменения поступательной скорости движения агрегата, исходя из агротехнических требований, предъявляемых к валкованию кормов, ограничены максимальной и минимальной величинами ($\vartheta_{a_{\min}} = 1,67$, м/с и $\vartheta_{a_{\max}} = 3,33$ м/с). Изменение скорости движения агрегата осуществлялось непосредственно механизатором и контролировалось по показаниям спидометра энергосредства;

– пределы изменения угловой скорости вращения ротора (определены, исходя из технической характеристики граблей, а также рекомендаций по валкованию кормов граблями гребенчатого типа) ограничены максимальной и минимальной величинами ($\omega_{\min} = 1,02\ с^{-1}$ и $\omega_{\max} = 2,02\ с^{-1}$). Регулировка угловой скорости вращения роторов производится с помощью двух регуляторов А (рисунок 3). При закручивании регуляторов (по часовой) угловая скорость вращения увеличивается, при откручивании (против часовой) – уменьшается;

– пределы изменения угловой скорости вращения роторов контролировались при помощи прибора ДО-01Р (рисунок 4);

– пределы изменения угла атаки роторов определены шириной захвата граблей, которая составляет 9,5 м и имеет возможность регулировки с помощью конструктивных особенностей граблей, ограничены максимальной и минимальной величинами ($\zeta_{\min} = 80°$ и $\zeta_{\max} = 120°$). Пределы изменения угла атаки роторов контролировали с помощью угломера Vorel 18798 (рисунок 5).

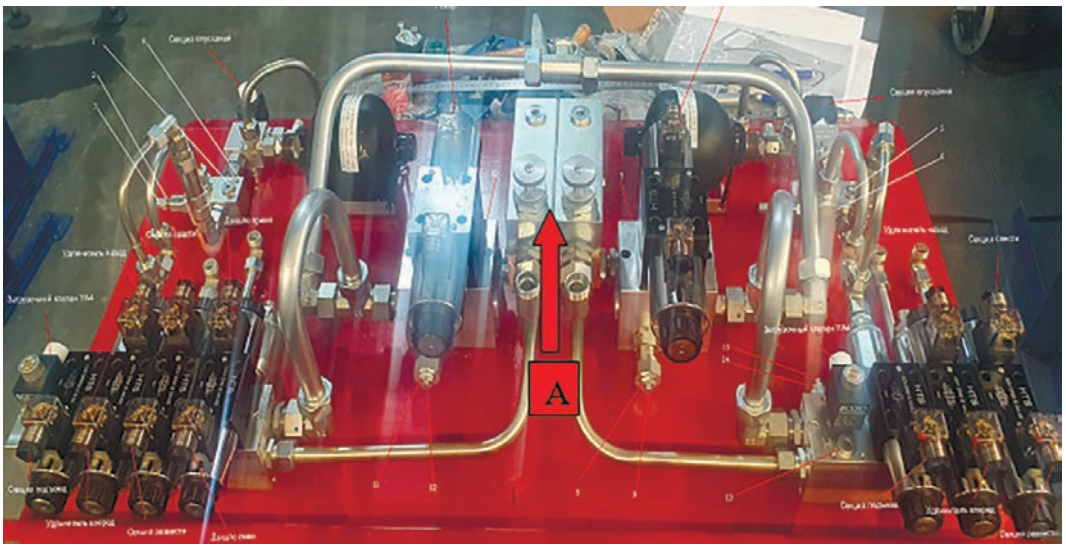


Рисунок 3 – Схема гидрооборудования граблей



Рисунок 4 – Контроль пределов изменения угловой скорости вращения ротора



Рисунок 5 – Регулировка угла атаки роторов

Уровни варьирования факторов и кодовые обозначения переменных приведены в таблице 2.

Для обработки данных многофакторного эксперимента в конечном итоге было решено использовать некомпозиционный план по методу Бокса – Бенкина. Повторность опытов – трехкратная. Некомпозиционные планы для трехфакторного эксперимента требуют постановки меньшего числа опытов по сравнению с соответствующими ротатабельными центральными композиционными планами второго порядка. Основой эксперимента является матрица, содержащая условия проведения всех опытов в соответствии с намеченным планом.

Таблица 2 – **Уровни варьирования факторов и их кодовое обозначение**

Наименование показателя	Варьируемые факторы		
	ϑ_a, поступательная скорость движения агрегата, м/с	ω, угловая скорость вращения ротора, $с^{-1}$	ζ, угол атаки роторов, град.
Кодовое обозначение факторов	x_1	x_2	x_3
Основные уровни ($X_i = 0$)	2,5	1,52	100
Интервалы варьирования	0,83	0,5	20
Нижние уровни ($X_i = –1$)	1,67	1,02	80
Верхние уровни ($X_i = +1$)	3,33	2,02	120

В данном плане выбранные переменные варьируются на трех уровнях: +1, 0, –1 (таблица 3), что упрощает и удешевляет эксперимент по сравнению с центральными композиционными ротатабельными планами второго порядка, где предусматривается использование каждого фактора на пяти уровнях [13–15]. Матрица плана Бокса – Бенкина представлена в таблице 3.

Таблица 3 – **Матрица плана Бокса – Бенкина**

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	1	–1	–1	0	1	0	0	1	1	0
2	1	1	–1	0	–1	0	0	1	1	0
3	1	–1	1	0	–1	0	0	1	1	0
4	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
5	1	–1	0	–1	0	1	0	1	0	1
6	1	1	0	–1	0	–1	0	1	0	1
7	1	–1	0	1	0	–1	0	1	0	1
8	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
9	1	0	–1	–1	0	0	1	0	1	1
10	1	0	1	–1	0	0	–1	0	1	1
11	1	0	–1	1	0	0	–1	0	1	1

Окончание табл. 3

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
12	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sum_{\text{кв}}$	15	8	8	8	4	4	4	8	8	8

Обработка результатов экспериментальных данных многофакторного эксперимента позволяет получить точную математическую формулу зависимости результирующей функции от трех выбранных наиболее значимых факторов. Построенные поверхности отклика 3D и их сечения позволят сделать подробный анализ результатов эксперимента и подготовить научные выводы по результатам экспериментальных исследований [9].

В нашем случае факторное пространство описывается уравнением регрессии в виде полинома второй степени, который имеет следующий вид [12]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (4)$$

Таким образом, по результатам расчета было получено уравнение регрессии второго порядка

$$y_{\text{п.к.}} = 1,673 + 0,386x_1 + 1,611x_2 - 0,213x_3 + 1,395x_1^2 + \\ + 1,122x_2^2 + 0,7x_3^2 - 0,207x_1x_3 + 0,34x_2x_3. \quad (5)$$

Следующим этапом работы является проверка математической модели на адекватность. Адекватность уравнения регрессии по плану Бокса – Бенкина проводили путем анализа расчетной среднеквадратичной дисперсии без проверки математической модели на адекватность [13, с. 14].

Экспериментальное значение критерия Фишера рассчитаем по формуле

$$F_{\text{э}} = \frac{\max\left(S^2_{\text{воспр}}; S^2_{\text{ад}}\right)}{\min\left(S^2_{\text{воспр}}; S^2_{\text{ад}}\right)}, \quad (6)$$

где $S^2_{\text{воспр}}$ – дисперсия воспроизводимости; $S^2_{\text{ад}}$ – дисперсия адекватности.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$S^2_{\text{воспр}} = \frac{\sum S_j^2}{n}. \quad (7)$$

$$S^2_{\text{воспр}} = \frac{5,454}{3} = 1,818.$$

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости определяется по формуле

$$f_{\text{воспр}} = N(n-1), \quad (8)$$

где N – число опытов на нулевом уровне (в данном случае $N = 15$); n – число повторности (в данном случае $n = 3$);

$$f_{\text{воспр}} = 15(3-1) = 30.$$

Дисперсию адекватности определяют по формуле

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{n\varphi}{N-B}, \quad (9)$$

где φ – сумма квадратов разности между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации; B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Суммы квадратов разности между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации определяем для каждого опыта по формуле

$$\varphi = \sum_{n=1}^{k} \left(y_{\text{ср}} - y_{\text{рас}} \right)^2. \tag{10}$$

Расчетное значение параметра y в j-м опыте рассчитывается по формуле

$$\begin{gathered} y_j^p = b_0 + b_1 X_{1n} + b_2 X_{2n} + b_3 X_{3n} + b_{11} X_{1n}^2 + b_{22} X_{2n}^2 + b_{33} X_{3n}^2 + \\ + b_{12} X_{1n} X_{2n} + b_{13} X_{1n} X_{3n} + b_{23} X_{2n} X_{3n}. \end{gathered} \tag{11}$$

Тогда

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 9,692}{15 - 8} = 4,154. \tag{12}$$

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод о том, что полученное уравнение регрессии второго порядка адекватно, так как среднеквадратичное отклонение на нулевом уровне больше расчетного:

$$\left| S_{\bar{y}0}^2 \right| > \left| S_{\Delta U}^2 \right| \rightarrow 4,154 > 1,818. \tag{13}$$

Поскольку $S_{\text{ад}}^2 > S_{\text{воспр}}^2$ (4,154 > 1,818), тогда

$$F_{\text{э}} = \frac{4,154}{1,818} = 2,285. \tag{14}$$

Выбираем табличное значение критерия Фишера $F_{f\text{ числ; }f\text{ знач; р}}$, в котором на первом месте стоит число степеней свободы большей дисперсии, а на втором – число степеней свободы меньшей дисперсии, при доверительной вероятности $p = 0,95$.

$$F_{7;\,30;\,0,95} = 2,334. \tag{15}$$

Поскольку $F_{7;\,30;\,0,95} = 2,334 > F_{\text{э}} = 2,285$, то полученное уравнение регрессии адекватно.

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем уравнение регрессии (5). Для этого найдем натуральные значения факторов, используя формулы (2) и (3).

Фактор поступательной скорости движения агрегата (ϑ_a, м/с)

$$x_1 = \frac{\vartheta_a - 2,5}{0,83}. \tag{16}$$

Фактор угловой скорости вращения ротора (ω, $с^{-1}$)

$$x_2 = \frac{\omega - 1,52}{0,5}. \tag{17}$$

Фактор угла атаки роторов (ζ, град.)

$$x_3 = \frac{\zeta - 100}{20}. \tag{18}$$

Подставив в уравнение (5) натуральные значения факторов x_1, x_2, x_3, получим следующую функцию отклика в натуральных показателях:

$$\begin{gathered} y_{\text{п. к.}} = 39,253 - 8,413\,\vartheta_a - 13,822\,\omega - 0,381\,\zeta + \\ + 2,025\,\vartheta_a^2 + 4,488\,\omega^2 + 0,002\,\zeta^2 - 0,013\,\vartheta_a\,\zeta + 0,034\,\omega\zeta. \end{gathered} \tag{19}$$

При анализе уравнения регрессий второго порядка (19) установлено, что оно имеет все члены переменных. Адекватность уравнений в кодированном виде при уровне значимости 0,05 %, говорит о том, что погрешность вычислений при реализации полученных моделей на практике в установленном диапазоне варьирования факторов не превысит 5 %.

На основании реализации эксперимента и проверки воспроизводимости опытов $G_э = 0,289 \leq$ $\leq G_{2;\,15;\,0,95} = 0,335$ получена полиномиальная адекватная $F_э = 2,285 \leq F_{7;\,30;\,0,95} = 2,334$ модель влияния конструктивных и кинематических параметров граблей гребенчатого типа на качество валкования скошенной массы сурепицы. Уравнение (5) определяет характер и степень влияния факторов (x_1, x_2 и x_3) на качество валкования. Графическая интерпретация уравнения регрессии представляет собой поверхности отклика (рисунки 6, 7, 8).

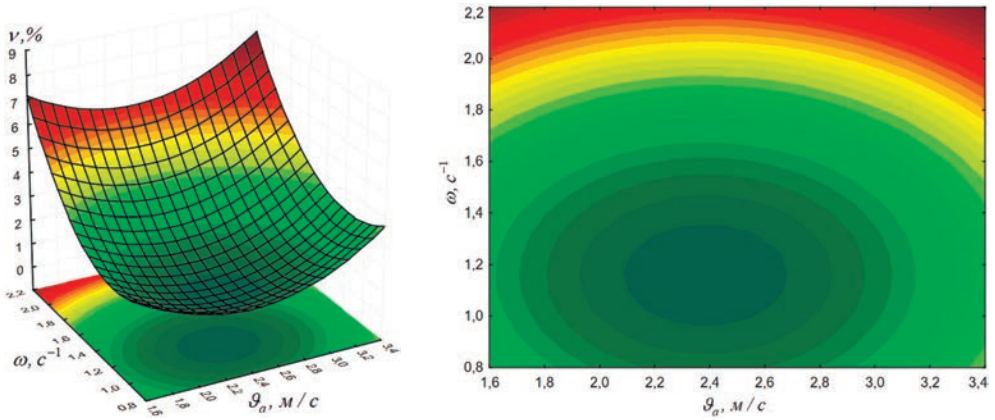


Рисунок 6 – Поверхность отклика и ее двумерное сечение $v = f(\vartheta_a; \omega)$

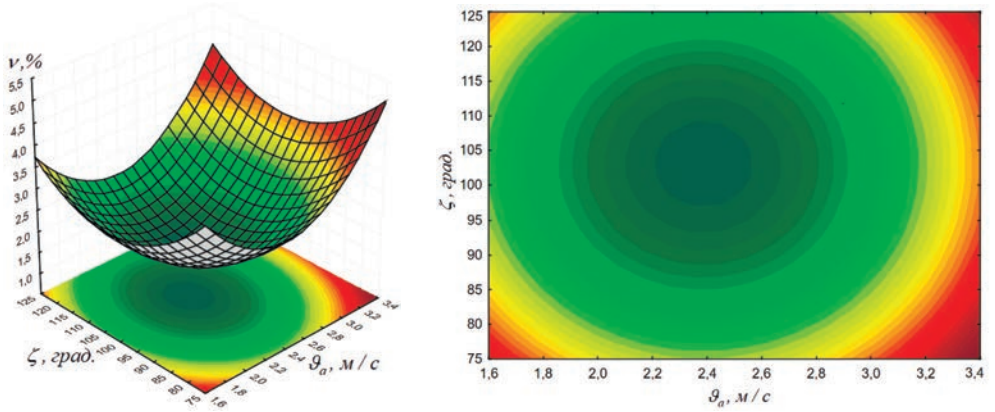


Рисунок 7 – Поверхность отклика и ее двумерное сечение $v = f(\vartheta_a; \zeta)$

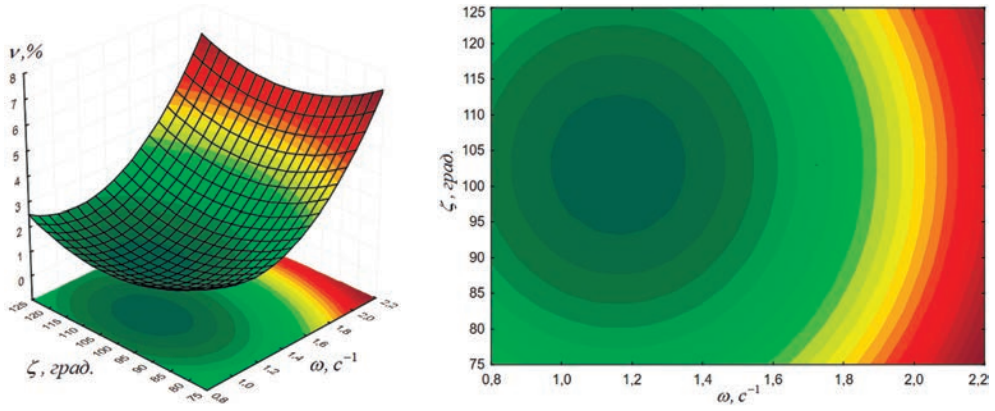


Рисунок 8 – Поверхность отклика и ее двумерное сечение $v = f(\omega; \zeta)$

Анализ полученного уравнения регрессии (19) и поверхностей отклика (рисунки 6–8) позволил выявить следующее. Вытянутость эллипса показывает преобладание одного фактора над другим, степень влияния его на показатель качества валкования сурепицы (потерь). Анализ двумерных сечений показывает, что центры эксперимента находятся в исследуемой зоне и расчетные данные согласуются с экспериментальными, что позволяет установить оптимальные параметры для различных сочетаний факторов [9, 16].

Для определения значений факторов, при которых функция (5) достигает экстремума (в данном случае минимума), необходимо взять частные производные по x_i и, приравняв к нулю, решить полученную систему уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{\partial y}{\partial x_2} = 1,611 + 2,244x_2 + 0,34x_3; \\ \dfrac{\partial y}{\partial x_3} = -0,213 + 1,4x_3 - 0,207x_1 + 0,34x_2. \end{cases} \quad (20)$$

Затем полученные значения факторов подставляли в уравнение регрессии (19), определяли коэффициенты вариации и сравнивали полученные данные. Согласно проведенному анализу, рациональными параметрами граблей-валкователей гребенчатых, при которых обеспечивается качественное выполнение процесса валкования кормов с минимальными потерями, являются следующие значения: поступательная скорость движения агрегата ϑ_a = 2,4 м/с, угловая скорость вращения ротора ω = 1,16 с$^{-1}$ и угол атаки роторов ζ = 103°.

Заключение

В результате экспериментальных исследований подтверждены достоверность теоретических исследований и правильность выбора конструктивных и кинематических параметров граблей гребенчатого типа. Расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 5 %. Обоснованы оптимальные конструктивные и кинематические параметры граблей-валкователей гребенчатых, обеспечивающие стабильную и качественную его работу: поступательная скорость движения агрегата ϑ_a = 2,4 м/с, угловая скорость вращения ротора ω = 1,16 с$^{-1}$ и угол атаки роторов ζ = 103°. Полученные уравнение регрессии (5) и поверхности отклика (рисунки 6–8) позволили выявить, что из варьируемых факторов наибольшее влияние на потери оказывает поступательная скорость движения агрегата, затем – угловая скорость вращения ротора и в меньшей мере – угол атаки роторов. Уравнение регрессии позволяет установить значение факторов.

Таким образом, мы определили значения факторов, при которых обеспечивается процесс валкования с наименьшим коэффициентом вариации для рассматриваемой культуры. Результаты исследований свидетельствуют, что обоснованные параметры и режимы работы граблей обеспечивают выполнение агротехнических требований к заготовке кормов.

Список использованных источников

1. Обзор и анализ конструкции граблей-валкователей гребенчатого типа / В. В. Микульский, Э. В. Дыба, Л. И. Трофимович, П. В. Яровенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2023. – Вып. 56. – С. 188–196.

2. Дыба, Э. В. Обоснование основных параметров граблей-валкователей гребенчатого типа ГВГ-9,5 / Э. В. Дыба, В. В. Микульский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2022. – Вып. 55. – С. 57–65.

3. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Технические условия ТУ BY 100230575.522-2023 / разраб.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» // государственная регистрация № 069799 от 07.12.2023 г. – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 26 с.

4. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Руководство по эксплуатации ГВГ 00.00.000 РЭ / разраб.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 66 с.

5. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Паспорт ГВГ 00.00.000 ПС / разраб.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 8 с.

6. Обосновать параметры, разработать и освоить производство прицепных гребенчатых граблей-валкователей : отчет о НИОКР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ; рук. темы Э. В. Дыба. – Мн., 2023. – 295 с. − № ГР 20213721.

7. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов : учеб. пособие / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Ленинград : Колос, 1972. – 199 с.

8. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 338 с.

9. Хайлис, Г. А. Исследование сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М. : Колос, 1994. – 169 с.

10. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г. Н. Веденяпин. – М. : Колос, 1973. – 199 с.

11. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

12. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

13. Христофорова, И. А. Проведение активного эксперимента при разработке состава шихты для производства керамических изделий : метод. указания / И. А. Христофорова. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2000. – 24 с.

14. Каледина, Н. Б. Влияние параметров печатного процесса на липкость краски / Н. Б. Каледина, Д. М. Медяк // Труды БГТУ. – Мн. : БГТУ, 2011. – № 9 (147). – С. 23–27.

15. Голубцова, Е. С. Влияние температуры и времени спекания, марки порошка и количества добавки диоксида натрия на теплопроводность нитрида алюминия / Е. С. Голубцова, Б. А. Каледин, Н. Б. Каледина // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 88–90.

16. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования : учеб.-метод. комплекс / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Мн. : БГАТУ, 2010. – 276 с.

УДК: 631.353.24

Поступила в редакцию 13.01.2026
Received 13.01.2026

Э. В. Дыба, А. М. Хартанович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАСОРЕНИЯ ФОРМИРУЕМЫХ ВАЛКОВ СУРЕПИЦЫ

Аннотация. В статье представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процесса валкования сурепицы граблями гребенчатого типа в сравнении с традиционно используемыми устройствами, определения величины засорения формируемых валков.

Ключевые слова: гребенчатые грабли, валкование, засорение, потери, анализ, метод, качество, зола, проба, показатель, корм.

E. V. Dyba, A. M. Khartanovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

RESULTS OF STUDIES ON DETERMINATION OF CLOGGING OF FORMED SURITSA ROLLS

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the process of rake raking with rakes in comparison with traditionally used devices, determination of the amount of clogging of the formed rolls.

Keywords: comb rake, rolling, clogging, losses, analysis, method, quality, ash, sample, indicator, feed.

Введение

На современном этапе развития сельского хозяйства в Республике Беларусь актуальной задачей является обеспечение населения качественными продуктами питания отечественного производства и их экспорта за рубеж. Одно из важных направлений в решении этой задачи – увеличение производства высокобелковых кормов для животноводства.

В настоящее время при заготовке кормов все большую актуальность приобретает сурепица и кормовые смеси на ее основе из-за высокой питательной ценности. О чем свидетельствует и богатый опыт заготовки этого корма в хозяйствах Республики Беларусь: ежегодно в хозяйствах страны сурепицей засеивается около 51 тыс. га, из которых порядка 50 тыс. га – на корм (ранний корм и белковый концентрат). В семенах сурепицы содержится 33–42 % масла, которое по своим свойствам приближается к маслу рапса. Применяют масло в основном для технических целей в различных отраслях промышленности (мыловаренной, лакокрасочной, металлургической), а также для производства биотоплива. Жмых содержит до 40 % полноценного белка и является хорошим концентрированным кормом для животных [1–4].

Как культура промежуточного посева, она используется для получения зеленой массы в ранневесенний и позднеосенний периоды, это ценный источник полноценного протеина, углеводов, макро- и микроэлементов, витаминов. Ранним летом, когда травы не дают достаточного количества протеина, выручает это масличное растение. Благодаря включению его в рацион повышаются надои.

При высоких урожаях зеленой массы сурепицы в мировой практике практикуется скашивание и укладка в прокос, а не в валок, для ускорения процесса сушки, поэтому все большее количество уборочных комплексов и косилок скашивают убираемую массу в широкие прокосы с последующим их ворошением. Этот прием позволяет ускорить процесс полевой сушки на 25–35 %.

В условиях республики скашивание в прокос и интенсивное ворошение прокоса позволяют получить корма из сурепицы кондиционной влажности в более короткие сроки. Соответственно качество такого корма высокое, в нем максимально сохраняются каротин, протеин, углеводы и другие питательные и витаминные комплексы, влияющие на его энергетическую ценность. Дальнейшее досушивание и сохранение энергетической ценности кормов во многом зависит от качества их сгребания в валки.

Сурепица имеет ряд морфологических и биологических отличий от бобовых и злаковых культур, в частности по жесткости стеблей и наличию боковых ветвей, следовательно, применение граблей при ее валковании невозможно без выполнения конструктивных и технологических настроек и регулировок, параметры которых возможно определить, только проведя теоретические и экспериментальные исследования.

Основная часть

В последние годы на полях Республики Беларусь получила распространение масличная культура из семейства крестоцветных – сурепица, которая характеризуется высокой продуктивностью, скороспелостью и эффективно используется в качестве зеленого концентрата. Сурепица введена в культуру из сорного растения, распространенного во всем северном полушарии. Издавна известна она в Афганистане, Пакистане, Западном Китае, Иране, Турции. В России сурепицу начали высевать в XIX в. Средняя урожайность семян сурепицы составляет 12–18 ц/га, на сортоучастках – до 30 ц/га [2–4]. Скармливают ее небольшими дозами, так как в ней содержатся вредные для организма животных глюкозиды. В зеленой массе сурепицы содержится до 25 % протеина в пересчете на сухое вещество, много витаминов и минеральных веществ и мало клетчатки. В сухом веществе этой культуры содержится: обменной энергии – 11 МДж, сырого протеина – 18–24 г, сахара – 10–14 г, КДК – 22–24 %, НДК – 55–67 %, протеина – до 29 %. Химический состав варьирует в зависимости от сорта, агрофона, времени уборки урожая, фазы вегетации, почвенно-климатических условий [2–4].

По своим ботаническим характеристикам и биологическим особенностям сурепица относится к семейству капустных (*Brassicaceae*) и имеет две формы – яровая (*Brassica campestris* L.) и озимая (*Brassica napa oleifera D. C.*) Растения сурепицы и рапса похожи по внешнему виду, но имеют ряд отличительных признаков (таблица) [5–6]. Это однолетнее травянистое растение с прямостоячим ветвистым стеблем высотой от 0,5 до 1,3 м. Стебель голый, покрыт слабым восковым налетом и лишь внизу опушен. Нижние листья черешковые лировидно-перистонадрезанные, опушенные с нижней стороны, верхние и средние – сидячие, цельно-крайние, голые, обратно-овальные. Цветки желтые, соцветие – кисть. Плод – стручок длиной 3–5 см, прикрепляется к оси соцветия под острым углом, гладкий или слабобугорчатый, с узким длинным носиком. Семена шаровидные, красновато-коричневые, с крупносетчатой поверхностью. Масса 1 000 семян – 2,0–3,5 г.

Морфологические характеристики сурепицы

Наименование показателя	Значение показателя
Семядольные листочки	Симметричные, расположены горизонтально в одной плоскости
Точка роста розетки	Сидячая, приподнята над почвой на 0,5–1,0 см; у озимой сурепицы перед наступлением зимы втягивается в почву
Листья розеточные	Черешковые, светло-зеленые, без воскового налета, опушены жесткими волосками; располагаются горизонтально на почве
Листья стеблевые	Зеленые, без воскового налета и опушения; своим основанием полностью охватывают стебель; верхние – сидячие, удлиненно-треугольной формы
Стебель	Менее прочный и ниже, чем у рапса; высота у яровой составляет 60–110 см, у озимой – 100–140 см; боковые ветви закладываются на высоте 25–40 см от поверхности почвы
Соцветия	В начале цветения – щитковидная кисть; цветки приподняты выше бутонов, более мелкие, чем у рапса
Стручки	Крепятся к стеблю под острым углом косо вверх; длина створок – 4,5–5,5 см; киль конический, длинный
Семена	Окраска красновато-коричневая, у отдельных сортов желтая; диаметр – 1,0–1,9 мм; масса 1 000 шт. – 2–3 г

Сурепица – облигатное перекрестноопыляющееся растение (в отличие от рапса), нетребовательна к условиям произрастания, морозоустойчива. Семена начинают прорастать при температуре 1–3 °С, более дружные всходы появляются при 9–10 °С. Лучшая температура для роста вегетативной массы – 15–20 °С, для цветения и созревания семян – 22–23 °С. Всходы могут переносить заморозки до –5…–8 °С. Для роста, развития и созревания сурепицы необходима сумма среднесуточных температур за вегетацию 1600–1900 °С.

Сурепица – влаголюбивое растение и во все периоды вегетации недостаток влаги переносит плохо. Засуха во время цветения и налива семян приводит к их щуплости и снижению урожая. К почвам сурепица не предъявляет высоких требований, может произрастать почти на всех почвенных разностях, в том числе на глинистых тяжелых почвах. Малопригодны бедные песчаные почвы, однако на них сурепица растет лучше, чем рапс.

Фазы развития сурепицы: всходы, листообразование, осенне-зимний покой у озимой сурепицы, возобновление вегетации весной, стеблевание, бутонизация, цветение, семяобразование, зеленая спелость, восковая спелость, техническая спелость, полная спелость. Сурепица более низкорослая и скороспелая культура, чем рапс, так как фазы проходят быстрее.

Озимая сурепица зимует в фазе развитой розетки из 6–8 листьев. Розетка имеет приземистый вид, точка роста не вытягивается вверх, а перед наступлением зимы за счет сокращения гипокотиля и главного корня втягивается в почву. В связи с этим озимая сурепица обладает более высокой зимостойкостью, чем рапс. Цветение яровой сурепицы начинается через 30–45 дней после появления всходов и продолжается 20–30 дней. Растения озимой сурепицы зацветают на 5–7 дней и созревают на 10–15 дней раньше озимого рапса. Продолжительность вегетационного периода озимой сурепицы составляет 310–330 дней, а яровой – 75–90 дней.

Яровая сурепица – одна из самых скороспелых масличных культур. По урожайности она уступает яровому рапсу на 5–6 ц/га. Выращивание ее оправдано в северных районах республики и на легких почвах. Дает в основном техническое масло. В перспективе – возделывание 000-сортов с низким содержанием эруковой кислоты, глюкозинолатов и клетчатки, что позволит более широко использовать ее на пищевые и кормовые цели.

Важным звеном технологического процесса уборки травяных кормов, в том числе и сурепицы, является операция сгребания высушенной или провяленной массы в валки. Известно, что сохранение энергетической ценности травяных кормов в процессе уборки во многом зависит от качества их сгребания [7]. В зависимости от конструктивных особенностей можно выделить роторные, колесно-пальцевые и грабли-валкователи ленточного типа. Последние являются новинкой и в Республике Беларусь пока широкого применения не получили.

В настоящее время технологическая операция сгребания высушенной или провяленной массы сурепицы в валки выполняется в Республике Беларусь преимущественно ротационными граблями (рисунок 1), которые сгребают травяные корма граблинами, установленными на вращающихся роторах с шириной захвата от 4 до 7 м (ГВР-420, ГВР-630, ГР-700П – производство ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш»; ГВЦ-6,6, ГВБ-6,2 – производство ОАО «Лидаагропроммаш») [8–10].



Рисунок 1 – Ротоционные грабли-валкователи

Основные достоинства ротационных граблей-валкователей – это минимальная чувствительность рабочих органов к плотности растительности, ее засорению и препятствиям в виде камней. Однако ротационные грабли-валкователи имеют и существенный технологический недостаток, который заключается в принципе работы самой машины. Дело в том, что процесс сгребания травяной массы ротационными граблями-валкователями происходит путем волочения их по поверхности поля, что увеличивает вероятность увлекания за собой камней и других инородных тел в валок. Кроме того, высокая окружная скорость зубьев граблин (10–15 м/с) и постоянный их контакт с поверхностью почвы приводит к засорению формируемого валка землей и другими механическими включениями (особенно при работе валкователя на сложном рельефе), а также к высоким потерям листьев и соцветий, особенно при многоукосной системе заготовки травяных кормов. Все это приводит и к потере энергетической ценности травяных кормов. Так, исследованиями, проведенными в регионе интенсивного животноводства в Германии, доказано, что при увеличении содержания примесей в сухой массе травяных кормов с 2 до 4 % происходит снижение их энергетической ценности до 4 %, а энергии усваиваемой КРС – до 7,5 %.

В последние годы существенно возросла популярность колесно-пальцевых граблей (рисунок 2) вследствие их надежности и простоты в эксплуатации, высокой производительности, низкой стоимости, а также многофункциональности. Они могут выполнять несколько видов полевых работ: сгребание массы из прокоса в валок, оборачивание валков, ворошение массы в прокосе.

Отличительной особенностью колесно-пальцевых граблей-валкователей от ротационных является то, что сгребание травяных кормов осуществляется с помощью вертикально вращающихся пальцевых рабочих колес, расположенных под углом в 45–50° к линии движения машины. При этом привод пальцевых колес осуществляется не от ВОМ трактора, как у ротационных, а от сил сцепления с растительной массой, расположенной на земле, что положительно отражается не только на стоимости машины, но и на технологическом процессе сгребания травяной массы. Суть в том, что при работе колесно-пальцевых граблей-валкователей окружная скорость пальцев рабочих колес в несколько раз ниже, чем у зубьев ротационных граблей, благодаря чему режимы работы колесно-пальцевых граблей являются щадящими, а, следовательно, их можно применять для валкования бобовых трав и бобово-злаковых смесей с многоукосной системой их заготовки. Кроме того, благодаря наличию в каждом рабочем колесе пружинной подвески пальцы колес хорошо адаптируются к неровностям почвы (включая склоны и холмистые угодья), при этом, в сравнении с ротационными граблями, несколько снижая засорение формируемого валка камнями, землей, пылью и др. Однако полностью исключить засорение формируемого валка при использовании колесно-пальцевых граблей не представляется возможным: им присущ тот же недостаток, что и ротационным граблям, заключающийся в принципе их работы, – волочение.

Таким образом, указанные выше недостатки ротационных и колесно-пальцевых граблей-валкователей привели ряд зарубежных стран к изысканию нового принципа их работы, обеспечивающего получение максимально «чистого» корма. Фирмами RESPIRO (Австрия), ROC (Италия), PLOEGER MACHINES BV (Нидерланды), Kuhn (Франция), SIP (Словения) Oxbo International Corp (США) и другие были разработаны грабли-валкователи ленточного типа [11–20].

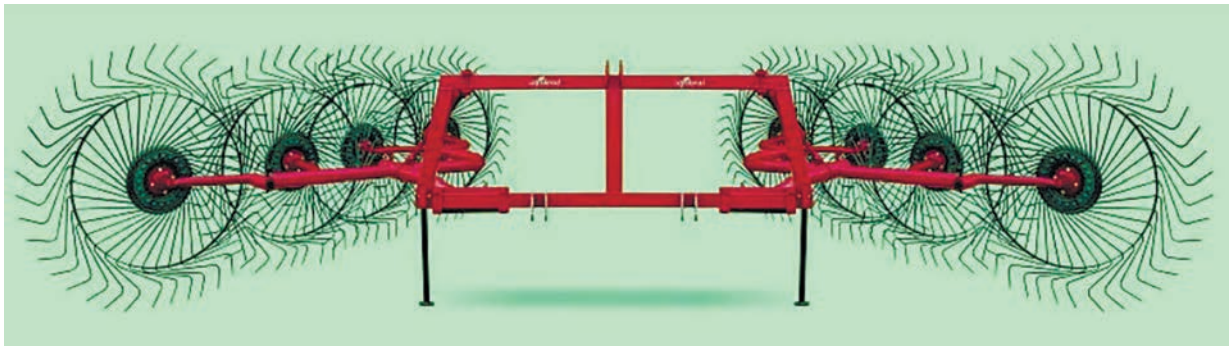


Рисунок 2 – Колесно-пальцевые грабли-валкователи

Принцип действия ленточных валкователей можно сравнить с принципом работы подборщика кормоуборочного комбайна или прицепных косилок с ленточным транспортером – скошенная масса не стягивается в валок по земле, а без дополнительного соприкосновения с почвой подхватывается и укладывается в него (рисунок 3). В этом проявляется первое преимущество рассматриваемых машин. Корма в меньшей степени подвергаются загрязнению в сравнении с другими технологиями валкования, прежде всего, при работе роторными валкообразователями и колесно-пальцевыми граблями. К тому же благодаря этому снижается износ машин во всей последующей уборочной цепочке, независимо от того, какие машины она включает – кормоуборочный комбайн, прицеп-подборщик или пресс-подборщик. Кроме того, в валок попадает меньше камней.

Щадящий режим уборки приобретает особое значение при работе на подборе низкоурожайной массы и сведении ее с нескольких прокосов в один валок. В этом контексте ленточные валкователи идеально подходят для работы с люцерной и сурепицей. Благодаря деликатному подбору скошенной массы богатая белками листва люцерны остается на стебле и попадает в валок, что существенно повышает ценность и качество кормов из этой культуры. Также такие машины не повреждают молодые побеги люцерны, которые могут уже начать отрастать в процессе, когда идет валкование. А это ускоряет срок отрастания нового урожая.

Вышеприведенные достоинства и недостатки ротационных, колесно-пальцевых граблей-валкователей, а также ленточных валкователей привели отечественную науку к изысканию нового



Рисунок 3 – Ленточный валкователь Respiro R9 profi в работе



Рисунок 4 – Опытный образец граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5

принципа их работы, обеспечивающего получение максимально «чистого» корма. В результате такого поиска лабораторией механизации заготовки кормов РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» были разработаны грабли-валкователи гребенчатого типа ГВГ-9,5 (рисунок 4) в рамках выполнения проекта задания 10 «Обосновать основные параметры, разработать и освоить производство прицепных гребенчатых граблей-валкователей» подпрограммы «Белсельхозмеханизация-2025» ГНТП «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии», 2021–2025 гг., принцип работы которых основан на минимальном контакте зубьев с поверхностью почвы [21–23]. Исследованиями установлено, что именно благодаря минимальному контакту зубьев с поверхностью почвы земля и камни не поднимаются и не оседают на валке, что снижает риск повреждения рабочих органов кормоуборочного комбайна или пресс-подборщика, а также обеспечивает получение более высокого качества корма.

Согласно техническим условиям, грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5 предназначены для сгребания сена, провяленной зеленой массы (бобовых и злаковых культур) и соломы в валок. Планируемая работа предполагает расширение сферы применения граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5 за счет использования их не только на валковании сена, провяленной зеленой массы (бобовых и злаковых культур) и соломы, но также сурепицы и кормовых смесей на ее основе, валкование которых в настоящее время осуществляется в республике ротационными и колесно-пальцевыми граблями-валкователями, что приводит к потерям и засорению формируемого валка землей и другими механическими включениями (особенно при работе валкователя на сложном рельефе), а также высоким потерям листьев и соцветий, что в итоге ведет к снижению энергетической ценности кормов.

В результате теоретических исследований были получены аналитические выражения, позволяющие определить основные конструктивные и кинематические параметры рабочих органов граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5. Однако теоретические исследования не позволяют сделать вывод о том, что грабли-валкователи будут обеспечивать чистый подпор скошенной массы, так как при теоретическом исследовании невозможно учесть все факторы, влияющие на процесс. Кроме того, при теоретическом обосновании параметров граблей были приняты некоторые допущения.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось проверить достоверность полученных математических выражений, исследовать влияние основных конструктивных и кинематических параметров граблей-валкователей на качество валкования скошенной массы сурепицы, определить засорение примесями сгребаемой массы. Экспериментальные исследования проводились в рамках договора от 21.04.2025 г. № 28 о научно-техническом сотрудничестве в производственных условиях с ОАО «Сейловичи». Определяли величину засорения примесями формируемого валка граблями ГВГ-9,5 в сравнении с традиционно используемыми граблями-валкователями (колесно-пальцевыми и роторными).

Отсутствие ТНПА на сурепицу объясняется тем, что технические условия на эту культуру в Республике Беларусь, как правило, разрабатываются для конкретных сортов и целей использования (например, в качестве сидерата или для производства масла, корма) и не являются общими для всех видов. Для характеристики качества валкования по содержанию в скошенной сурепице почвы необходимо было провести испытания по определению содержания в образцах сурепицы сырой золы нерастворимой в соляной кислоте.

Величину засорения формируемых валков сурепицы определяли в лабораторных условиях методом определения содержания в образцах сырой золы, нерастворимой в соляной кислоте. Для этого в полевых условиях осуществляли отбор проб массой 5 кг каждая на поддоны из трех мест валка по всему сечению. Величину засорения формируемых валков сурепицы механическими примесями и почвой определяли методом сравнительного анализа по каждой операции.

Первую пробу сурепицы срезали на корню, вторую пробу отбирали после прохода косилки КМР-9 из прокосов. Третью пробу отбирали из валка сурепицы, сформированного после прохода граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5. Четвертую пробу брали из валка сурепицы, сформированного после прохода граблей роторных ГВБ-6,2. Пятую пробу отбирали из валка сурепицы, сформированного после прохода колесно-пальцевых граблей ГРЛ-9,6-01.

На граблях-валкователях гребенчатых ГВГ-9,5 были осуществлены регулировки по установлению оптимальных конструктивных и кинематических параметров, обеспечивающих стабильную и качественную работу: поступательная скорость движения агрегата – 2,4 м/с, угловая скорость вращения ротора – 1,16 $с^{-1}$ и угол атаки роторов – 103°.

В результате лабораторных исследований было установлено, что при сравнении гребенчатых граблей с роторными и колесно-пальцевыми наименьшее содержание массовой доли сырой золы (10,51 %) и массовой доли золы нерастворимой в соляной кислоте (0,86 %) оказалось в пробе, отобранной после прохода граблей ГВГ-9,5 (роторные грабли: содержание массовой доли сырой золы – 13,81 % и массовой доли золы нерастворимой в соляной кислоте – 4,61 %; колесно-пальцевые грабли: содержание массовой доли сырой золы – 12,08 % и массовой доли золы нерастворимой в соляной кислоте – 2,79 %).

Полученные результаты показывают, что содержание примеси почвы наибольшее в пробах 4 (после прохода граблей роторных ГВБ-6,2) и 5 (после прохода колесно-пальцевых граблей ГРЛ-9,6-01).

Для образцов 3 и 4 был проведен ситовой анализ, результаты которого показали, что в образце 3 (после прохода граблей-валкователей гребенчатых ГВГ-9,5) содержится менее 0,2 % земли, а в образце 4 – 3,73 %.

Заключение

Таким образом, в результате проведения лабораторных исследований было установлено, что при сравнении гребенчатых граблей с роторными и колесно-пальцевыми наименьшее содержание массовой доли сырой золы (10,51 %) и массовой доли золы нерастворимой в соляной кислоте (0,86 %) оказалось в пробе, отобранной после прохода граблей ГВГ-9,5 (роторные грабли: содержание массовой доли сырой золы – 13,81 % и массовой доли золы нерастворимой в соляной кислоте – 4,61 %; колесно-пальцевые грабли: содержание массовой доли сырой золы – 12,08 % и массовой доли золы нерастворимой в соляной кислоте – 2,79 %).

Согласно техническим условиям, грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5 предназначены для сгребания сена, провяленной зеленой массы (бобовых и злаковых культур) и соломы в валок. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность эксплуатации граблей гребенчатого типа при валковании сурепицы (масленичных культур) и кормовых смесей на ее основе в соответствии с агротехническими требованиями, предъявляемыми к данному виду работ, тем самым подтвердили гипотезу о расширении функциональных возможностей гребенчатых граблей.

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по валкованию сурепицы и кормовых смесей на ее основе граблями-валкователями гребенчатого типа ГВГ-9,5.

Список использованных источников

1. Программный комплекс мер по развитию кормопроизводства на 2021–2025 годы, утв. заместителем Премьер-министра Республики Беларусь от 16 марта 2021 г. № 06/217-261/220.

2. Технология возделывания яровой сурепицы в Нечерноземной зоне (практическое руководство). – М. : РГАУ–МСХА, 2012. – 31 с.

3. Основы ботаники, агрономии и кормопроизводства. Практикум : учеб. пособие / Н. П. Лукашевич, Н. Н. Зенькова, В. И. Поплевко [и др.]. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2010. – 432 с.

4. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: учеб.-метод. пособие / И. Р. Вильдфлуш, П. А. Саскевич, В. В. Лапа [и др.] ; под ред. И. Р. Вильдфлуша, П. А. Саскевича. – Горки : БГСХА, 2016. – 383 с.

5. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных, кормовых и технических растений : сб. отраслевых регламентов / НАН Беларуси, РУП «НПЦ НАН Беларуси по земледелию» ; под ред. В. Г. Гусакова и Ф. И. Привалова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2023. – 506 с.

6. Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси : сб. науч. тр. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по земледелию». – 3-е изд., перераб. и доп. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2017. – 688 с.

7. Особенности технологий и техническое обеспечение заготовки кормов из трав и силосных культур : сайт РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2017–2026. – URL: https://belagromech.by/

news/ osobennosti-tehnologij-i-tehnicheskoe-obes-pechenie-zagotovki-kormov-iz-trav-isilosnyhkultur (дата обращения: 11.03.2025).

8. Грабли колесно-пальцевые ГРЛ-9,6 : оф. сайт ОАО «Минойтовский ремонтный завод». – Гродненская обл., 2026. – URL: http://mrz.by/catalog/ products-catalog.html (дата обращения: 24.03.2025).

9. Грабли-валкователи колесно-пальцевые ГК-63 : оф. сайт ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйск-АгроМаш». – Бобруйск, 2026. – URL: https://bobruiskagromach.com/catalog/harvesting_equipment/rake_tractor (дата обращения: 24.03.2025).

10. Грабли-ворошилки валкообразователи прицепные ГВВП-6,0 : оф. сайт ОАО «Гомельоблагросервис». – Гомель, 2026. – URL: http://mrz.by/catalog/products-catalog.html (дата обращения: 24.03.2025).

11. To create performing machines you needtraditional experience: сайт компании Tonutti Wolagri Highlight S.R.L. – 2017–2025. − URL: http://www.tonutti_wolagri.com (дата обращения: 26.03.2025).

12. Машины Энороссиди для сенокоса: оф. сайт компании Enoagricola Rossi S.R.L. – Италия, 2023–2026. − URL: http://www. enoagricola_ rossi.com (дата обращения: 26.03.2025).

13. Оборудование для сенокоса : сайт компании Repossi Macchine Agricole S.R.L. – Италия, 2026. − URL: http:// www. repossi.com (дата обращения: 26.03.2025).

14. Техника POTTINGER : сайт компании POTTINGER. – 2026. − URL: https://t-snab.com/partners/parthner-potting er/?ysclid=mkgo7atb2a414714292 (дата обращения: 26.03.2025).

15. Agricultural Machinery: сайт компании KUHN. – Италия, 2026. − URL: http://www. kuhn.com (дата обращения: 26.03.2025).

16. Oxbo Forage : сайт компании Oxbo International Corp. – 2026. − URL: http://www.oxbo_international_corp.com (дата обращения: 26.03.2025).

17. Роторные грабли: сайт компании KRON. – 2026. − URL: https://www.krone-Agricultural.com/en/products/rotary-rakes (дата обращения: 26.03.2025).

18. Машины для зеленых кормов: сайт компании SaMASZ. – 2026. − URL: https://www.samasz.pl/ru/?ysclid= mkgs25a9bx995019190 (дата обращения: 26.03.2025).

19. RAKES 230/258 // Проспект фирмы New Holland North America (США), 2019. – 8 с.

20. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Технические условия ТУ BY 100230575.522-2023 / разработчик РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» // государственная регистрация № 069799 от 07.12.2023 г. – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 26 с.

21. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Руководство по эксплуатации ГВГ 00.00.000 РЭ / разраб.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 66 с.

22. Грабли-валкователи гребенчатые ГВГ-9,5. Паспорт ГВГ 00.00.000 ПС / разработчик РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2023. – 8 с.

23. Обосновать параметры, разработать и освоить производство прицепных гребенчатых граблей-валкователей : отчет о НИОКР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ; рук. Э. В. Дыба. – Мн., 2023. – 295 с. − № ГР 20213721.

УДК 631.331.022

Поступила в редакцию 20.08.2025
Received 20.08.2025

А. Н. Юрин[1], Д. И. Комлач [1], А. В. Захаров[2], А. А. Шевцов[3]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: anton-jurin@rambler.ru
[2]УО «Белорусский национальный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: tva-ktov 80@gmail.ru
г. Минск, Республика Беларусь
[3]УО «Белорусский государственный технологический университет»
г. Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПРОПОЛКИ ПИТОМНИКОВ

Аннотация. В данной статье представлено обоснование основных параметров робота-пропалывателя питомников.

Ключевые слова: междурядье, насаждение, штамб, защитная зона, ультразвуковой датчик, схема размещения.

A. N. Yurin[1], D. I. Komlach[1], A. V. Zakharov[2], A. A. Shevtsov[3]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: anton-jurin@rambler.ru
[2]EI "Belarusian National Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: tva-ktov80@gmail.ru
[3]EI "Belarusian State Technological University"
Minsk, Republic of Belarus

RESEARCH OF THE PROCESS OF ROBOTIC WEEDING OF NURSERIES

Abstract. This article presents the rationale for the main parameters of the nursery robotic weeder.

Keywords: aisle, planting, trunk, protective zone, ultrasonic sensor, layout intensive gardens.

Введение

В настоящее время уровень механизации работ в садоводстве остается самым низким в отрасли сельского хозяйства. Наиболее трудоемким процессом в садоводстве является прополка питомников, выполняемая вручную [1–2], так как механизация данной операции традиционными средствами невозможна.

В этой связи обоснование параметров роботизированных средств для прополки питомников является актуальной задачей [3].

Основная часть

Обоснование схемы расположения датчиков. При обработке почвы в межстволовой и околоштамбовой зоне посадочного материала плодовых культур необходимо соблюдение агротехнических требований (таблица).

Очевидно, что полное подрезание сорной растительности при отсутствии повреждений посадочного материала возможно только с применением системы автоматической ориентации рабо-

чего органа машины, основанной на бесконтактном методе определения наличия и расположения растений.

При этом полное подрезание сорной растительности возможно только при обработке почвы вплотную к саженцу, что может привести к его повреждению. Поэтому при прополке предусматривается создание защитной зоны возле обрабатываемых растений.

Агротехнические требования к выполнению операции прополки

Подрезание сорной растительности	95 %
Глубина обработки почвы	3–5 см
Отклонение от средней глубины обработки, не более	1 см
Повреждение насаждений	не допускается

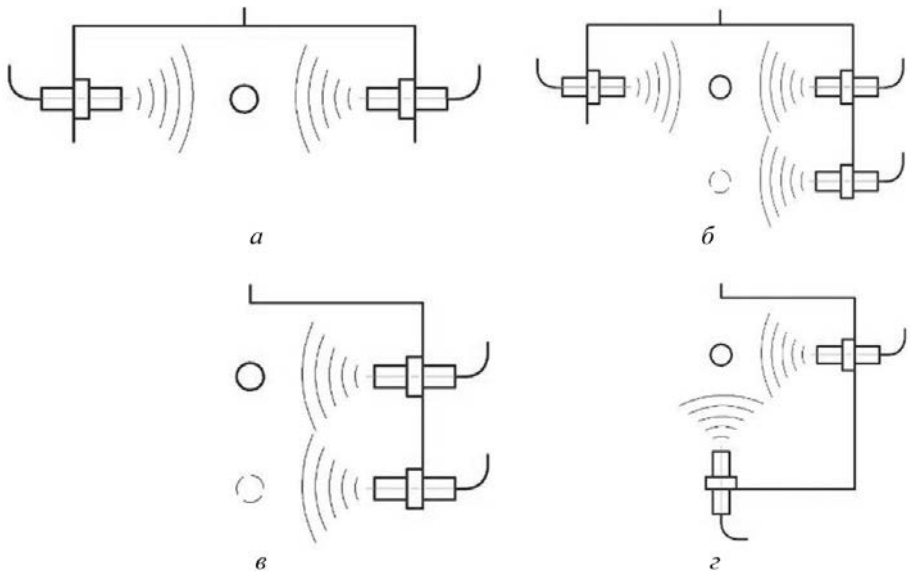
Бесконтактное определение положения саженца может быть основано на принципе технического зрения или осуществляться с использованием ультразвуковых датчиков. При этом рациональным является применение ультразвуковых датчиков, способных работать в условиях плохой видимости и высокого запыления.

Для обоснования рациональной конструктивно-технологической схемы пропалывателя опробованы различные схемы установки ультразвуковых датчиков: с поперечно-симметричным (рисунок, *а*), с поперечно-несимметричным (рисунок, *б*), с поперечным односторонним (рисунок, *в*) и продольно-поперечным (рисунок, *г*) расположением ультразвуковых датчиков.

Экспериментальные исследования представленных схем размещения показали, что точность определения расстояния до насаждений составляет 96; 96,2; 97,4 и 98,2 % соответственно.

Таким образом, для дальнейших исследований принята схема с продольно-поперечным расположением датчиков, примененная на макетном образец роботизированной машины, созданной в РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства».

Определение полноты срезания сорной растительности. Экспериментальные исследования роботизированной машины показали, что полнота подрезания сорной растительности зависит от скорости движения. При этом уничтожение сорной растительности в межстволовой и околоштамбовой зоне посадочного материала не менее 95 % может быть достигнута при скорости движения не более 0,8 км/ч.



Схемы размещения ультразвуковых датчиков на роботизированной машине:
а – поперечно-симметричное расположение; *б* – поперечно-несимметричное; *в* – поперечное одностороннее; *г* – продольно-поперечное

Заключение

Определена продольно-поперечная схема расположения ультразвуковых датчиков на роботизированной машине, обеспечивающая наибольшую точность определения расстояния до насаждений – не менее 98,2 %.

Чистота пропалывания посадочного материала составляет не менее 95 % при скорости движения роботизированной машины не более 0,8 км/ч.

Список использованных источников

1. Измайлов, А. Ю. Актуальность разработки перспективной системы машин и технологий для производства основных видов сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации и Республике Беларусь / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М. : ВИМ, 2015. – С. 10–14.

2. Бычков, В. В. Ресурсосберегающие технологии и технические средства для механизации садоводства / В. В. Бычков, Г. И. Кадыкало, И. А. Успенский // Садоводство и виноградарство. – 2009. – № 6. – С. 38–42.

3. Инновационные технические средства для садоводства / В. В. Бычков, Г. И. Кадыкало, В. А. Шевкун, П. В. Бондарев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2010. – № 4. – С. 68–72.

УДК 631.362

Поступила в редакцию 20.08.2025
Received 20.08.2025

А. Н. Юрин[1], А. В. Захаров[2], Е. Ю. Тодоров[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: anton-jurin@rambler.ru
[2]УО «Белорусский национальный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: tvak-tov_80@gmail.ru

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЛОДОВ ПРИ ИХ СОРТИРОВКЕ

Аннотация. В данной статье рассмотрены различные методы идентификации качества плодов с целью их сортировки. На ряду с идентификацией качества органолептическим методом с использованием органов чувств человека рассмотрены способы идентификации на основе механических, физических, химических и электромагнитных свойств плодов с помощью технических средств.

Ключевые слова: эталонные образы, реальные образы, идентификация качества, объекты контроля, статическая идентификация, динамическая идентификация, система технического зрения.

A. N. Yurin[1], A. V. Zakharov[2], E. Yu. Todorov[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: anton-jurin@rambler.ru
[2]UE "Belarusian National Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: tvak-tov_80@gmail.ru

JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE QUALITY OF FRUITS DURING THEIR SORTING

Abstract. This article discusses various methods for identifying the quality of fruits in order to sort them. Along with the identification of quality by the organoleptic method using the human senses, methods of identification based on the mechanical, physical, chemical and electromagnetic properties of fruits by means of technical means are considered.

Keywords: reference images, real images, quality identification, control objects, static identification, dynamic identification, vision system.

Введение

Наиболее трудоемкий процесс в производстве плодов – контроль их качества, включающий сортировку с целью удаления нестандартной продукции и примесей. На эти операции приходится до 70 % всех трудозатрат, они ведутся вручную при визуальном контроле [1–3]. Контроль качества и сортировка, направленные на сокращение потерь продукции это сложная задача, решить которую можно только созданием быстродействующих автоматических средств контроля и сортировки. Однако отсутствие теоретических исследований, системно излагающих принципы построения средств контроля и сортировки плодов, – одна из основных причин неразрешенности проблемы.

Основная часть

В настоящее время известен ряд методов и методик, позволяющих контролировать качество плодовой продукции [4–15]. Их можно разделить на субъективные (органолептические) и объективные (технические) методы. Органолептические методы основаны на восприятии человеком (экспертом) внешнего вида, вкуса, запаха, осязания текстуры, а также звука в ответ на воздействие.

Органолептическая идентификация качества (ИК) построена на сопоставлении эталонного образа (ЭО), сформированного человеком на основе предварительных обучающих процедур, с образом контролируемого объекта:

$$\text{ИК} = \begin{matrix} \text{ЭО}_1 \\ \text{ЭО}_2 \\ \dots \\ \text{ЭО}_n \end{matrix} \left| \begin{matrix} \text{РО}_1 & \text{РО}_2 & \dots, & \text{РО}_n \\ & A & & \end{matrix} \right|,$$

где ИК – идентификация качества; ЭО – эталонные образы (внешнего вида, вкуса, запаха и т. д.) воспринятых эталонных объектов; РО – реальные образы воспринятых контролируемых объектов; A – некоторое множество соотношений идентифицируемых образов.

Эталонные образы – результат представления некоторых эталонных объектов идентификации качества, восприятия их органами чувств человека и запоминания их человеком:

$$\text{ЭО} = \begin{matrix} \text{Э}_1 \\ \text{Э}_2 \\ \dots \\ \text{Э}_n \end{matrix} \left| \begin{matrix} \text{Ч}_1 & \text{Ч}_2 & \dots, & \text{Ч}_n \\ & A_{\text{п}} & & \end{matrix} \right|,$$

где Э – эталонные объекты контроля (стандартные образы, объекты высшей категории качества, эталоны качества и др.); Ч – восприятие органами чувств человека; $A_{\text{п}}$ – множество представлений.

Реальные образы формируются, как и эталонные, при экспертизе реальных объектов контроля:

$$\text{ЭО} = \begin{matrix} \text{Э}_1 \\ \text{Э}_2 \\ \dots \\ \text{Э}_n \end{matrix} \left| \begin{matrix} \text{Ч}_1 & \text{Ч}_2 & \dots, & \text{Ч}_n \\ & A_{\text{э}} & & \end{matrix} \right|,$$

где ОК – объекты контроля; Ч – восприятие органами чувств человека; $A_{\text{э}}$ – множество экспертиз.

На рисунке 1 представлена схема процесса идентификации качества плодов органолептическим методом.

Объекты контроля имеют пространственные и временные области ограничения, которые можно классифицировать как *годная* продукция и *дефектная*:

$$\text{ОК} = \begin{matrix} \text{ГП}_1 \\ \text{ГП}_2 \\ \dots \\ \text{ГП}_n \end{matrix} \left| \begin{matrix} \text{Д}_1 & \text{Д}_2 & \dots, & \text{Д}_n \\ & A_{\text{о}} & & \end{matrix} \right|,$$

где ГП – области годной продукции (кожица, мякоть, сердцевина и др.); Д – области дефектов (болезни, механические повреждения, загрязненность и др.); $A_{\text{о}}$ – множество соотношений (пересекаются, объединяются, взаимоисключаются и т. д.).

Эти области могут восприниматься и как единое целое, и по частям.

При оценке качества контролируемый объект представляется несколькими изображениями (копиями). Восприятие копии верное, если оно равнозначно отражает хотя бы некоторые параметры оригинала.

Восприятие органами зрения человека намного информативнее, чем другими органами чувств. Это обеспечивается за счет дистанционности, оперативности, селективности, целенаправленности, чувствительности, гибкости восприятия. Эти достоинства могут служить эталонными критериями при разработке любых технических методов с пожеланием устранения существенного недостатка – неидентичности восприятия разными людьми и нестабильности (за счет утомляемости) восприятия во времени.

Другой принципиальный недостаток органолептических методов – малая функциональная возможность обеспечения всех уровней контроля и управления качеством продукции из-за от-

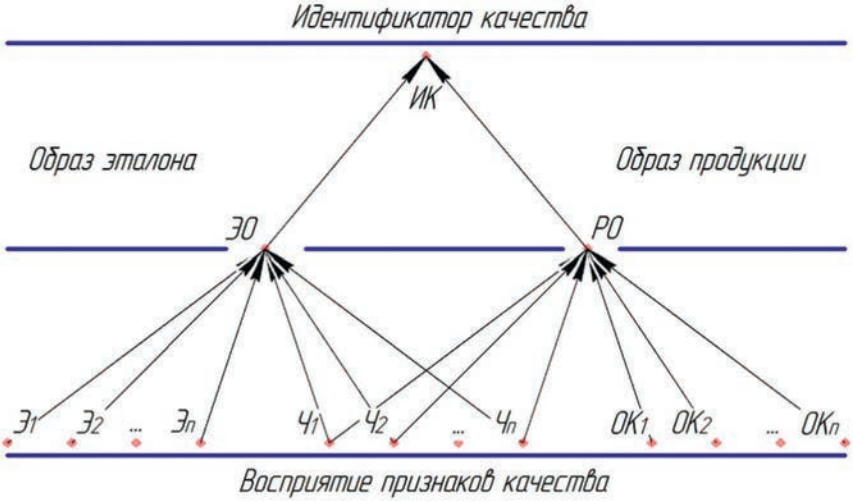


Рисунок 1 – Схема процесса идентификации качества плодовой продукции органолептическим методом: *Э* – эталонные объекты; *Ч* – человек; *ОК* – объекты контроля; *ЭО* – эталонные образы; *РО* – реальные образы; *ИК* – идентификация качества

сутствия средств построения в требуемых масштабах четких и взаимосвязанных систем обеспечения качества.

Указанные недостатки возможно устранить при разработке технических методов идентификации качества.

Технические методы контроля продукции позволяют значительно расширить структуру идентификации качества за счет иерархического образования дополнительных уровней (статической и динамической идентификации):

$$\text{ИК} = \begin{matrix} \\ \text{СИ} \\ \text{ДИ} \end{matrix} \begin{vmatrix} \text{СИ} & \text{ДИ} \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix},$$

где ИК – идентификация качества; СИ – статическая идентификация качества; ДИ – динамическая идентификация качества.

Возможности статической идентификации расширяются путем накопления результатов идентификации в зависимости от числа элементов продукции (компонентов, участков плодов, единиц, групп и объемов плодов):

$$\text{СИ} = \begin{matrix} \text{ИК}_1 \\ \text{ИК}_2 \\ \dots \\ \text{ИК}_n \end{matrix} \begin{vmatrix} N_1 & N_2 & \dots, & N_n \\ & & A & \end{vmatrix},$$

где ИК – идентификация качества единичного элемента продукции; N – число элементов продукции; A – множество реализаций.

Возможности динамической идентификации расширяются за счет накопления результатов идентификации в зависимости от динамических факторов (времени, температуры, окружающей среды и т. п.):

$$\text{ДИ} = \begin{matrix} \text{ИК}_1 \\ \text{ИК}_2 \\ \dots \\ \text{ИК}_n \end{matrix} \begin{vmatrix} T_1 & T_2 & \dots, & T_n \\ & & A & \end{vmatrix},$$

где T – динамический фактор; A – множество реализаций.

Динамический и статический приемы в совокупности могут образовывать кинетический способ идентификации, учитывающий динамические и статические факторы изменения качества. На рисунке 2 изображена схема процесса идентификации качества плодовой продукции на основе технических методов контроля.

Применение статических, динамических и кинематических (комбинированных) способов идентификации позволяет осуществлять систематизацию и стандартизацию качества плодовой продукции на основе накопления и интерпретации прошлой и текущей информации о качестве, прогнозировать и определять тенденции изменения качества, получать данные для управления качеством.

Статическая идентификация качества основана на сопоставлении некоторых статических параметров, определенных для совокупности контролируемых объектов, например, таких, как математическое ожидание, дисперсия, функция распределения, корреляционные и спектральные функции.

Динамическая идентификация качества предусматривает сопоставление аналогичных параметров, изменяющихся за вегетацию, время хранения и переработки.

Кинетические методы идентификации основаны на представлении качества в виде совокупностей статической идентификации и последовательности динамической идентификации процессов изменения качества, учитывающих их эргодичность и солидарность:

$$КИ = \begin{array}{c|ccc} & Э & ЛЭ & НЭ \\ С & 1 & 1 & 1 \\ ЛС & 1 & 1 & 1 \\ НС & 1 & 1 & 1 \end{array},$$

где С – стационарный процесс изменения качества; ЛС – локально-стационарный; НС – нестационарный; Э – эргодический; ЛЭ – локально-эргодический; НЭ – неэргодический процесс изменения качества.

Выбор лучших технических методов идентификации качества (таблица) целесообразнее осуществлять в соответствии их уровням качества продукции. Выделим некоторые из них по глубине

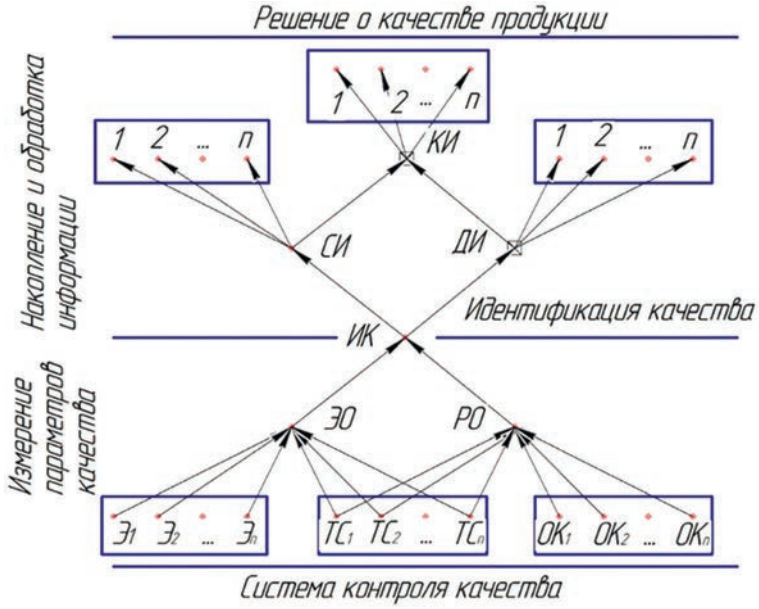


Рисунок 2 – Схема процесса идентификации качества плодовой продукции на основе технических методов контроля: *ТС* – технические средства контроля; *ОК* – объекты контроля; *Э* – эталоны; *ЭО* и *РО* – эталонные и реальные образы качества; *ИК* – идентификация качества; *СИ, ДИ, КИ* – статическая, динамическая и кинематическая идентификации

интеграции или дифференциации элементов продукции (плодов): 1 – объемный (плоды нескольких видов), 2 – групповой (плоды одного вида); 3 – единичный (плод); 4 – макроструктурный (участок плода); 5 – микроструктурный (компонент участка плода). Обозначим их соответственно $У_1$, $У_2$, …, $У_5$.

Для этих уровней качества возможна разработка тождественных им технических средств контроля. Обозначим их аналогично уровням качества $ТС_1$, $ТС_2$, …, $ТС_5$ и определим следующую матрицу соответствия «уровни качества – средство контроля»:

$$M = \begin{array}{c|ccccc} & У_1 & У_2 & У_3 & У_4 & У_5 \\ ТС_1 & 1 & & & & \\ ТС_2 & & 1 & & A & \\ ТС_3 & & & 1 & & \\ ТС_4 & & A & & 1 & \\ ТС_5 & & & & & 1 \end{array},$$

где 1 – соответствие; *A* – множество других связей и соответствий.

Лучшим является тот метод, который позволяет контролировать наибольшее число уровней качества при наименьшем числе технических средств (минимальной себестоимости).

Классификация технических методов идентификации качества

Методы идентификации качества	Информативные параметры метода
Механические	Плотность, удельная масса, удельный объем, коэффициенты: трения, качения, скольжения; парусность, размеры, форма
Химические	Термохимия, электрохимия, осаждение осадка, промывание, растворение, экстрагирование, фильтрация
Физические	Удельная теплота, теплопроводность, проводимость, диэлектрическая проницаемость, объемный заряд, потенциал
Электромагнитные	Электрические и магнитные поля, рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, инфракрасные лучи, лазерное излучение

Механические методы измерения параметров качества, основанные на использовании средств измерения массы, объема и плотности, линейных размеров, не позволяют полностью отказаться от участия человека в работе, обладают низкой производительностью и информативностью, вследствие чего непригодны для макро- и микроструктурных оценок.

Физические методы контроля основаны на измерении электрических, диэлектрических, акустических параметров и позволяют увеличить количество контролируемых характеристик качества. Однако и они не отличаются высокой производительностью, информативностью и к тому же ограничиваются измерением одних макроструктурных свойств.

Химические методы позволяют оценивать микроструктурные показатели качества, такие как содержание белка, углеводов, липидов, витаминов, аминокислот, микроэлементов.

Однако такие методы слишком сложные, дорогостоящие и неоперативные, вследствие чего применяются только в качестве лабораторных.

При этом оценка качества плодов нуждается в оперативном методе контроля во время перемещения продукции или преобразования ее из одного вида в другой без нарушения целостности продукта, т. е. контроль должен быть неразрушающим, дистанционным.

В то же время *электромагнитные методы,* такие как радиоволновые, СВЧ, оптические, рентгеновские и изотопные, в полной мере соответствуют современным требованиям. Из них *оптические* выделяются высокой точностью измерения качества и большим соответствием условиям технологии. Наиболее важные из них: технологический процесс не должен прерываться или менять скорость, оптическое излучение не должно сказываться на свойствах продукции.

Реализация идентификации качества плодов посредством оптических свойств может быть реализована с помощью системы технического зрения (СТЗ).

СТЗ должна состоять из оптического модуля с установленной структурной подсветкой и видеокамерой, электронного блока управления с интерфейсом и исполнительными механизмами сортировщика и конвейера для плодов.

Оптический модуль располагается над конвейером, по которому транспортируются яблоки. При такой схеме размещения оборудования для обеспечения многосторонней видеосъемки плодов необходимо обеспечить их равномерное вращение вокруг своей оси во время прохождения модуля оптического сортировщика.

Заключение

Повышение качества выполнения технологического процесса сортировки плодов возможно только внедрением в сельскохозяйственное производство автоматизированных средств идентификации качества без участия человека. Наиболее рациональным методом идентификации качества плодов является оптический метод с использованием СТЗ, как обладающий точностью и стабильностью измерения, а также дистанционностью и высокой производительностью.

Список использованных источников

1. Казакевич, П. П. Садоводство Республики Беларусь: проблемы и перспективы развития / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин // Земледелие и растениеводство. – 2020. – № 6. – С. 3–7.

2. Механизация трудоемких процессов в садоводстве : офиц. сайт РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» / А. Н. Юрин, Д. А. Жданко. – Мн., 2018–2025. – URL: https://belagromech.by/articles/mehanizatsiya-trudoemkih-protsessov-v-sadovodstve/ (дата обращения: 30.04.2024).

3. Казакевич, П. П. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин, Г. А. Прокопович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2021. – Т. 59. – № 4. – С. 488–500.

4. Кирина, М. В. Применение методов люминесцентного анализа в системах технического зрения при сортировании плодов / М. В. Кирина [и др.] // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Мичуринск, 10–12 ноября 2014 г. / Мичур. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2014. – С. 188–191.

5. Бобров, В. П. Применение систем технического зрения / В. П. Бобров // Механизация и автоматизация производства. – 1989. – № 9. – С. 23–25.

6. Гурьянов, Д. В. Повышение эффективности сортирования яблок на основе цветных телевизионных датчиков : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Гурьянов Дмитрий Валерьевич ; Мичуринский ГАУ. – Мичуринск, 2004. – 199 л.

7. Рудник, Ю. А. Робототехническая система для сортирования яблок / Ю. А. Рудник, С. В. Журавлев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Междунар. науч.- практ. конф., Мичуринск, 10–12 ноября 2014 г. / Мичуринский гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2014. – С. 32–34.

8. Хорт, Д. О. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе / Д. О. Хорт [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 1 (38). – С. 133–141.

9. Ganganagowdar, N. V. An intelligent computer vision system for vegetables and fruits quality inspection using soft computing techniques/ N. V. Ganganagowdar, A. V. Gundad // Agricultural Engineering International. CIGR J. – 2019. – Vol. 21. – № 3. – P. 171–178.

10. Lu, Y. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples/ Y. Lu; R. Lu // Transactions of the ASABE. – 2017. – Vol. 60. – № 4. – P. 1379–1389.

11. Kortylewski, A. Training deep face recognition systems with synthetic data / A. Kortylewski [et al.] // Cornell University Library. – 2018. – URL: https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf (date of access: 16. 04. 2018).

12. Жиркова, А. А. Автоматизированная система гиперспектрального контроля дефектов яблок / А. А. Жиркова, П. В. Балабанов, А. Г. Дивин // Соременная наука: теория, методология, практика : материалы III Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Тамбов, 12–14 апреля 2021 г. / Тамб. гос. техн. ун-т ; редкол.: В. П. Монастырев [и др.]. – Тамбов, 2021. – С. 291–296.

13. Балабанов, П. В. Роботизированный комплекс для сортировки яблок / П. В. Балабанов [и др.] // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–23 октября 2020 г. : в 2 т. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2020. – Т. 2. – С. 44–47.

14. Mehl P. M. Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis/ P. M. Mehl [et al.] // Appl. Engineering in Agricultural. – 2002. – Vol. 18. – № 2. – P. 219–226.

15. Li, C. Genetic algorithms (GAs) and evolutionary strategy to optimize electronic nose sensor selection / C. Li, P. H. Heinemann, P.M. Reed // Transactions of the ASABE. – 2008. – Vol. 51. – № 1. – P. 321–330.

УДК 631.331

Поступила в редакцию 19.01.2026
Received 19.01.2026

Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mehposev@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ВЫСЕВА МЕХАНИЧЕСКИМИ СЕЯЛКАМИ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ БУНКЕРОМ

Аннотация. В статье на основании проведенного априорного ранжирования и экспериментальных исследований установлено, что наиболее существенным фактором, оказывающим влияние на качество процесса дозирования посевного материала механической сеялки с централизованным бункером, является зазор между витками шнека и стенками посевного ящика, а также частота вращения шнека.

Ключевые слова: высев, зазор, шнек, частота вращения, фактор, неустойчивость высева, неравномерность высева, дробление.

N. D. Lepeshkin, V. V. Mikulsky, V. V. Mizhurin

SUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mehposev@mail.ru

SOIL CULTIVATION AND SEEDING COMPLEX OF MACHINES FOR RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF GRAIN PRODUCTION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Abstract. In the article, based on the conducted a priori ranking and experimental studies, it was established that the most significant factor influencing the quality of the seed dosing process of a mechanical seeder with a centralized hopper is the gap between the auger turns and the walls of the seed box, and the rotation speed of the auger.

Keywords: seeding, gap, auger, rotation speed, factor, seeding instability, seeding unevenness, crushing.

Введение

Одним из направлений повышения производительности при посеве зерновых является увеличение рабочей скорости и ширины захвата посевных машин (6 м и более). Поэтому посевные машины с механическим высевом начали вытесняться более технологичными посевными машинами с пневматическим высевом семян и гранул минеральных удобрений [1]. Основными конструктивными особенностями современных широкозахватных посевных машин с пневматическим высевом являются наличие централизованного бункера большой вместимости и быстрый перевод из транспортного положения в рабочее. Это, наряду с увеличением скорости и ширины захвата, также способствует повышению производительности. Вместе с тем одной из проблем пневматического высева является низкая точность распределения посевного материала по ширине захвата (поперечная неравномерность). Известно, что неравномерность распределения семян по сошникам при высеве зерновых и зернобобовых культур в пневматических высевающих системах, особенно на склоновых землях, превышает значения, регламентированные агротребованиями, и составляет в среднем от 9,6 до 15,5 % для зерновых культур при допустимых для пневматических сеялок 5 % [2]. Установлено, что при неравномерности высева между сошниками выше 10 % наблюдается устойчивое снижение урожайности на 1–2 ц/га [3, 4]. Это обусловлено несовершенством технологического процесса распределения семян пневматической высевающей системой. Данных недостатков лишена предлагаемая нами перспективная схема

широкозахватной механической сеялки, которая имеет ряд отличительных особенностей. Применен централизованный бункер большого объема с двумя емкостями для посевного материала; подача посевного материала из централизованного бункера к сошникам осуществляется ступенчато: сначала посевной материал самотеком поступает в отдельные посевные ящики, а затем из них дозируется в каждый сошник. Распределение посевного материала в ящиках производится с помощью распределительного и обратного шнеков [5].

Цель исследований – установить факторы, которые могут оказать влияние на качество высева при использовании перспективных механических сеялок с централизованным бункером, выполненных по предложенной схеме.

Основная часть

Анализ работ [6–11], посвященных повышению качества высева посевного материала, а также взаимодействию элементов высевающей системы с посевным материалом, в том числе и со шнеками, позволил выявить 12 факторов, способных оказать влияние на качество высева: X_1 – норма высева; X_2 – влажность семян; X_3 – диаметр выпускных отверстий централизованного бункера сеялки; X_4 – диаметр шнека; X_5 – частота вращения шнека; X_6 – коэффициент трения посевного материала; X_7 – насыпная плотность посевного материала; X_8 – угол наклона желобков катушки; X_9 – зазор между стенками ящика и винтом шнека; X_{10} – рабочая длина катушки; X_{11} – шаг витка шнека; X_{12} – толщина активного слоя.

В результате анкетного опроса специалистов в области посева сельскохозяйственных культур составлен алгоритм для определения коэффициента конкордации (таблица 1).

Таблица 1 – **Алгоритм определения коэффициента конкордации факторов, оказывающих влияние на качество высева посевного материала**

Исследователь	Фактор											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
1	3	8	7	6	11	4	1,5	10	12	9	5	1,5
2	1,5	1,5	4	3	12	5,5	7	8	9	5,5	10	11
3	1	8,5	8,5	7	10	3,5	6	12	11	2	5	3,5
4	2,5	2,5	5,5	5,5	11	8	10	7	12	9	4	1
5	9	8	6,5	6,5	12	4	5	11	10	2,5	1	2,5
$\sum_{j=1}^{m} a_{ij}$	17	28,5	31,5	28	56	25	29,5	48	54	28	25	19,5
$\sum_{j=1}^{m} a_{ij} - Z$	–15,5	–4,0	–1,0	–4,5	23,5	–7,5	–3,0	15,5	21,5	–4,5	–7,5	–13,0
Δ_i^2	240,25	16,0	1,0	20,25	552,25	56,25	9,0	240,25	462,25	20,25	56,25	169,0

В связи с тем, что при обработке анкетных данных были выявлены «связанные ранги», коэффициент конкордации вычислялся по формуле (1)

$$W = \frac{S_t}{\frac{1}{12} m_z^2 (n_z^3 - n_z) - m_z \sum_i T_i}, \quad (1)$$

где S_t – сумма квадратов отклонений; m_z – количество опрашиваемых специалистов; n_z – количество факторов; T_i – параметр.

$$S_t = \sum_{i=1}^{n} \Delta i^2, \quad (2)$$

где Δi^2 – квадрат отклонения; Δi – отклонение от средней суммы рангов.

$$\Delta i = \sum_{j=1}^{m} a_{ij} - Z, \tag{3}$$

где Z – среднее значение всех сумм рангов; $\sum_{j=1}^{m_z} a_{ij}$ – сумма рангов.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n_z}\sum_{j=1}^{m_z} a_{ij}}{n_z}. \tag{4}$$

$$Z = \frac{390}{12} = 32{,}5.$$

$$S_t = 1843.$$

Параметр T_i определялся по следующей зависимости:

$$T_i = \frac{1}{12}\sum_{j=1}^{m_z}(t_j^3 - t_j), \tag{5}$$

где t_j – j-е число одинаковых рангов в i-м ранжировании.

$$\sum_{i=1}^{n} T_i = \frac{1}{12}\left(\left(1^3 - 1\right) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2)\right) = 2.$$

Подставив значения в формулу (1), получим

$$W = \frac{1843}{\frac{1}{12}5^2\left(12^3 - 12\right) - 5 \cdot 2} = 0{,}52.$$

Таким образом, коэффициент конкордации, позволяющий оценить степень согласованности мнений опрошенных специалистов, в нашем случае $W = 0{,}52$, что отлично от нуля.

Значимость коэффициента конкордации проверяли по критерию Пирсона χ^2, который ввиду наличия «связанных рангов» определялся по формуле

$$\chi^2 = \frac{S_t}{\frac{1}{12}m_z n_z (n_z + 1) + \frac{1}{n_z - 1}\sum_{j=1}^{m_z} T_i}. \tag{6}$$

$$\chi^2 = \frac{1843}{\frac{1}{12}5 \cdot 12(12 + 1) - \frac{1}{12 - 1}2} = 27{,}576.$$

Согласно [13] для уровня значимости 5 % и числа степеней свободы $f = 11$, табличное значение критерия Пирсона равно

$$\chi^2_{\text{табл}} = 19{,}681 < \chi^2 = 27{,}576.$$

Вследствие того, что табличное значение критерия меньше расчетного, с вероятностью $a_д = 0{,}95$ можно утверждать, что согласованность мнения специалистов относительно влияния факторов на показатели качества не является случайным и оценивается коэффициентом конкордации $W = 0{,}52$.

По результатам ранжирования построена априорная диаграмма рангов (рисунок 1). Для этого по оси абсцисс отложены факторы в порядке возрастания их рангов, а по оси ординат – суммы рангов соответствующих факторов.

Таким образом, в результате представленного анализа наиболее значимыми факторами, по мнению специалистов, влияющими на процесс высева посевного материала системой высева

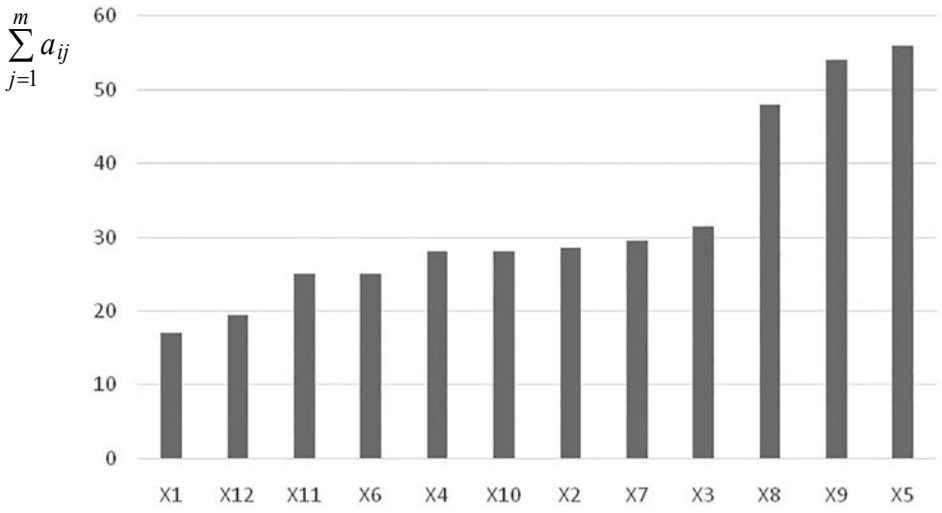


Рисунок 1 – Априорная диаграмма рангов

с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки, являются зазор между стенками ящика и винтом шнека (фактор X_9) и частота вращения шнека (фактор X_5).

Для подтверждения данного вывода были проведены предварительные исследования на высеве семян различных культур и гранулированных минеральных удобрений, в ходе которых определялись неустойчивость высева (коэффициент вариации) ν, %, неравномерность высева H_p, % и дробление посевного материала, %. При этом постоянными были приняты такие факторы, как диаметр выпускного отверстия централизованного бункера D = 120 мм, диаметр шнека $D_{шн}$ = 100 мм, шаг витков шнека S = 100 мм, диаметр вала шнека $d_в$ = 32 мм, угол наклона желобков катушки α = 15°.

Численные значения указанных факторов были определены в результате ранее проведенных теоретических исследований [14]. Переменными факторами были зазор между стенками ящика и винтом шнека (k), а также частота вращения шнека (n).

Для проведения исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка, эмитирующая работу системы высева механической сеялки с централизованным бункером (рисунок 2).

Техническое описание и принцип работы установки, а также применяемые приборы отражены в статье данного сборника «Экспериментальная установка и приборы для исследования процесса двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с централизованным бункером».



а *б* *в*

Рисунок 2 – Экспериментальная установка с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам: *а* – экспериментальная установка централизованной двухступенчатой подачи семян и удобрений к сошникам; *б* – макетный образец шнеко-катушечного распределителя семян и удобрений; *в* – макетный образец бункера с блоком дозатора зерна и удобрений

Перед проведением экспериментальных исследований определялись основные физико-механические свойства посевного материала, при этом использовались семена посевных кондиций. Влажность посевного материала определялась влагомером ЭВЛАС-2М, объемная масса – объемным и весовым методом, геометрические параметры – штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05 (ГОСТ 166-89). Результаты исследований посевного материала представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – **Физико-механические свойства семян**

Показатель	Среднее значение показателя			
	Культура			
	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
Масса 1 000 семян, г	44,1	38,9	42,3	36,8
Влажность семян, %	14,1	13,8	14,2	14,3
Объемная масса, кг/м^3	735	679	710	706
Эквивалентный диаметр, мм	3,5	3,8	4,0	3,6

Таблица 3 – **Физико-механические свойства гранулированного суперфосфата**

Показатели	Среднее значение показателя
Влажность, %	2,5
Плотность, кг/м^3	990
Фракционный состав, %: – менее 1; – от 1 до 2 мм; – от 2 до 3 мм; – от 3 до 5 мм; – более 5 мм	 0,2 51,3 46,5 2 –

Анализ данных, приведенных в таблицах 2 и 3, показывает, что физико-механические свойства культур, которые в значительной степени влияют на технологический процесс высева, отличаются между собой незначительно.

Все эксперименты проводились на хозяйственной норме высева в трехкратной повторности.

Привод и регулировка частоты вращения катушек высевающих аппаратов и распределительного шнека производились с помощью электродвигателей, в цепи питания которых были установлены соответственно источник питания MastechHY 3030E с регулятором мощности и преобразователь частоты векторный M680 фирмы «Oni». Регулировка зазора между стенками ящика и витками шнека производилась с помощью пластин. Частота вращения катушки, а также частота вращения распределителя шнекового определялись с помощью тахометра электронного UT 370. Вес отобранных проб посевного материала определялся с помощью электронных весов ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25-7724-010-98) с точностью до 0,01 г, а вес отобранных проб посевного материала для изучения дробления и травмирования – с помощью электронных весов MAX 50 «Radwag» с точностью до 0,001 г. Повреждение посевного материала изучали визуальным методом с использованием электронного микроскопа Andostar AD209 с 13–80-кратным увеличением.

Методика проведения исследований

Неустойчивость высева семян зерновых культур и минеральных удобрений определяли при минимальной, хозяйственной и максимальной нормах высева взятием проб непосредственно после дозирующего устройства. Пробы отбирали после установки дозирующего устройства на заданную норму высева. Отбор проб производили в трехкратной повторности на каждой заданной норме высева. Семена и удобрения, высеянные дозирующим устройством, собирали в емкость и определяли их массу. Обработка данных при определении неустойчивости высева заключалась в определении:

– среднего значения исследуемого параметра (масса посевного материала)

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i-1}^{n_c} x_i}{n_c}, \tag{7}$$

где i – номер дозирующего устройства; n_c – количество дозирующих устройств, шт.; $x_{\text{ср}}$ – среднее значение параметра (масса посевного материала), г;

– среднего квадратического отклонения

$$S_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n_c - 1}}. \tag{8}$$

– коэффициента вариации

$$v = \frac{S_M}{x_{\text{ср}}}. \tag{9}$$

Неравномерность высева семян и удобрений определяли при хозяйственной норме высева взятием проб непосредственно после дозирующего устройства. После установки на заданную хозяйственную норму высева отбирали пробы в трехкратной повторности. Семена и удобрения, высеянные каждым дозирующим устройством, собирали в емкости и определяли их массу. При обработке данных вычисляли следующие показатели:

1) среднюю массу семян и удобрений, высеянных i-м дозирующим устройством из всех повторностей q_i, г, вычисляют по формуле

$$\overline{q}_i = \frac{\sum_{j-1}^{n} q_i}{n}, \tag{10}$$

где q_i – масса семян, высеянных i-м дозирующим устройством в j-й повторности, г; n – число повторностей, шт.;

2) среднюю массу семян, высеянных одним дозирующим устройством, q, г, вычисляют по формуле

$$\overline{q} = \frac{\sum_{j-1}^{n_a} \overline{q}_i}{n_a}, \tag{11}$$

где n_a – число дозирующих устройств, шт.;

3) отклонение массы семян в высеве i-м дозирующим устройством от среднего значения Δq_i, г вычисляют по формуле

$$\Delta q_i = \overline{q}_i - \overline{q}; \tag{12}$$

4) среднеарифметическое отклонение $\Delta\overline{q}_i$, г, вычисляют по формуле

$$\Delta\overline{q}_i = \frac{\sum_{j-1}^{n_a} |\Delta q_i|}{n_a}; \tag{13}$$

5) неравномерность высева семян между дозирующими устройствами H_p, %, определяют по формуле

$$H_p = \frac{\Delta\overline{q}_i}{\overline{q}} 10^2. \tag{14}$$

Семена и минеральные удобрения на дробление отбирали во время определения неравномерности высева отдельными дозирующими устройствами на хозяйственной норме высева, объединяя для этого в среднюю пробу семена, высеянные всеми дозаторами за повторность опыта. Из каждой средней пробы выделяли две навески. Масса навески – по ГОСТ 12037-81 [15]. Из каждой навески выделяли битые (дробленые) семена. Дробленые семена взвешивали с погрешностью ±0,01 г. Массовую долю семян дробленых (Д, %), вычисляли по формуле

$$Д = \frac{m_{др}}{m_{н}} 10^2, \quad (15)$$

где $m_{др}$ – масса семян дробленых, выделенных из навески, г; $m_{н}$ – общая масса семян в навеске, г.

Предварительно содержание дробленых семян было определено в исходном материале. По разнице содержания дробленых семян, прошедших через элементы системы высева установки и в исходном материале, определяли дробление семян элементами установки.

Результаты исследования

Результаты экспериментальных исследований влияния конструктивных параметров и режимов работы широкозахватной механической сеялки с централизованным бункером на качество высева посевного материала представлены в таблице 4.

Таблица 4 – **Показатели качественной оценки процесса дозирования посевного материала системой высева с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки**

Культура	Фактор		Показатель качества процесса высева		
	Зазор между стенками ящика и винтом шнека	Частота вращения шнека	Неустойчивость высева	Неравномерность высева	Дробление
	мм	об/мин	%		
Пшеница	10	60	1,06	2,88	1,190
	26	60	0,72	2,94	0,245
	10	100	0,51	2,94	1,463
	26	100	0,94	2,25	0,295
Рожь	10	60	1,12	2,64	1,260
	26	60	0,89	2,55	0,268
	10	100	0,96	2,69	1,427
	26	100	0,73	2,71	0,297
Ячмень	10	60	1,27	2,86	1,223
	26	60	1,06	2,45	0,292
	10	100	0,91	2,97	1,414
	26	100	0,93	2,3	0,281
Овес	10	60	0,98	2,76	1,174
	26	60	0,62	2,54	0,237
	10	100	0,79	2,39	1,454
	26	100	1,04	2,89	0,292
Суперфосфат	10	60	2,82	5,26	–
	26	60	2,30	4,54	–
	10	100	2,89	5,93	–
	26	100	2,01	4,89	–
Горох	10	60	1,08	2,6	0,740
	26	60	1,72	2,42	0,273
	10	100	1,97	2,22	0,851
	26	100	1,03	2,13	0,264
Рапс	10	60	2,81	2,60	–
	26	60	2,90	2,59	–
	10	100	2,92	2,44	–
	26	100	3,06	2,93	–

Анализ результатов, представленных в таблице 4, показывает, что при изменении зазора между стенками посевного ящика и витками шнека с 10 до 26 мм и частоты вращения шнека с 60 до 100 об/мин, показатели качества при высеве различных культур изменяются следующим образом:

– неустойчивость общего высева зерновых культур (пшеница, рожь, ячмень, овес) изменяется в пределах от 0,51 до 1,27 %, зернобобовых (горох) – в пределах от 1,03 до 1,97 %, крестоцветных (рапс) – от 2,81 до 3,06 % и гранулированных минеральных удобрений (суперфосфат) – от 2,01 до 2,89 %, что соответствует требованиям ТНПА для механических сеялок (не более 3 % для зерновых, 4 % для зернобобовых культур и 10 % для удобрений) [2]);

– неравномерность высева между отдельными высевающими аппаратами зерновых культур изменяется в пределах от 2,30 до 2,97 %, зернобобовых – от 2,13 до 2,60 %, крестоцветных – от 2,81 до 3,06 % и удобрений – от 2,01 до 2,82 %, что соответствует требованиям ТНПА для механических сеялок (не более 3 % для зерновых, 4 % для зернобобовых культур и 10 % для удобрений);

– дробление семян зерновых изменяется от 0,237 до 1,463 %, зернобобовых – от 0,264 до 0,851 %, что не соответствует требованиям ТНПА для зерновых по верхнему пределу (не более 0,3 % для зерновых и 1,0 % для зернобобовых).

Заключение

Априорным ранжированием установлено, что факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на качество высева механической сеялки с централизованным бункером, в конструкции которой используются шнеки, наиболее существенное влияние оказывают зазор между стенками посевного ящика и витком шнека, а также частота вращения шнека.

Экспериментально установлено, что при уменьшении зазора между стенками посевного ящика и витком шнека с 26 до 10 мм и увеличении частоты вращения шнека с 60 до 100 об/мин дробление семян увеличивается и для зерновых культур превышает требуемый ТНПА показатель. При этом показатели неравномерности распределения семян по сошникам и неустойчивости общего высева не превышают регламентированные ТНПА показатели.

С учетом полученных результатов, подтверждающих влияние зазора между стенками посевного ящика и витком шнека и частоты вращения шнека на показатели качества, и, в первую очередь, показатель дробления, который не полностью соответствуют требованиям ТНПА, необходимо продолжить исследования и определить оптимальные значения зазора и частоты вращения.

Список использованных источников

1. Лепешкин, Н. Д. К обоснованию конструктивно-технологической схемы широкозахватной зерновой сеялки / Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2025. – Вып. 58. – С. 126–131.

2. Машины посевные и посадочные. Правила установления показателей назначения: ТКП 078 – 2007. – Введ. 06.08.2007 – Мн. : Бел. научн. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2007. – 40 с.

3. Бахмутов, В. А. Влияние равномерности размещения растений по площади на урожайность / В. А. Бахмутов, В. А. Любич // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М., 1981. – № 5. – С. 9–11.

4. Кузнецов, М. К. Неравномерность высева семян зерновыми сеялками / М. К. Кузнецов [и др.] ; под общ. ред. М. К. Кузнецова // Тракторы и сельхозмашины. – М., 1980. – № 7. – С. 17–18.

5. Полезная модель BY 13634. Сеялка механическая широкозахватная универсальная: № u 20240165 : заявлено 18.07.2024 : опубл. 20.01.2025 / Лепешкин Н. Д., Мижурин В. В., Микульский В. В. ; заявитель РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – 7 с.

6. Крючин, Н. П. Обоснование ресурсосберегающих технологий рядового посева и совершенствование высевающих систем посевных машин : дис. … д-ра техн. наук : 05.20.01 / Крючин Николай Павлович. – Самара, 2006. – 445 л.

7. Шулаков, П. А. Обоснование конструктивно-технической схемы, основных параметров комбинированного дернинного агрегата и его туковысевающего устройства : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Шулаков Павел Александрович. – Киров, 2004. – 197 л.

8. Преображенский, П. А. Спирально-винтовые транспортеры (гибкие шнеки) и смесители : сб. науч. ст. / под общ. ред. П. А. Преображенского, А. А. Труфанова. – Казань, 1970. – 176 с.

9. Шуков, А. В. Повышение качества посева семян зерновой сеялкой с разработкой высевающего аппарата : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Шуков Александр Васильевич ; Пенз. гос. с.-х. акад. – Пенза, 2009. – 19 с.

10. Иншиязов, Б. А. Обоснование параметров и режимов работы катушечного высевающего аппарата для зоны хлопководства : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Иншиязов Баходир Азадович. – Янгиюль, 1993. – 16 с.

11. Ларюшин, Н. П. Результаты лабораторных исследований высевающего аппарата / Н. П. Ларюшин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 140–144.

12. Фатеев, М. Н. Основы планирования эксперимента в сельскохозяйственных машинах: руководящий технический материал / М. Н. Фатеев, М. М. Фирсов. – М. : ВИСХОМ, 1974. – 116 с.

13. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Мн. : БГУ, 1982. – 302 с.

14. Обоснование конструктивной схемы и основных параметров системы высева с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки: отчет о НИР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ; рук. В. В. Микульский, исполн. : Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин, А. В. Иваненко, А. М. Злотник. – Мн., 2025. – 320 с. – № ГР 20240251.

15. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения чистоты и отхода семян : ГОСТ 12037-81. – Введ. 01.07.1982. – М. : Стандартинфом, 1982. – 39 с.

УДК 631.331

Поступила в редакцию 21.01.2026
Received 21.01.2026

Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mehposev@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ДОЗИРОВАНИЯ ПОСЕВНОГО МАТЕРИАЛА К СОШНИКАМ МЕХАНИЧЕСКОЙ СЕЯЛКИ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ БУНКЕРОМ

Аннотация. В статье дано техническое описание конструкции и порядок работы экспериментальной установки для исследования процесса двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с централизованным бункером, а также приведено описание измерительных приборов, которые позволяют оценить качественные показатели процесса высева.

Ключевые слова: экспериментальная установка, высев, зазор, катушка, измерительные приборы.

N. D. Lepeshkin, V. V. Mikulsky, V. V. Mizhurin

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mehposev@mail.ru

SOIL CULTIVATION AND SEEDING COMPLEX OF MACHINES FOR RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF GRAIN PRODUCTION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Abstract. The article provides a technical description of the design and operating procedure of an experimental setup for studying the process of two-stage dosing of seed material to the coulters of a mechanical seeder with a centralized hopper, and also provides a description of measuring instruments that allow one to evaluate the quality indicators of the seeding process.

Keywords: experimental setup, seeding, gap, coil, measuring instruments.

Введение

По результатам исследований [1, 2] предложена конструктивно-технологическая схема перспективной широкозахватной механической сеялки с централизованным бункером, реализация которой позволяет повысить производительность на посеве зерновых культур как за счет увеличения ширины захвата, так и за счет сокращения непроизводственных потерь рабочего времени на ее загрузку посевным материалом и быстрого перевода в транспортное положение. Отличительной особенностью предложенной конструкции сеялки является то, что осуществляемый ею технологический процесс высева предусматривает двухступенчатую подачу посевного материала из централизованного бункера в сошники. На первой ступени посевной материал через отверстия в централизованном бункере по материалопроводам самотеком поступает в посевные ящики. На второй ступени – из посевных ящиков с помощью установленных в них распределительного и обратного шнеков – семена поступают в дозаторы и далее в сошники. В связи с этим основными элементами системы высева данной сеялки, от параметров которых зависят качественные показатели процесса высева (норма высева, устойчивость высева, неравномерность распределения по сошникам и дробление), являются бункер с отверстиями для подачи посевного материала, посевные ящики с установленными в них распределительными и обратными шнеками и катушечные дозаторы. Поэтому для проведения экспериментальных исследований по обоснованию технологических, конструктивных и режимных параметров данных элементов необходимо разработать экспериментальную установку, имитирующую собой высевающую систему широкозахватной механической сеялки.

Основная часть

Экспериментальная установка с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам, имитирующая высевающую систему широкозахватной механической сеялки, и ее схема представлены на рисунках 1 и 2.

В соответствии с рисунком 1 экспериментальная установка состоит из двух частей – бункера с блоками дозаторов зерна и удобрений *2* и шнеко-катушечного распределителя семян и удобрений *1*, которые имитируют работу сеялки соответственно на первой и второй ступенях дозирования посевного материала. Первая часть представляет собой как бы централизованный бункер сеялки и состоит из бункера *3*, в котором установлена шиберная заслонка *4*, регулирующая подачу посевного материала из бункера *3* во вторую часть установки *1*. Вторая часть установки состоит из разделенного на две половины посевного ящика *5*, в котором установлены распределительный шнек *6*, обратный шнек *7* и катушечные дозаторы *8* с соответствующими приводами *9* и *10*. Для загрузки посевного материала в бункер *3* предусмотрена подставка *11*.

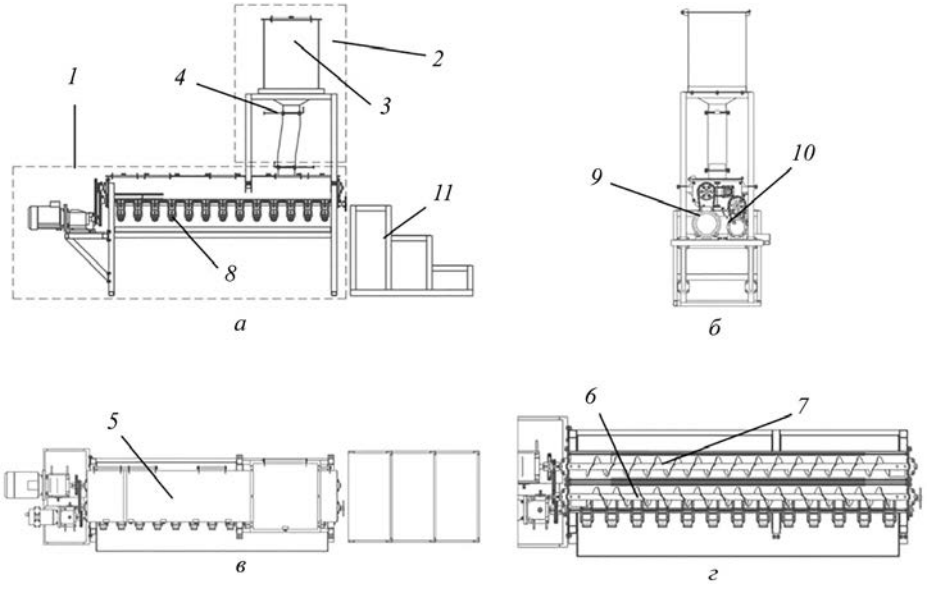


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам: *а* – вид спереди; *б* – вид сбоку; *в* – вид сверху; *г* – посевной ящик вид сверху; *1* – шнеко-катушечный распределитель семян и удобрений; *2* – бункер с блоками дозаторов зерна и удобрений; *3* – бункер; *4* – шиберная заслонка; *5* – посевной ящик; *6* – распределительный шнек; *7* – обратный шнек; *8* – катушечный дозатор; *9* – привод шнеков; *10* – привод катушечного дозатора; *11* – подставка



а *б* *в*

Рисунок 2 – Экспериментальная установка с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам: *а* – экспериментальная установка централизованной двухступенчатой подачи семян и удобрений к сошникам; *б* – макетный образец шнеко-катушечного распределителя семян и удобрений; *в* – макетный образец бункера с блоком дозатора зерна и удобрений

Подготовка и работа экспериментальной установки осуществляется следующим образом:

– устанавливается заданная норма высева посевного материала катушечными дозаторами *8* (частота вращения катушки);

– устанавливается заданная частота вращения распределительного и обратного шнеков *6*, *7*;

– заполняется бункер *3* посевным материалом;

– открывается шиберная заслонка *4* на величину, обеспечивающую подачу посевного материала в соответствии с заданной нормой высева, и самотеком производится подача посевного материала из бункера *3* в посевной ящик *5*;

– одновременно производится запуск привода *9* шнеков *6*, *7*, которые транспортируют посевной материал вдоль посевного ящика;

– после того, как с помощью шнеков произойдет полная загрузка посевным материалом посевного ящика *5*, включается привод *10* катушечных дозаторов *8*;

– посевной материал из желобков катушек дозаторов поступает в мерные емкости, т. е. производится отбор проб;

– после отбора проб привод шнеков и катушечных дозаторов отключается и производится их взвешивание.

Для изучения влияния зазора между стенками ящика и витками шнеков на показатели качества высева в посевном ящике установлены пластины. Внешний вид посевного ящика с пластинами для регулировки зазора между стенками ящика и витками шнеков представлен на рисунке 3.

Для изменения частоты вращения катушки высевающего аппарата, а, следовательно, и нормы высева, в цепи питания электродвигателя ее привода установлен источник питания Mastech HY 3030E с регулятором мощности (рисунок 4).

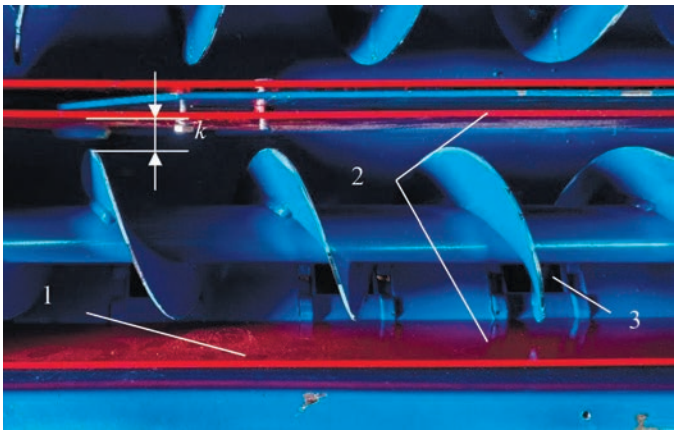


Рисунок 3 – Посевной ящик с распределительным шнеком и пластинами для регулировки зазора (*k*) между стенками ящика и витками шнека: *1* – распределительный шнек; *2* – пластина для регулировки зазора; *3* – катушечный высевающий аппарат



а *б*

Рисунок 4 – Привод дозирующего устройства:
а – регулятор мощности; *б* – источник питания Mastech HY 3030E

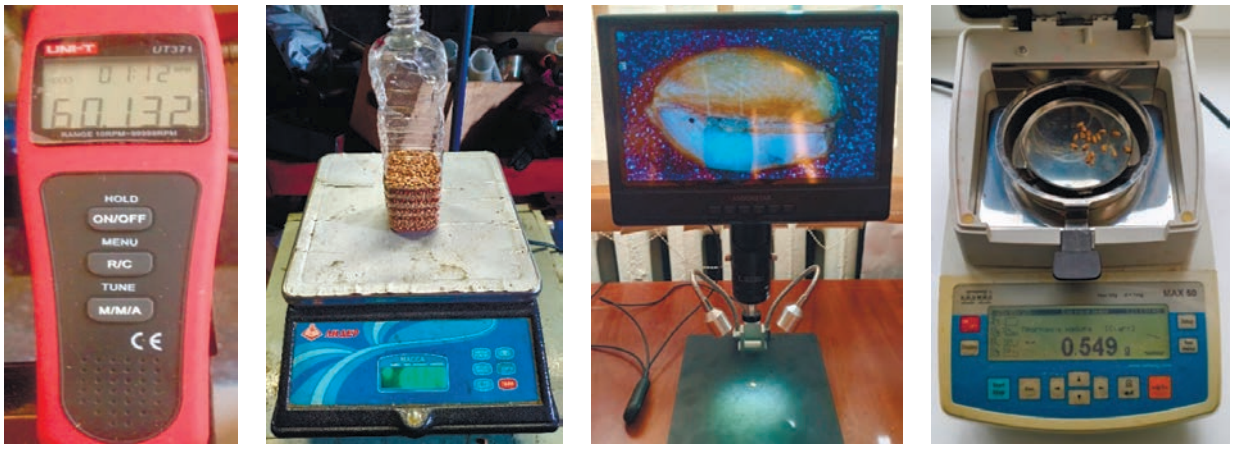
Для изменения частоты вращения распределительного шнека в цепи питания электродвигателя его привода установлен преобразователь частоты векторный M680 фирмы Oni (рисунок 5).

Для измерения параметров и контроля за процессом дозирования установка комплектуется следующими приборами: для определения частоты вращения катушки, а также частоты вращения распределителя шнекового предусмотрен тахометр электронный UT 370 фирмы Uni-T (рисунок 6, *а*).

Для определения веса отобранных проб посевного материала предусмотрены электронные весы ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25–7724–010–98) с точностью до 0,01 грамм (рисунок 6, *б*). Для определения дробленого посевного материала – электронный микроскоп Andostar AD209 с 13–80 кратным увеличением (рисунок 6, *в*). Для определения веса проб посевного материала для изучения дробления – электронные весы MAX 50 Radwag с точностью до 0,001 грамм (рисунок 6, *г*).



Рисунок 5 – Преобразователь частоты векторный M680



а *б* *в* *г*

Рисунок 6 – Приборы: *а* – тахометр электронный UT 370; *б* – электронные весы ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25–7724–010–98); *в* – электронный микроскоп Andostar AD209; *г* – электронные весы MAX 50 Radwag

Заключение

Разработана и укомплектована измерительными приборами экспериментальная установка, позволяющая исследовать процесс двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с централизованным бункером.

Список использованных источников

1. Лепешкин, Н. Д. К обоснованию конструктивно-технологической схемы широкозахватной зерновой сеялки / Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Мн., 2025. – Вып. 58. – С. 126–131.

2. Полезная модель BY 13634. Сеялка механическая широкозахватная универсальная : № u 20240165 : заявлено 18.07.2024 : опубл. 20.01.2025 / Лепешкин Н. Д., Мижурин В. В., Микульский В. В. ; заявитель РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – 7 с.

УДК 631.331

Поступила в редакцию 20.01.2026
Received 20.01.2026

Н. Д. Лепешкин, В. В. Микульский, В. В. Мижурин

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mehposev@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРОБЛЕНИЯ СЕМЯН ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ ВЫСЕВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ШИРОКОЗАХВАТНОЙ СЕЯЛКИ С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ БУНКЕРОМ

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований дробления семян элементами высевающей системы механической широкозахватной сеялки с централизованным бункером. Определены оптимальные значения зазора между стенками посевного ящика и витками шнека, и частота вращения шнека, которые позволяют осуществлять высев посевного материала в соответствии с агротребованиями.

Ключевые слова: высев, зазор, шнек, частота вращения, дробление.

N. D. Lepeshkin, V. V. Mikulsky, V. V. Mizhurin

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mehposev@mail.ru

RESULTS OF A STUDY OF SEED CRUSHING BY ELEMENTS OF THE SEEDING SYSTEM OF A MECHANICAL WIDE-CAPACITY SEEDER WITH A CENTRALIZED BUNKER

Abstract. The article presents the results of experimental studies of seed crushing by elements of the seeding system of a mechanical wide-grip seeder with a centralized bunker. The optimal values for the gap between the walls of the seed box and the auger turns, and the auger rotation frequency, which allow for sowing of seed material in accordance with agricultural requirements, have been determined.

Keywords: seeding, gap, auger, rotation speed, crushing.

Введение

По результатам проведенных исследований, представленных в статье данного сборника «Исследования основных факторов, влияющих на качество высева механическими сеялками с централизованным бункером», было установлено, что наиболее существенное влияние на показатели качества, и в первую очередь, показатель дробления семян, который может не полностью соответствовать требованиям агротехники, оказывают зазор между стенками посевного ящика и витком шнека и частота вращения шнека.

Цель исследований – установить оптимальные значения указанных факторов, при которых дробление семян элементами системы высева перспективной механической сеялки будет соответствовать требованиям агротехники.

Основная часть

Для определения дробления посевного материала в зависимости от зазора между стенками посевного ящика, витком шнека (k) и частотой вращения шнека (n) были проведены полнофакторные эксперименты на высеве семян пшеницы, ржи, ячменя и овса. Исследования проводились на экспериментальной установке, техническое описание и принцип работы которой даны в статье данного сборника «Экспериментальная установка и приборы для исследования процесса двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с цен-

трализованным бункером». Для каждой культуры было проведено по 4 опыта с числом дублей (повторностей) – 4. С целью исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними неконтролируемыми факторами, в ходе экспериментальных исследований была выполнена рандомизация опытов, под которой понимается чередование отдельных опытов в случайном порядке. Это позволяет сравнивать результаты подобных опытов вследствие усреднения влияния эффектов неконтролируемых факторов. Процедура рандомизации опытов выполнялась с помощью таблиц случайных чисел [1], при этом последовательно по столбцам таблицы были выбраны числа, соответствующие порядковым номерам проводимых опытов.

Уровни и интервалы варьирования факторов, план-матрица проведения опытов, с реализацией всех возможных упорядоченных комбинаций факторов, а также результаты исследований на примере опытов по высеву семян пшеницы представлены в таблице 1.

Значения факторов на нулевом уровне были выбраны по результатам ранее проведенных поисковых исследований [2].

Кодирование уровней факторов осуществлялось по формуле [3]

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{\iota}, \tag{1}$$

где x_i – кодированное значение уровня фактора; $C_i - C_{0i}$ – натуральные значения фактора (соответственно его текущее значение и значение на нулевом уровне); ι – натуральное значение интервала варьирования фактора.

$$\iota = \frac{C_i^{\text{B}} - C_i^{\text{H}}}{2}, \tag{2}$$

где C_i^{B} и C_i^{H} – значение фактора соответственно на верхнем и нижнем уровнях.

Построчные выборочные дисперсии (ошибка опыта) рассчитывались по результатам параллельных опытов по следующему выражению:

$$S^2\{y_u\} = \frac{\sum_{j=1}^{m}(y_{ij} - \overline{y}_u)^2}{m-1}, \tag{3}$$

где m – повторность опытов; $\overline{y}_u$ – среднее арифметическое значение выходного параметра для одного опыта при m повторностях.

$$\overline{y}_u = \frac{\sum_{j=1}^{m} y_{ij}}{m}. \tag{4}$$

После проведения опытов с помощью критерия Кохрена, который основан на законе распределения отношения максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий, выполнялась проверка гипотезы об однородности дисперсий по выражению

$$G = \frac{S^2\{y_u\}_{\max}}{\sum_{u=1}^{m_{\overline{i}}} S^2\{y_u\}} \le G(\alpha, f_k, k), \tag{5}$$

где $G(\alpha, f_k, k)$ – табличное значение критерия Кохрена для уровня значимости a, числа степеней свободы числителя $f_1 = m_n - 1$ и знаменателя $f_2 = k$.

Табличное значение критерия Кохрена выбиралось по таблице 1 и для чисел степеней свободы $f_1 = 3$ и $f_2 = 4$ $G(\alpha, f_k, k) = 0,68$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные значения критерия Кохрена представлены в таблице 2.

Таблица 1 – **Результаты исследования дробления семян элементами высевающей системы на примере высева семян пшеницы**

Журнал планирования эксперимента			Наименование и обозначение исследуемого объекта: Элементы системы высева механической сеялки с централизованным бункером	
Контролируемые переменные (факторы) (условн. обозн.)	k	n	Априорные сведения	Особые указания
Единицы изм. параметров	мм	об/мин	Параметр оптимизации: показатель дробления семян (v) Изменяющиеся факторы: зазор между стенками посевного ящика и винтом шнека (k) и частота вращения шнека (n)	Масса навески отбиралась по ГОСТ 12 036-85 Масса 1 000 семян – 44,1 кг/м^3 Влажность семян – 14,1 % Эквивалентный диаметр – 3,5 мм
Верхний уровень	26	100		
Нижний уровень	10	60		
Основной уровень	18	80		
Интервал варьирования	8	20		

Матрица планирования 2^2 в кодовых обозначениях переменных									Результаты эксперимента и дисперсии отклонений параметра оптимизации от среднего значения							Проверка адекватности модели
номер точки плана n	Порядок реализации j опытов				Контролируемые режимы, характеристики, факторы i											
	m_1	m_2	m_3	m_4	x_0	$x_1(k)$	$x_2(n)$	x_1x_2	y_1	y_2	y_3	y_4	$\tilde{y}_n$	D_j	$\hat{y}_{n,л}$	$(\tilde{y}_n - \hat{y}_{n,л})^2$
1	4	1	3	2	+1	–1	–1	+1	1,060	1,200	1,310	1,190	1,190	0,010	1,246	0,003
2	1	3	2	4	+1	+1	–1	–1	0,120	0,210	0,300	0,350	0,245	0,010	0,189	0,003
3	2	4	1	3	+1	–1	+1	–1	1,420	1,320	1,660	1,450	1,463	0,020	1,407	0,003
4	3	2	4	1	+1	+1	+1	+1	0,380	0,210	0,250	0,340	0,295	0,006	0,351	0,003
Коэффициенты b_j					0,80	–0,53	0,08	–0,06	Проверка однородности дисперсий					Проверка адекватности модели		
									$\sum D_j$			0,05		$\Sigma(\tilde{y}_n - \hat{y}_{n,л})^2$		0,01
Проверка значимости коэффициентов									$D_{j\max}$			0,02		$D_{ад}$		0,05
$D\{y\}$	0,0	$D\{b_j\}$		0,00	0,00				G (критерий Кохрена)			0,43		F (критерий Фишера)		4,18
g	0,95	$s\{b_j\}$		0,03	0,03				a			0,05		k_1		3
u_b	12	t_i (критерий Стьюдента)			29,34	19,41	2,96	2,04	$m-1$			3		$u_b = n(m-1)$		12
$t_{кр} = t_{g;\,u}$	2,179	$t_i - t_{кр}$			27,16	17,24	0,79	–0,13	n			4		$u_{ад} = n - k_1$		1
Δb_j	0,06	$t_i > t_{кр}$			>	>	>	<	$G_{кр} = G_{\alpha;\,m-1;\,n}$			0,68		$F_{кр}$		4,75
Вывод ($\lvert b_j\rvert > \Delta b_j$)					знач.	знач.	знач.	нет	$G - G_{кр}$			–0,25		$F - F_{кр}$		–0,57
									Вывод ($G < G_{кр}$)			дисперсии однородны		*Вывод* ($F < F_{кр}$)		модель адекватна
Уравнение регрессии									Уравнение регрессии (линейная модель)							
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$									$y = 0{,}798 - 0{,}528x_1 + 0{,}081x_2$							

Таблица 2 – **Результаты оценки воспроизводимости опытов по критерию Кохрена**

Наименование культуры	Значение критерия	
	Расчетное	Табличное
Пшеница	0,43	0,68
Рожь	0,29	0,68
Ячмень	0,35	0,68
Овес	0,39	0,68

Из данных таблицы 2 видно, что условие (5) выполняется для каждого значения параметра оптимизации. Следовательно, гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречит экспериментальным данным, что позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости опытов по выражению

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{u=1}^{k} S^2\{y_u\}}{k}, \tag{6}$$

где k – количество опытов; число степеней свободы $f_в = k(m_n - 1)$.

Поскольку дисперсии адекватны, то производим определение значений коэффициентов уравнений регрессии, которые являются оценками теоретических коэффициентов.

Уравнение регрессии имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i>j}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} x_i^2 + \ldots, \tag{7}$$

где y – расчетное значение параметра оптимизации.

Для определения числовых значений коэффициентов уравнений регрессии использовали план эксперимента, в котором для любых двух столбцов матрицы выполняется следующее условие:

$$\sum_{i=1}^{k} x_{ui} x_{uj} = 0. \tag{8}$$

Коэффициенты уравнения регрессии определялись по выражениям

$$b_i = \sum_{u=1}^{k} x_{ui} \overline{y}_u \,/\, \sum_{u=1}^{k} x_{ui}^2, \tag{9}$$

$$b_0 = b_0' - \overline{x}_i^2 \sum_{i=1}^{n} b_{ii}, \tag{10}$$

где i – номер строки расширенной матрицы планирования; k – количество опытов; $\overline{y}_u$ – среднее арифметическое результатов u-го опыта; b_0' – оценка свободного члена квадратичного регрессионного уравнения (7), вычисленная для столбца с фиктивной переменной композиционного плана.

Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – **Коэффициенты уравнения регрессии**

Коэффициент уравнения регрессии	Значение коэффициента			
	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
b_0	0,798	0,813	0,795	0,789
b_1	–0,528	–0,531	–0,523	–0,525
b_2	0,081	0,049	0,053	0,084

В итоге регрессионные уравнения для параметра оптимизации каждой культуры принимают следующий вид:

– для пшеницы:

$$Y_1 = 0,798 - 0,528x_1 + 0,081x_2; \quad (11)$$

– для ржи:

$$Y_2 = 0,813 - 0,531x_1 + 0,049x_2; \quad (12)$$

– для ячменя:

$$Y_3 = 0,795 - 0,523x_1 + 0,053x_2; \quad (13)$$

– для овса:

$$Y_4 = 0,789 + 0,525x_1 + 0,084x_2. \quad (14)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных заключался в определении значимости полученных коэффициентов в уравнениях регрессии. Значимость коэффициентов уравнений проверялась по *t*-критерию Стьюдента согласно формуле определения доверительного интервала

$$\Delta b = \frac{t \cdot S^2\{y\}}{\sqrt{k}}. \quad (15)$$

Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициентов. Табличное значение *t*-критерия Стьюдента $t_{(\alpha,\, f_в)}$ при уровне значимости α = 0,05 и числе степеней свободы $f_в$ = 12 равно 2,179 [1]. Коэффициент уравнения регрессии статистически значим, если выполняется условие

$$\left|b_j\right| > \Delta b = t_{(\alpha,\, f_в)} S\left\{b_j\right\}, \quad (16)$$

где $t_{(\alpha, f_в)}$ – табличное значение t-критерия Стьюдента при уровне значимости α и числе степеней свободы $f_в$.

Согласно условию (16), все коэффициенты уравнений регрессии являются значимыми.

Проверка на адекватность уравнений регрессии (11) – (14) по экспериментальным данным проводилась по *F*-критерию Фишера.

Табличные значения критерия Фишера выбирались по таблице 1 для чисел степеней свободы $f_в$ и $f_{ад}$ при уровне значимости α = 0,05. Расчетные и табличные значения критерия Фишера представлены в таблице 4.

Таблица 4 – **Оценка адекватности уравнений регрессии по расчетным значениям критерия Фишера**

Параметр оптимизации *y* по культурам	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
Расчетное значение критерия Фишера *F*	4,18	3,31	3,49	4,20
Табличное значение критерия Фишера $F(\alpha, f_{ад}, f_в)$	4,75	4,75	4,75	4,75

Так как расчетные значения критерия Фишера не превышают табличные, то полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные.

Для использования уравнений (11) – (14) в инженерных расчетах запишем их в раскодированном виде, заменив кодовое значение факторов x_1 и x_2 на натуральные переменные

$$x_{1j} = \frac{2x_j - (x_{j\max} + x_{j\min})}{x_{j\max} - x_{j\min}}, \quad (17)$$

где x_j – натуральное значение фактора; $x_{j\max}$ – нижний предел натурального значения фактора; $x_{j\min}$ – верхний предел натурального значения фактора.

Тогда, подставляя значения в (17), получаем

$$x_1 = \frac{2x_1 - (x_{1\max} + x_{1\min})}{x_{1\max} - x_{1\min}} = \frac{2k - (26+10)}{26-10} = \frac{2k-36}{16} = \frac{k-18}{8} = 0{,}125k - 2{,}25.$$

$$x_2 = \frac{2x_2 - (x_{2\max} + x_{2\min})}{x_{2\max} - x_{2\min}} = \frac{2n - (100+60)}{100-60} = \frac{2n-160}{40} = \frac{k-80}{20} = 0{,}05n - 4.$$

Таким образом, уравнения (11) – (14) в раскодированном виде принимают следующий вид:
– для пшеницы:

$$Д = 1{,}662 - 0{,}066k + 0{,}004n; \quad (18)$$

– для ржи:

$$Д = 1{,}684 - 0{,}066k + 0{,}004n; \quad (19)$$

– для ячменя:

$$Д = 1{,}669 - 0{,}065k + 0{,}004n; \quad (20)$$

– для овса:

$$Д = 1{,}633 - 0{,}066k + 0{,}004n. \quad (21)$$

Заключительным этапом математической обработки экспериментальных данных являлось определение оптимальной области значений исследуемых факторов на основании анализа поверхностей отклика. Поверхности отклика, построенные по уравнениям регрессии (11) – (14), представлены на рисунках 1–4.

Подставляя значения параметров *k* и *n* в уравнения (18) – (21), получаем значение показателя дробления посевного материала. Для каждой культуры в зависимости от заданных параметров *k* и *n*. Результаты расчетов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – **Расчетное значение дробления по уравнениям регрессии (18) – (21) в зависимости от заданных параметров *k* и *n***

Значение показателей		Культура			
k, мм	*n*, об/мин	Пшеница	Рожь	Ячмень	Овес
		Дробление, % (не более 0,3 % по ТНПА [4])			
10	60	1,242	1,264	1,259	1,213
10	80	1,322	1,344	1,339	1,293
10	100	1,402	1,424	1,419	1,373
18	60	0,714	0,736	0,739	0,685
18	80	0,794	0,816	0,819	0,765
18	100	0,874	0,896	0,899	0,845
26	60	0,186	0,208	0,219	0,157
26	80	0,266	0,288	0,299	0,237
26	100	0,346	0,368	0,379	0,317

Из анализа графической зависимости (рисунки 1–4), а также данных таблицы 5 установлены оптимальные параметры факторов, оказывающих существенное влияние на процесс высева посевного материала (таблица 6).

Таблица 6 – **Оптимальные параметры факторов**

Фактор	Область оптимума
Зазор между стенками ящика и винтом шнека *k*, мм	не менее 26
Частота вращения шнека *n*, об/мин	60–80

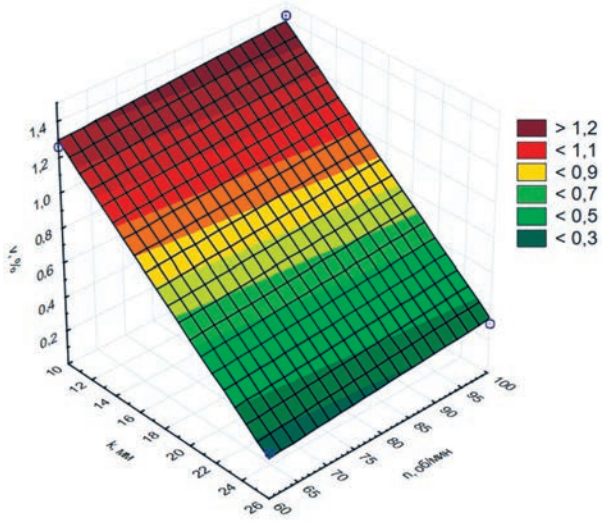


Рисунок 1 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве пшеницы

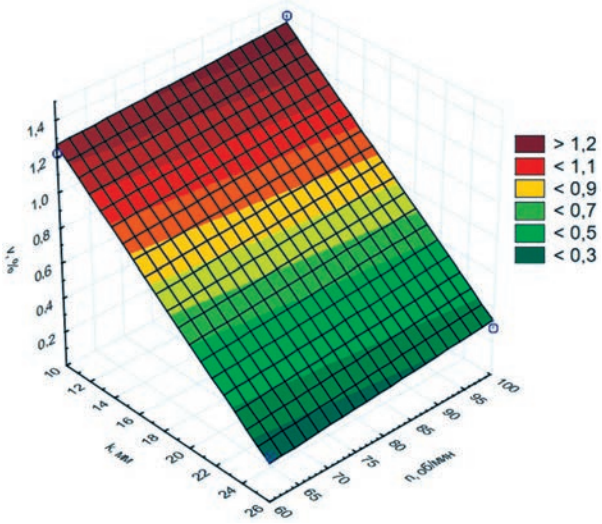


Рисунок 2 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве ржи

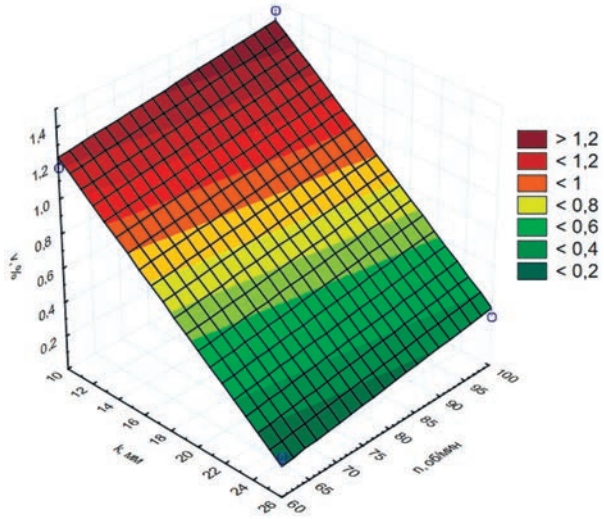


Рисунок 3 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве ячменя

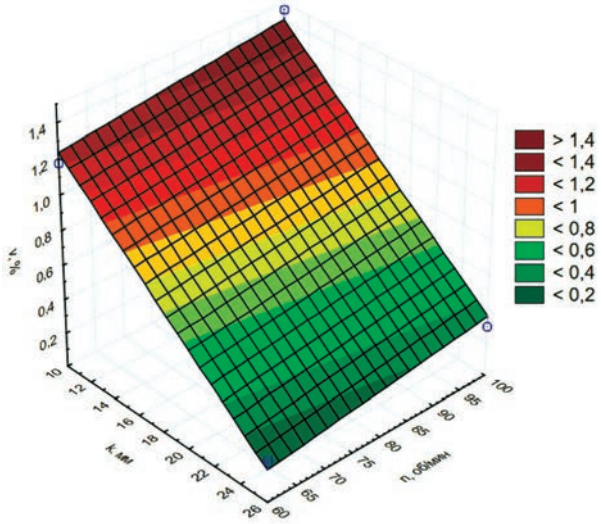


Рисунок 4 – Поверхность отклика $v = f(k; n)$ при высеве овса

Заключение

На основании полученных экспериментальных данных установлены оптимальные значения зазора между стенками ящика и винтом шнека k, который должен составлять не менее 26 мм, и частоты вращения шнека n = (60–80) об/мин. Это позволит осуществлять высев семян механической широкозахватной сеялкой с централизованным бункером с их дроблением в пределах, допустимых агротребованиями.

Список использованных источников

1. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М. : Колос, 1994. – 169 с.

2. Обоснование конструктивной схемы и основных параметров системы высева с централизованной двухступенчатой подачей семян и удобрений к сошникам механической широкозахватной зерновой сеялки: отчет о НИР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси помеханизации сельского хозяйства» ; рук. В. В. Микульский, исполн. Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин, А. В. Иваненко, А. М. Злотник. – Мн., 2025. – 320 с. – № ГР 20240251.

3. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Мн. : БГУ, 1982. – 302 с.

4. Машины посевные и посадочные. Правила установления показателей назначения: ТКП 078–2007 (02150). – Введ. 06.08.2007 – Мн. : Бел. научн. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2007. – 40 с.

УДК 631.312.65

Поступила в редакцию 16.01.2026
Received 16.01.2026

Н. Д. Лепешкин[1], А. А. Шупилов[2], Ю. В. Синяк[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: shupilov@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ ВЛАГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПРИ ОСНОВНОЙ БЕЗОТВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ

Аннотация. Формирование сложения почвы при ее обработке, способствующее притоку по капиллярам грунтовых вод к корнеобитаемому верхнему горизонту, является одним из путей устранения дефицита влаги в почве при недостатке атмосферных осадков или их отсутствии продолжительное время. В статье предложена концепция рыхления почвы при основной безотвальной обработке, способствующая созданию условий для накопления и сбережения влаги для первоначального периода вегетации в последующем высеянных семян, и результаты ее экспериментальной проверки.

Ключевые слова: влажность, почва, плотность, градиент, рабочие органы, чизель, плуг.

N. D. Lepeshkin[1], A. A. Shupilov[2], Yu. V. Sinyak[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
[2]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: shupilov@mail.ru

CREATING CONDITIONS FOR MOISTURE SUPPLY FOR GRAIN CROPS WITH NO-TILL PRIMARY TILLAGE

Abstract. The formation of soil structure during its cultivation, which promotes the flow of groundwater through the capillaries to the upper root-bearing horizon, is one of the ways to eliminate moisture deficiency in the soil when there is a lack of precipitation or no precipitation for an extended period. The article proposes a concept of soil loosening during primary tillage, which contributes to the accumulation and preservation of moisture for the initial vegetation period of subsequently sown seeds, and presents the results of its experimental verification.

Keywords: humidity, soil, density, gradient, working tools, chisel, plow.

Введение

Агротехнически адаптированной считается почвообработка, которая создает благоприятные условия для вегетации высеянных сельскохозяйственных культур, важнейшим фактором которых является влажность почвы [1]. Наиболее стабильным источником поступления влаги являются грунтовые воды. Формирование сложения почвы при ее обработке, способствующее притоку по капиллярам грунтовых вод к корнеобитаемому верхнему горизонту, является одним из путей устранения дефицита влаги в почве при недостатке атмосферных осадков или их отсутствии продолжительное время.

При посеве сельскохозяйственных культур применяется технологический прием прикатывания почвы для создания условий, способствующих притоку капиллярной влаги к семенам. Однако восстановление капиллярного притока влаги к семенам после прикатывания при посеве происходит только через определенный промежуток времени. Поэтому значимо заранее создать условия для высева семян в почву оптимальной влажности и их обеспечения влагой особенно в начальный период – прорастания семян и всходов, т. е. осуществить подготовку «семенного ложа» для высева семян уже на стадии основной обработки почвы, формируя подстилающее водоносное капиллярное сложение.

Основная часть

При вспашке плугами агрегаты комплектуются катковыми приставками. Их основное назначение – разрушение образовавшихся после вспашки отвальных гребней, дробление почвенных глыб, т. е. осуществляется выравнивание поверхности с уплотнением почвы. Известны исследования, которые подтверждают эффективность создания при вспашке уплотненной прослойки на глубине 5–10 см, повышающей сохранность влаги в почве не менее чем на 20 % по сравнению с вспашкой с прикатыванием и более чем в 2 раза по сравнению с вспашкой с боронованием (таблица 1) [2].

Таблица 1 – **Влажность почвы в пахотном слое, %**

Глубина, см	Вспашка с боронованием	Вспашка с прикатыванием	Вспашка с прикатыванием и рыхлением (уплотненная прослойка под верхним рыхлым слоем)
0–5	6,2	9,3	10,1
5–10	9,8	16,3	19,8
10–15	21,8	22,5	26,4
15–20	22,8	24,5	25,8

В настоящее время широкое распространение в земледелии получила безотвальная основная обработка почвы с рыхлением почвы, имеющая отличительные особенности по сравнению с отвальной вспашкой. Для ее реализации применяются рабочие органы чизельного типа. Чизельные рабочие органы выполняют операции безотвального крошения, рыхления почвы на глубину обработки, изменяя плотность обрабатываемого слоя, тем самым улучшая воздушный, водный и тепловой режимы почвы. Однако данный способ обработки почвы и рабочие органы для его осуществления не полностью удовлетворяют агротехническим требованиям, предъявляемым к ним. Строение пахотного слоя характеризуется соотношением капиллярной и некапиллярной скважности, общей порозностью и плотностью почвы. После рыхления чизелем остаются крупные комки почвы диаметром в пределах 100–300 мм и более с порами между ними. Величина плотности почвы снижается до 0,8–0,9 г/см^3, а ее порозность после обработки возрастает и может превышать 45 %. Резко возрастает объем некапиллярных пор, который может достигать 40–50 % от общей порозности. Примерное соотношение капиллярных и некапиллярных пор должно составлять 75–80 к 20–25 %. Данное сложение почвы способствует усиленному испарению имеющейся влаги из обработанного слоя почвы и нарушению ее водоподъемной способности из нижележащих горизонтов.

Безотвальную обработку чизельными рабочими органами также, как и для плугов, комбинируют с прикатыванием катками различной конструкции, но основное назначение их в данном сочетании – прикатывание остающейся стерни, заделка в почву растительных и пожнивных остатков с помощью элементов различной конструкции на их поверхности.

При безотвальной основной обработке из пожнивных остатков создается мульчирующий слой, препятствующий испарению влаги от атмосферных осадков с поверхности почвы, что способствует ее влагоудержанию, а, следовательно, и влагосбережению. Однако вместе с тем при безотвальной основной обработке разрушается сложившаяся система поступления к поверхности почвы капиллярной влаги. Это обуславливает необходимость совершенствования технологического приема и рабочих органов для основной безотвальной обработки почвы.

Проведена экспериментальная проверка выдвинутой гипотезы о необходимости формирования при основной безотвальной обработке профиля почвы с градиентом плотности для обеспечения оптимальных условий протекания процессов влаго-, тепло- и газообмена.

По результатам поискового эксперимента выявлен эффект от создания в структуре почвы при безотвальной обработке градиента плотности почвы на уровне семенного ложа (таблица 2). Средний вес влаги, содержащейся в абсорбирующем материале, уложенном в почву, обработанную отвальным способом на уровне семенного ложа, составил 0,99 г. Средний вес влаги, содер-

жащейся в абсорбирующем материале, уложенном в почву, обработанную безотвальным способом с формированием градиента плотности почвы, составил 1,19 г. Разность в содержании влаги в абсорбирующем материале (0,2 г) позволяет сделать вывод о увеличении содержания влаги на уровне семенного ложа почвы, в структуре которой имеется градиент плотности, на 20 %.

Таблица 2 – **Результаты поискового эксперимента по выявлению эффекта от создания в структуре почвы градиента плотности почвы на уровне семенного ложа (увлажнение: капиллярная влага)**

Характеристика обработанной почвы	Содержание влаги после завершения опыта, г			Среднее арифметическое значение, $\overline{X}$
	Повторность опыта			
	1	2	3	
Обработана отвальным способом (с закладкой абсорбирующего материала на уровне семенного ложа)	0,97	0,94	1,06	0,99
Обработана безотвальным способом с формированием в структуре почвы градиента плотности почвы на уровне семенного ложа (с закладкой абсорбирующего материала на уровне семенного ложа)	1,2	1,1	1,26	1,19

Результаты эксперимента свидетельствуют о значимости данного технологического приема обработки для сохранения влаги в почве. Формирование структуры с градиентом плотности почвы на уровне семенного ложа позволяет использовать сохраняющийся при безотвальной обработке капиллярный подъем влаги, которая конденсирует в созданной уплотненной структуре почвы. Данный приток влаги имеет первостепенное значение при недостаточности атмосферных осадков, так как известно, что от 30 до 70 % конденсируемой влаги в обработанной почве поступает из глубоколежащих почвенных горизонтов.

Заключение

Полученные результаты исследований подтвердили выдвинутую концепцию и значимость формирования в структуре почвы при безотвальной основной обработке градиента плотности на уровне семенного ложа, создающего условия для конденсации и накопления капиллярной влаги.

Список использованных источников

1. Лепешкин, Н. Д. К обоснованию типа рыхлительных рабочих органов почвообрабатывающего агрегата для влагонакопления и влагозадержания на склоновых землях / Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Мн., 2022. – Вып. 55. – С. 138–147.

2. Тарасенко, Б. И. Обработка почвы : учеб. пособие / Б. И. Тарасенко, Н. И. Бардак, А. А. Макаренко // М-во сельского хоз-ва РФ, ФГБОУ ВПО «Кубанский гос. аграрный ун-т». – 3-е перераб. и доп. изд. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 178 с.

УДК 631.35

Поступила в редакцию 25.11.2025
Received 25.11.2025

Т. А. Непарко[1], В. Б. Ловкис[1], Н. Н. Быков[1], Э. В. Дыба[2]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mta_mtp@bsatu.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru

ЛЕНТОЧНЫЙ ВАЛКОВАТЕЛЬ: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Аннотация. В статье представлена методика определения функциональных показателей как производственных функций при формировании рационального комплекса машин для заготовки высококачественных кормов в конкретных условиях, с учетом которых выполнено моделирование процесса сгребания просушенной (провяленной) массы в валки ленточным валкователем на базе различных тракторов. Определена целевая функция выбора рационального состава и режимов работы машинно-тракторных агрегатов для заданной технологической операции.

Ключевые слова: валкователь, кормопроизводство, функциональный показатель, производительность, своевременность, непрерывность, ритмичность.

T. A. Neparko[1], V. B. Lovkis[1], N. N. Bykov[1], E. V. Dyba[2]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mta_mtp@bsatu.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru

BELT ROLLER: FUNCTIONAL INDICATORS

Abstract. The article presents a methodology for determining functional indicators as production functions in the formation of a rational complex of machines for the procurement of high-quality feed in specific conditions, taking into account which the process of raking dried (wilted) mass into windrows using a belt rake based on various tractors was simulated, and the target function for selecting the rational composition and operating modes of machine and tractor units for a given technological operation was determined.

Keywords: swather, forage production, functional indicator, productivity, timeliness, continuity, rhythm.

Введение

При формировании рационального комплекса машин для заготовки высококачественных кормов в конкретных условиях необходимо систематизировать производственные функции в виде задач повышения эффективности его использования и выразить их в виде целей: повышение функциональных показателей, снижение эксплуатационных затрат и повышение экологичности производства.

Коллектив авторов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» и РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» при выполнении научно-исследовательских работ по заданию 15 «Обосновать основные параметры, разработать и освоить производство ленточного валкователя» подпрограммы «Белсельхозмеханизация-2025» ГНТП «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021–2025 гг. разработали методику определения функциональных показателей, которые отражают уровень выполнения основных производственных функций, соответствующих принципам построения механизированных процессов: своевременности, непрерывности и ритмичности проведения работ, ресурсосбережения и экологичности процессов.

Основная часть

Принцип своевременности предусматривает выполнение механизированных работ в оптимальные агротехнические сроки и обеспечение минимальных суммарных затрат на выполнение работ и потерь от недобора урожая при увеличении агротехнических сроков.

Потери урожая от превышения продолжительности работ в сравнении с оптимальной в границах сравнительно небольшого промежутка времени (до 20 дней) можно описать следующей линейной зависимостью:

$$H_y = H_{y\max}\left(1 - k_{\text{п}i} D_i\right), \tag{1}$$

где H_y – фактически собранный урожай y-й культуры, т/га; $H_{y\max}$ – запланированный урожай при выполнении технологической операции в оптимальные сроки, т/га; i – индекс механизированной работы ($i \in I$); y – вид сельскохозяйственной культуры ($y \in Y$); $k_{\text{п}i}$ – коэффициент потерь при увеличении продолжительности i-й операции на 1 га в сравнении со следующим оптимальным сроком [1]:

$$k_{\text{п}i} = \frac{H_{y\max} - H_y}{H_{y\max} D_i}, \tag{2}$$

где D_i – продолжительность i-й операции, дней.

Продолжительность операции D_i определяется многолетней практикой заготовки кормов в Республике Беларусь. Однако начало выполнения операций в конкретном сельскохозяйственном предприятии должно корректироваться каждый год, а количество рабочих дней не должно превышать нормативную продолжительность механизированных работ для условий республики $D_{\text{н}}$ [2–4].

Недополучение денежных средств от потерь урожая кормовых культур составят, у. е.

$$S_{\text{п}i} = k_{\text{п}i} H_{y\max} C_{\text{п}} D_i, \tag{3}$$

где $C_{\text{п}}$ – цена продукции, у. е./т.

Сокращение сроков проведения работ также связано с дополнительными капиталовложениями на приобретение и эксплуатацию техники, у. е./га

$$S_{a_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \text{Б}_{ijs}\left(\frac{a_{a_{ijs}}}{100} + E\right) k_{ijs}}{W_{\text{см}_{ijs}} k_{\text{см}_{ijs}} D_{ijs}}, \tag{4}$$

где S_{a_i} – удельные затраты на технику, у. е./га; j – индекс марки энергетического средства ($j \in J$); s – индекс марки сельскохозяйственной машины ($s \in S$); Б_{ijs} – балансовая стоимость j-го энергетического средства s-й сельскохозяйственной машины на i-й операции, у. е.; $a_{a_{ijs}}$ – норма амортизационных отчислений j-го энергетического средства s-й сельскохозяйственной машины на i-й операции, %; E – коэффициент эффективности капиталовложений; k_{ijs} – коэффициент использования js-го агрегата на i-й операции относительно общего времени использования в течение года $D_{\text{Г}js}$:

$$k_{ijs} = \frac{D_{ijs}}{D_{\text{Г}js}}, \tag{5}$$

где $W_{\text{см}_{ijs}}$ – выработка за смену js-го агрегата на i-й операции, га (т)/см; $k_{\text{см}_{ijs}}$ – коэффициент сменности, определяемый по формуле

$$k_{\text{см}_{ijs}} = \frac{T_{\text{сут}_{ijs}}}{T_{\text{см}}}, \tag{6}$$

где $T_{\text{сут}_{ijs}}$ – количество часов работы js-го агрегата на i-й операции в течение суток, ч; $T_{\text{см}}$ – нормативное время смены (7 ч на полевых работах), ч.

Общие затраты от потери продукции и затрат на технику будут равны

$$S_{з_i} = S_{a_i} + S_{n_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Б_{ijs}\left(\frac{a_{a_{ijs}}}{100} + E\right)k_{ijs}}{W_{см_{ijs}} k_{см_{ijs}} D_i} + k_{n_i} Y_{\max} C_n D_i \to \min. \quad (7)$$

Данная функция достигнет своего экстремума, если производную затрат по продолжительности операции приравнять к нулю, т. е.

$$\frac{dS_{з_i}}{dD_i} = 0. \quad (8)$$

Тогда оптимальную продолжительность механизированных работ можно рассчитать по следующей формуле:

$$D_{опт} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} Б_{ijs}\left(\frac{a_{a_{ijs}}}{100} + E\right)k_{ijs}}{W_{см_{ijs}} k_{см_{ijs}} k_{n_i} Y_{\max} C_n}}. \quad (9)$$

Принцип своевременности обеспечивается необходимым количеством технических средств и эффективностью их использования, т. е. производительностью. Непродолжительный вегетационный период в условиях республики, большой объем кормозаготовительных работ обуславливают весьма жесткие требования к срокам проведения полевых работ. При наличии определенного количества технических средств продолжительность различных операций можно сократить только до установленных значений. Дальнейшее сокращение возможно, если возрастет количество технических средств. Это приводит, с одной стороны, к увеличению урожайности, с другой – удорожанию машинно-тракторного парка. Поэтому при определении необходимого количества агрегатов N_{ijs} для выполнения технологической операции в оптимальные агротехнические сроки $D_{опт}$ целесообразно использовать детерминированную зависимость

$$N_{ijs} = \frac{U_{ijs}}{W_{см_{ijs}} k_{см_{ijs}} D_{опт}}, \quad (10)$$

где U_{ijs} – объем работ *js*-го агрегата на *i*-й операции, га (т).

Известно, что состав и параметры агрегатов в конкретных условиях эксплуатации предопределяют возможные, в том числе и рациональные, режимы их работы. За рациональные принимают такие состав и режимы работы машинно-тракторных агрегатов, «всякие возможные изменения которых не улучшают технико-экономические или технологические показатели работы агрегата, и не увеличивают производительную эффективность или полезность» [5]. На производительность агрегата оказывают влияние его техническое состояние, качество подготовки агрегата к работе, правильность комплектования, сокращение простоев по техническим и организационным причинам, разметка полей и подготовка их к работе, выбор рационального способа движения и режима работы МТА и ряд других факторов.

Повышение интенсивной загрузки агрегатов описывается функциональной зависимостью

$$W = f\left(b_р, v_р, \tau\right). \quad (11)$$

Вопросы выбора ширины захвата $b_р$ или расчета количества машин-орудий для различных машинно-тракторных агрегатов, а также связанные с этим вопросы организации и технологии выполнения механизированных работ подробно рассмотрены С. А. Иофиновым, Ю. К. Киртбая, Р. Ш. Хабатовым, В. В. Кацыгиным, Н. Э. Фере, А. А. Зангиевым, Г. Ф. Добышем, Т. А. Непарко и другими учеными. Установлено, что, стремясь повысить производительность МТА путем увеличения ширины захвата, сталкиваются с тем, что ухудшается баланс времени смены: растут непроизводительные потери времени на повороты агрегата в конце гона, обработку поворот-

ных полос, перестроения агрегата из рабочего в транспортное положение и наоборот, переезды с участка на участок и т. п. С другой стороны, увеличивая скорость движения МТА при неизменной ширине захвата, можно добиться повышения производительности и качества выполняемой работы. Однако одновременно с увеличением скорости повышается тяговое сопротивление рабочей машины, увеличиваются потери мощности на самопередвижение агрегата, ухудшается управляемость МТА и удобство работы водителя. Поэтому эффективность использования мобильных сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов зависит от правильного выбора соотношения между скоростью движения и шириной захвата. В каждом конкретном случае принятию решения должны предшествовать комплексные исследования предполагаемых затрат и ожидаемых результатов.

Для того чтобы учесть возможности применения различных агрегатов для моделирования сельскохозяйственных операций значения ширины захвата, представим в виде следующей дискретной равномерно распределенной случайной величины $b_{\text{р}ijs}$:

$$b_{\text{р}ijs} = \varphi(i, f \ldots l). \tag{12}$$

Необходимым условием комплектования рациональных агрегатов для обработки заданного участка f поля площадью F является соответствие тягово-энергетических возможностей трактора энергетической потребности сельскохозяйственных машин. Мера приближения к оптимальной степени использования тягового усилия энергетического средства может быть задана целевой функцией

$$\eta_{\text{т р}ijf} = \frac{R_{ijsf}}{P_{\text{т н}ijf} + G_{ijf}\dfrac{\alpha_f}{100}} \to \eta^{\text{опт}}_{\text{т р}ijf}, \tag{13}$$

при ограничениях по скорости

$$v^{\min}_{\text{р}ijsf} \le v_{\text{р}ijsf} \le v^{\max}_{\text{р}ijsf} \tag{14}$$

и максимальной загрузкой двигателя

$$\frac{N_{e\text{р}ijf}}{N_{e\text{н}ijf}} - \eta_{N_{eijf}} \to \min, \tag{15}$$

где R_{ijsf} – тяговое сопротивление машины, кН; G_{ijf} – вес j-й энергомашины, кН; $v_{\text{р}ijsf}$ – рабочая скорость агрегата, м/с; α_f – уклон f-го участка в долях единицы; $\eta_{N_{eijsf}}$ – коэффициент загрузки двигателя; $P_{\text{т н}ijf}$ – номинальное тяговое усилие j-го энергетического средства, кН; $N_{e\text{р}ijf}$, $N_{e\text{н}ijf}$ – мощность, на которую загружен двигатель на рабочем режиме, и номинальная мощность двигателя j-й энергомашины, кВт; $\eta_{\text{т р}ijf}$, $\eta^{\text{опт}}_{\text{т р}ijf}$ – фактический и оптимальный тяговый КПД j-го энергетического средства [6–11]

$$\eta_{\text{т}ijf} = \eta_{f_{ijf}} \eta_{\delta_{ijf}} \eta_{\text{мг}ijf}, \tag{16}$$

где $\eta_{f_{ijf}}$ – КПД, учитывающий потери мощности на перекатывание j-го энергетического средства; $\eta_{\text{мг}_{ijf}}$ – КПД, учитывающий потери мощности в трансмиссии j-й энергомашины на i-й операции на f-м участке поля; $\eta_{\delta_{ijf}}$ – КПД, учитывающий потери мощности от буксования; f – индекс номера участка поля ($f \in F$).

При неустановившемся движении МТА тяговое сопротивление агрегата носит случайный характер как во времени, так и в пространстве, распределение которого соответствует нормальному закону и характеризуется размахом варьирования

$$W_{R_{ijsf}} = R_{\max_{ijsf}} - R_{\min_{ijsf}} \tag{17}$$

и степенью неравномерности, характеризующей необходимый запас тягового усилия трактора

$$\sigma_{R_{ijsf}} = \frac{R_{\max_{ijsf}} - R_{\min_{ijsf}}}{R_{\text{ср}_{ijsf}}}, \tag{18}$$

где $R_{\max_{ijsf}}$, $R_{\min_{ijsf}}$, $R_{\text{ср}_{ijsf}}$ – соответственно максимальное, минимальное и среднее арифметическое значение тягового сопротивления машины, кН.

С повышением плотности почвы $\sigma_{R_{ijsf}}$ возрастает, а с увеличением количества машин в агрегате – уменьшается.

Тяговое сопротивление агрегата определяют по выражению

$$R_{ijsf} = Mk_{0_{ijsf}} b_{ijsf} \left(1 + e_{ijs}\left(v_{\text{р}_{ijsf}} - v\right)\right) \pm G_{ijf}\alpha_f, \tag{19}$$

где $Mk_{0_{ijsf}}$ – математическое ожидание удельного сопротивления рабочей машины при скорости v, кН/м; e_{ijs} – коэффициенты увеличения сопротивления рабочей машины на единицу увеличения скорости; v – скорость движения рабочей машины, м/с.

Диапазон скоростей движения агрегата, соответствующий диапазону степени загрузки двигателя, можно выбрать графоаналитическим способом, совмещая тяговую характеристику энергетического средства и характеристику сопротивления сельскохозяйственной машины [6–11]

$$v_{\text{р}_{ijs}} = \sum_{P_{\text{кр}}^{-t\sigma}}^{P_{\text{кр}}^{+t\sigma}} v\varphi\left(P_{\text{кр}}\right), \tag{20}$$

где $P_{\text{кр}}$ – тяговое усилие на крюке, кН; $\varphi\left(P_{\text{кр}}\right)$ – плотность вероятности распределения тягового усилия на крюке; t – аргумент функции распределения тягового усилия; σ – среднее квадратическое отклонение тягового усилия, кН, либо рассчитав рабочую скорость движения, исходя из условия наиболее полной загрузки двигателя трактора

$$v_{\text{р}_{ijsf}}^{Ne} = \frac{\dfrac{\eta_{Ne_{ijf}} - Ne_{\text{вом}_{ijf}}}{Ne_{\text{н}_{ijf}}}\eta_{\text{мг}_{ijf}}\eta_{\delta_{ijf}}}{R_{ijsf} + G_{ijf}\left(f_{\text{т}_{ijf}} + \alpha_f\right)}, \tag{21}$$

в пределах агротехнически допустимых значений

$$v_{\text{р}_{ijsf}} \le v_{\text{а}_{ijsf}}, \tag{22}$$

с учетом пропускной способности основного рабочего органа

$$v_{ijsf}^{q} = \frac{10q_{ijsf}}{b_{\text{р}_{ijsf}} H_{yf}}, \tag{23}$$

где $Ne_{\text{вом}_{ijf}}$ – мощность, затрачиваемая двигателем на привод механизмов рабочих машин, кВт; $f_{\text{т}_{ijf}}$ – коэффициент сопротивления перекатыванию j-й энергомашины; q_{ijsf} – допустимая пропускная способность основного рабочего органа js-го агрегата, кг/с; $b_{\text{р}_{ijsf}}$ – рабочая ширина захвата js-го агрегата, м; H_{yf} – биологическая урожайность y-й культуры на f-м участке, т/га.

Фактическая мощность двигателя, используемая на работу агрегата в случае ограничения скорости движения агротехническими требованиями или пропускной способностью рабочей машины, рассчитывается по следующей формуле:

$$Ne_{\text{р}_{ijf}} = \frac{\dfrac{R_{ijsf} + G_{ijf}\alpha_f}{\eta_{\text{т}_{ijf}}} + Ne_{\text{вом}}}{v_{\text{р}_{ijsf}}} \tag{24}$$

и ограничивается условием (15).

Как уже отмечалось (12), производительность машинно-тракторного агрегата $W_{\text{ч}ijsf}$ (га/ч) зависит от рабочей скорости $v_{\text{р}ijsf}$ (м/с), ширины захвата $b_{\text{р}ijsf}$ (м) и коэффициента использования времени смены τ_{ijsf}, т. е.

$$W_{\text{ч}ijsf} = 0{,}36 b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf} \tau_{ijsf}. \tag{25}$$

Полагая, что скоростной режим агрегата $v_{\text{р}ijsf}$ и комплектование машинами-орудиями для данной операции $b_{\text{р}ijsf}$ выбраны оптимальными, из приведенного выражения (24) видно, что производительность существенно зависит от величины τ, комплексно характеризующего естественно-производственные условия работы МТА.

Коэффициент использования времени смены в общем виде может быть представлен уравнением

$$\tau_{ijsf} = \frac{\tau_{\text{пз}ijsf}}{\frac{1}{\tau_{\text{дв}ijsf}} + \frac{1}{\tau_{\text{то}ijsf}} + \frac{1}{\tau_{\text{тн}ijsf}} + \frac{1}{\tau_{\text{н}ijsf}} + \frac{1}{\tau_{\text{п}ijsf}} - 4}, \tag{26}$$

где частные коэффициенты, учитывающие: $\tau_{\text{пз}ijsf}$ – время на подготовительно-заключительные операции; $\tau_{\text{дв}ijsf}$ – использование времени движения; $\tau_{\text{то}ijsf}$ – время на технологическое обслуживание; $\tau_{\text{тн}ijsf}$ – время на устранение нарушений технологического процесса; $\tau_{\text{н}ijsf}$ – техническую надежность агрегата; $\tau_{\text{п}ijsf}$ – перестроение агрегата из рабочего в транспортное положение и обратно, время переезда с участка на участок.

Отдельные коэффициенты использования времени смены зависят от $b_{\text{р}ijsf}$ и $v_{\text{р}ijsf}$ и могут быть определены из следующих выражений:

$$\tau_{\text{дв}ijsf} = \frac{T_{\text{р}ijsf}}{T_{\text{р}ijsf} + T_{\text{х}ijsf}} = \frac{1}{1 + \frac{b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf} k_{\text{х}i}}{v_{\text{х}ijsf} L_{\text{р}if}}}, \tag{27}$$

$$\tau_{\text{то}ijsf} = \frac{T_{\text{р}ijsf}}{T_{\text{р}ijsf} + T_{\text{то}ijsf}} = \frac{1}{1 + \frac{b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf} t_{\text{то}ijsf} H_{yf}}{Q_{ijsf} N_{ijsf}}}, \tag{28}$$

$$\tau_{\text{тн}ijsf} = \frac{T_{\text{р}ijsf}}{T_{\text{р}ijsf} + T_{\text{тн}ijsf}} = \frac{1}{1 + 0{,}36 b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf} t_{\text{тн}ijsf}}, \tag{29}$$

$$\tau_{\text{н}ijsf} = \frac{T_{\text{р}ijsf}}{T_{\text{р}ijsf} + T_{\text{н}ijsf}} = \frac{1}{1 + 0{,}36 b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf} t_{\text{н}ijsf}}, \tag{30}$$

$$\tau_{\text{п}ijsf} = \frac{T_{\text{р}ijsf}}{T_{\text{р}ijsf} + T_{\text{п}ijsf}} = \frac{1}{1 + \frac{0{,}36 b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf}}{10^4 F_i} \left(\frac{L_{\text{п}ijsf}}{v_{\text{п}ijsf}} + N_{ijsf} t_{\text{п}ijsf} \right)}. \tag{31}$$

С учетом выражений (27–31) после некоторых преобразований коэффициент использования времени смены равен

$$\tau_{ijsf} = \frac{\tau_{\text{пз}ijsf}}{1 + v_{\text{р}ijsf} \left\{ \frac{l_{\text{п}ijsf}}{v_{\text{х}ijsf} L_{\text{р}ijsf}} + \frac{b_{\text{р}ijsf} t_{\text{то}ijsf} H_{yf}}{Q_{ijsf} N_{ijsf}} \right\} + 0{,}36 b_{\text{р}ijsf} v_{\text{р}ijsf} \left[t_{\text{тн}ijsf} + \frac{t_{\text{н}ijsf}}{10^4 F_i} \left(\frac{L_{\text{п}ijsf}}{v_{\text{п}ijsf}} + N_{ijsf} t_{\text{п}ijsf} \right) \right]}, \tag{32}$$

где $L_{\text{р}ijsf}$ – рабочая длина гона, м; $T_{\text{р}ijsf}$ – чистое рабочее время смены, ч; $T_{\text{х}ijsf}$ – время холостых поворотов за смену, ч; $v_{\text{р}ijsf}$, $v_{\text{х}ijsf}$ – скорость рабочего и холостого ходов, м/с; $k_{\text{х}i}$ – кинематическая характеристика агрегата:

$$k_{\text{х}i} = \frac{l_{\text{п}ijsf}}{b_{\text{р}ijsf}}, \tag{33}$$

где $l_{\text{п}ijsf}$ – длина поворота агрегата, м; $T_{\text{то}ijsf}$ – время остановок агрегата на технологическое обслуживание, ч; $t_{\text{то}ijsf}$ – продолжительность одного простоя для загрузки технологических емкостей, с; Q_{ijsf} – вместимость технологической емкости, кг; $T_{\text{тн}ijsf}$ – время остановок для устранения нарушений технологического процесса, ч; $t_{\text{тн}ijsf}$ – относительное время остановок для устранения нарушений технологического процесса, с/м^2; $T_{\text{н}ijsf}$ – время простоев по техническим неисправностям, ч; $t_{\text{н}ijsf}$ – относительное время технической неисправности агрегата, с/м^2; $T_{\text{п}ijsf}$ – время переездов за смену, ч; $L_{\text{п}ijsf}$ – расстояние переезда агрегата с поля на поле в течение смены, м; $v_{\text{п}ijsf}$ – скорость движения агрегата при переездах, м/с; $t_{\text{п}ijsf}$ – время перестроения агрегата из рабочего в транспортное положение и обратно, с.

Сменная производительность определяется по типовой методике [6–11]

$$W_{\text{см}ijsf} = W_{\text{ч}ijsf} T_{\text{см}}. \tag{34}$$

При организации производственного процесса неизбежны простои МТА по техническим неисправностям. Вероятность безотказной работы агрегата в произвольно выбранный момент времени в промежутках между плановыми техническими обслуживаниями, т. е. ритмичность работ, учитывается частным коэффициентом технической надежности агрегата (30), или может быть принята по нормативным данным [12, 13]

$$t_{\text{н}ijsf} = k_{\text{тг}ijs}, \tag{35}$$

где $k_{\text{тг}ijs}$ – коэффициент технической готовности техники в реальных условиях эксплуатации.

Наряду с технологически обусловленными внутрисменными простоями при длительной эксплуатации машин имеют место затраты и потери времени из-за метеорологических условий.

Наработка МТА за календарный период

$$W_{js}^{\text{к}} = W_{\text{см}ijs} k_{\text{им}i} D_{\text{опт}}, \tag{36}$$

где $k_{\text{им}_i}$ – коэффициент использования времени *i*-й операции по метеорологическим условиям [3, 11].

Производительность агрегата зависит также от срока эксплуатации входящих в него технических средств. Снижение наработки тракторов и сложной сельскохозяйственной техники с увеличением срока службы происходит вследствие повышения интенсивности отказов по мере износа машин и увеличения продолжительности времени на их устранение.

С учетом возраста трактора и/или сложной сельскохозяйственной машины наработка МТА за календарный период

$$W_{js}^{\text{к}\prime} = W_{js}^{\text{к}} k_{t_{js}}, \tag{37}$$

где $k_{t_{js}}$ – коэффициент, учитывающий потери годовой наработки *j*-го трактора (*s*-й сложной сельскохозяйственной машины) с увеличением срока службы [12]; *t* – год эксплуатации *j*-го трактора (*s*-й сложной сельскохозяйственной машины).

Заключение

Для моделирования процесса сгребания просушенной (провяленной) массы в валки ленточным валкователем на базе различных тракторов, формирования рационального комплекса машин для заготовки высококачественных кормов в конкретных условиях разработана методика определения функциональных показателей, отражающих уровень выполнения основных производственных функций, соответствующих принципам построения механизированных процессов.

Работа выполнялась в рамках задания 15 «Обосновать основные параметры, разработать и освоить производство ленточного валкователя» подпрограммы «Белсельхозмеханизация-2025» ГНТП «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021–2025 гг.

Список использованных источников

1. Программный комплекс мер по развитию кормопроизводства на 2021–2025 годы : утв. заместителем Премьер-министра Республики Беларусь от 16 марта 2021 г. № 06/217-261/220.

2. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Практикум : учеб. пособие / Т. А. Непарко [и др.] ; под ред. Т. А. Непарко. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2018. – 220 с.

3. Непарко, Т. А. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства : учеб. пособие / Т. А. Непарко, А. В. Новиков, И. Н. Шило ; под общ. ред. Т. А. Непарко. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2015. – 199 с.

4. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Практикум : учеб. пособие / А. В. Новиков, А. П. Ляхов, Т. А. Непарко [и др.] ; под ред. А. В. Новикова. – Мн. : БГАТУ, 2011. – 408 с.

5. Завалишин, Ф. С. Основы расчета механизированных процессов в растениеводстве / Ф. С. Завалишин. – М. : Колос, 1973. – 317 с.

6. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства : учебник / А. В. Новиков, А. П. Ляхов, Т. А. Непарко [и др.] ; под ред. А. В. Новикова. – Мн. : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2012. – 512 с.

7. Непарко, Т. А. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. Практикум : учеб. пособие / Т. А. Непарко, Д. А. Жданко, И. Н. Шило ; под ред. Т. А. Непарко. – Мн. : БГАТУ, 2021. – 192 с.

8. Эксплуатация сельскохозяйственной техники : учебник / Ю. В. Будько, Г. Ф. Добыш, В. Я. Тимошенко [и др.] ; под ред. Ю. В. Будько. – Мн. : Беларусь, 2006. – 512 с.

9. Эксплуатация сельскохозяйственной техники. Практикум : учеб. пособие / И. Н. Шило [и др.] ; под ред. И. Н. Шило. – Мн. : Беларусь, 2008. – 252 с.

10. Техническое обеспечение земледелия : учеб. пособие / А. В. Новиков [и др.]. – Мн. : БГАТУ, 2006. – 384 с.

11. Непарко, Т. А. Технология и техническое обеспечение производства продукции растениеводства : эл. учеб. пособие / Т. А. Непарко ; Минсельхозпрод РБ, БГАТУ, Кафедра ЭМТП и А. – Мн. : БГАТУ, 2023. – URL: https://rep.bsatu.by/handle/doc/20492 (дата обращения: 12.11.2015).

12. Краткий справочник нормативов трудовых и материальных затрат для ведения сельскохозяйственного производства / сост. Я. Н. Бречко, М. Е. Суманов. – Мн. : БелНИИАЭ, 2000. – 192 с.

13. Справочник нормативов трудовых и материальных затрат для ведения сельскохозяйственного производства / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, НАН Беларуси, НИУ «БелНИИ аграрной экономики» ; сост. Я. Н. Бречко, М. Е. Суманов ; под ред. В. Г. Гусакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн., БелНИИ аграрной экономики, 2002. – 440 с.

УДК 631.35

Поступила в редакцию 25.11.2025
Received 25.11.2025

Т. А. Непарко[1], В. Б. Ловкис[1], Н. Н. Быков[1], Э. В. Дыба[2]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mta_mtp@bsatu.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru

ЛЕНТОЧНЫЙ ВАЛКОВАТЕЛЬ: ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье представлена методика определения эксплуатационных показателей для моделирования процесса сгребания просушенной (провяленной) массы в валки ленточным валкователем на базе различных тракторов, формирования рационального комплекса машин для заготовки высококачественных кормов в конкретных условиях. Выделены две группы факторов, определяющих экологичность использования техники: первая группа связана с повышением эффективности использования всех видов ресурсов, вторая группа факторов требует специальных затрат на повышение экологичности.

Ключевые слова: валкователь, кормопроизводство, эксплуатационные затраты, материалоемкость, топливо, затраты труда, давление, ресурс.

T. A. Neparko[1], V. B. Lovkis[1], N. N. Bykov[1], E. V. Dyba[2]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mta_mtp@bsatu.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru

BELT ROLLER: PERFORMANCE INDICATORS AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PRODUCTION

Abstract. The article presents a methodology for determining operational indicators for modeling the process of raking dried (wilted) mass into windrows using a belt rake based on various tractors, and the formation of a rational set of machines for harvesting high-quality feed under specific conditions. Two groups of factors have been identified that determine the environmental friendliness of technology use: the first group is associated with increasing the efficiency of using all types of resources, while the second group of factors requires special expenditures to improve environmental friendliness.

Keywords: swather, forage production, operating costs, material consumption, fuel, labor costs, pressure, resource.

Введение

Принцип ресурсосбережения предусматривает снижение эксплуатационных затрат и обеспечивается выбором рациональной технологической схемы процесса заготовки кормов и соответствующих технических средств, способов движения в зависимости от размера, рельефа и конфигурации полей, длины гона, маршрута движения транспортных средств с минимальным грузооборотом.

Снижение вредных воздействий на среду при выполнении механизированных операций связано, прежде всего, с сохранением и увеличением плодородия почв. Оструктуренные почвы естественного сложения имеют равновесную плотность 1,00–1,48 г/м^3. При плотности на 20–50 % выше равновесной связность многих типов почв возрастает в 6–10 раз, что вызывает разрушение

структуры, снижает ее пористость и водопроницаемость. Исследования показывают, что избыточное уплотнение значительно повышает не только сопротивление дальнейшей обработке, но и требует дополнительных проходов агрегата с почвообрабатывающими орудиями для придания почве оптимальной структуры, что влечет за собой рост энергетических затрат. Передвижение тракторов и другой сельскохозяйственной техники по полям ведет к разрушению не только макроструктуры, но и микроструктуры, повышает содержание пыли в пахотном слое (предельное содержание частиц эрозионной фракции диаметром менее 0,9 мм – более 47 %), что усугубляет эрозию почвы и снижает ее ветроустойчивость.

Коллективом авторов УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» и РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» при выполнении научно-исследовательских работ по заданию 15 «Обосновать основные параметры, разработать и освоить производство ленточного валкователя» подпрограммы «Белсельхозмеханизация-2025» ГНТП «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021–2025 гг. разработана методика определения показателей эксплуатационных затрат, к которым относятся затраты материальных, энергетических, трудовых и денежных ресурсов, практически всегда имеющие количественное выражение и принятые в качестве критериев, и показателей экологичности производства.

Основная часть

Эксплуатационные показатели. Экономия металла и других материалов, необходимых для производства техники, достигается как путем непосредственного уменьшения массы машин благодаря их конструктивному совершенствованию, так и в результате повышения их надежности и долговечности. Эксплуатационная материалоемкость *i*-й операции с учетом не только массы и производительности, но и срока службы машин, ежегодного расхода запасных частей, технологически обусловленного количества обработок наиболее объективно оценивается следующим выражением [1]:

$$M_{ijs} = \frac{d}{W_{\text{ч}ijs}} \sum_{i=1}^{n} \frac{G_{ijs} N_{is} \left(\frac{1}{T_{\text{а}\,js}} + \sum_{l=1}^{n} \gamma_{jsl} a_{\text{то}\,js} \right)}{T_{\text{г}\,js}}, \quad (1)$$

где d – требуемое по агротехнике количество обработок; G_{ijs} – масса *j*-го трактора и *s*-й сельскохозяйственной машины, кг; N_{is} – количество *s*-х сельскохозяйственных машин в агрегате, шт.; $T_{\text{а}\,js}$ – амортизационный срок службы *j*-го трактора и/или *s*-й сельскохозяйственной машины, лет; γ_{jsl} – удельный вес стоимости запасных частей к *j*-му трактору и/или *s*-й сельскохозяйственной машине на *l*-й вид ремонта, долей; $a_{\text{то}\,js}$ – норматив затрат на ремонт и техническое обслуживание *j*-го трактора и/или *s*-й сельскохозяйственной машины, %; $T_{\text{г}\,js}$ – годовая загрузка *j*-го трактора и/или *s*-й сельскохозяйственной машины, ч.

Расход топлива на единицу выполненной работы (кг/га (т)) целесообразно определять по следующей формуле [2]:

$$\Theta_{ijs} = g_{\text{т}\,ijs} k_{ijs} \frac{1 + \sigma_{\text{п}}}{0{,}36}, \quad (2)$$

где $g_{\text{т}ijs}$ – удельный расход топлива (тяговый), г/кВт· ч; k_{ijs} – удельное сопротивление *js*-го агрегата, кН/м; $\sigma_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий долю расхода топлива на холостом режиме работы агрегата и на остановках.

Таким образом, экономия энергетических ресурсов при эксплуатации техники зависит как от технической характеристики агрегата и условий работы $\Theta = f(k)$ (типа почвы, глубины обработки, влажности, каменистости, технического состояния машин и их регулировок, скорости движения), от технического состояния энергетического средства (регулировок), правильности

комплектования агрегата, выбора скоростных и загрузочных режимов $\Theta = (g_т)$, так и от организации работы $\Theta = (\sigma_т)$ (количества рабочих и холостых ходов, остановок).

Затраты трудовых ресурсов при выполнении механизированных работ являются основным показателем, определяющим уровень механизации и их себестоимость. Общие прямые затраты труда определяют по следующему выражению:

$$З_{ijsf} = \frac{Л_{м_{ijsf}} + Л_{всп_{ijsf}}}{W_{ч_{ijsf}}}, \quad (3)$$

где $Л_{м_{ijsf}}$, $Л_{всп_{ijsf}}$ – соответственно количество механизаторов и вспомогательных рабочих, обслуживающих один *js*-й агрегат, чел.

Снижение затрат трудовых ресурсов можно достигнуть повышением производительности машинно-тракторных агрегатов, совершенствованием машин и технологических процессов, механизацией вспомогательных операций.

Снижение себестоимости операции в значительной мере зависит от уровня использования технических средств. Поэтому эффективность использования машин при выполнении механизированных работ целесообразно оценивать по прямым эксплуатационным затратам, под которыми понимают непосредственные затраты денежных средств на выполнение этих работ. Прямые эксплуатационные затраты включают

$$S_{ijsf} = S_{зп_{ijsf}} + S_{а_{ijsf}} + S_{то_{ijsf}} + S_{тсм_{ijsf}} + S_{пр_{ijsf}}, \quad (4)$$

где $S_{зп_{ijsf}}$ – заработная плата обслуживающего персонала с начислениями на социальное страхование, у. е.; $S_{а_{ijsf}}$ – амортизационные отчисления на основные средства производства, у. е.; $S_{то_{ijsf}}$ – затраты на ремонт, техническое обслуживание и хранение (машины, агрегата), у. е.; $S_{тсм_{ijsf}}$ – затраты на топливо, смазочные материалы и электроэнергию, у. е.; $S_{пр_{ijsf}}$ – прочие затраты на вспомогательные материалы, у. е.

Как видно из (4) денежные ресурсы определяют возможность управлять размерами, состоянием и развитием всех остальных ресурсов. На снижение денежных затрат оказывают влияние как снижение затрат труда, топлива и смазочных материалов, так и повышение производительности и годовой загрузки машинно-тракторных агрегатов.

Экологичность производства. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что для решения проблемы снижения уплотняющего воздействия на почву гораздо более эффективным является применение шин больших габаритов или установка сдвоенных колес, а также «колес-тандемов» и т. п. При этом необходимо соблюдать соответствие грузоподъемности шины ее внутреннему давлению, что обеспечивает допустимый уровень деформаций и сохранение необходимого ресурса шин.

Негативное воздействие движителей машинно-тракторных агрегатов на почву с учетом характеристики шин отдельной машины при известных значениях массы машины и количества колес можно оценить по величине среднего давления движителей на почву

$$q_{Кср\ ijs\ р} = \frac{m_{к_{ijs}} g}{10^3 F_{кп_{ijs}}}, \quad (5)$$

где $m_{к_{ijs}}$ – масса, создающая статическую нагрузку на почву единичным колесным движителем, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $F_{кп_{ijs}}$ – площадь контакта шины колеса с почвой, м^2.

Качественную характеристику изменения средних давлений в контакте ходовых систем машин различных классов от изменения их общей массы дает индекс давления [3, 4]

$$PI_{ijs} = \frac{G_{ijs} g}{10^3 F_{расч_{ijs}}}, \quad (6)$$

где G_{ijs} – общая масса машины, кг; $F_{расч_{ijs}}$ – сумма расчетных площадей всех шин машины, м^2.

Особо важное значение в повышении экологичности имеет снижение потерь и отходов средств химизации, так как, во-первых, на их производство расходуется большое количество энергии и ресурсов, во-вторых, они обладают высокой степенью агрессивности по отношению к внешней среде. Количественная оценка отходов может быть получена на основе анализа материального баланса вещества на всех этапах. Она тесно связана с показателями полноты использования ресурсов. В частности, коэффициент полезного использования технологических материалов (удобрений, пестицидов, семян и др.) можно определить, как отношение биологически необходимого количества вещества к общему их количеству, расходуемому на единицу площади:

$$\varphi_{\text{м}i} = \frac{q_{\text{н}i}}{q_{\text{н}i} + \sum_{j=1}^{n} q_{\text{п}i}}, \tag{7}$$

где $\varphi_{\text{м}i}$ – коэффициент полезного использования материалов; $q_{\text{н}i}$ – биологически необходимое количество материала на *i*-й операции, кг/га; $q_{\text{п}i}$ – потери материалов на *j*-м этапе его хранения и переработки, отнесенные к единице площади, кг/га.

При оценке вредности отходов и потерь вещества следует учитывать кроме количества также меру агрессивности по отношению к среде и время разложения до безвредного уровня. Такие количественные характеристики могут быть получены на основе понятия эксергии, т. е. работы вещества при его взаимодействии со средой. В частности, показатель вредного действия вещества можно представить в следующем виде:

$$\chi_{\text{о}k} = \lambda_{\text{о}k} C_{\text{о}k} T_{\text{о}k}, \tag{8}$$

где $\chi_{\text{о}k}$ – показатель вредного действия отходов *k*-го вида, Дж г/м^2; $\lambda_{\text{о}k}$ – удельное значение эксергии отходов, Дж/кг; $C_{\text{о}k}$ – концентрация отходов на площади, кг/м^2; $T_{\text{о}k}$ – время действия отходов, ч.

Еще надо учесть довольно большие потери энергии и нефтепродуктов, низкий уровень утилизации отходов и повторного использования элементов конструкции списанной техники. Полнота использования ресурсов прямо пропорциональна срокам службы технических средств, а также интенсивности их применения.

С учетом вышесказанного можно выделить две группы факторов, определяющих экологичность использования техники. Первая группа связана с повышением эффективности использования всех видов ресурсов, т. е. активизация этих резервов не только повышает экологичность, но и улучшает функциональные показатели, снижает затраты. Так, повышение срока службы техники улучшает и экономические, и экологические показатели. Вторая группа факторов требует специальных затрат на повышение экологичности. Так, проведение восстановительных работ (разуплотнение почвы), внедрение системы нейтрализации отходов требуют дополнительных ресурсов. Однако это не значит, что дополнительные затраты экономически нецелесообразны. Как правило, они дают большой эффект системного характера на длительную перспективу.

Заключение

Для моделирования процесса сгребания просушенной (провяленной) массы в валки ленточным валкователем на базе различных тракторов, формирования рационального комплекса машин для заготовки высококачественных кормов в конкретных условиях, разработана методика определения эксплуатационных показателей.

Выделены две группы факторов, определяющих экологичность использования техники: первая группа связана с повышением эффективности использования всех видов ресурсов, вторая группа факторов требует специальных затрат на повышение экологичности.

Работа выполнялась в рамках задания 15 «Обосновать основные параметры, разработать и освоить производство ленточного валкователя» подпрограммы «Белсельхозмеханизация-2025» ГНТП «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021–2025 гг.

Список использованных источников

1. Шило, И. Н. Оптимизация стратегии технического оснащения сельскохозяйственного производства в условиях различных форм хозяйствования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Шило Иван Николаевич ; БГАТУ. – Мн., 1993. – 286 л.

2. Непарко, Т. А. Технология и техническое обеспечение производства продукции растениеводства : эл. учеб. пособие / Т. А. Непарко ; Минсельхозпрод РБ, БГАТУ, кафедра ЭМТП и А. – Мн. : БГАТУ, 2023. – URL: https://rep.bsatu.by/handle/doc/20492 (дата обращения: 12.11.2015).

3. Синкевич, П. Н. Тенденция развития зарубежной кормоуборочной техники : обзор. информ. / Всесоюз. научн.-исслед. ин-т и техн.-эконом. исслед. агропром. компл. / П. Н. Синкевич, В. С. Бушейко, В. Н. Кецко. – М., 1989. – 52 с.

4. Юшин, А. А. Пути снижения уплотнения почвы мобильными агрегатами / А. А. Юшин, В. Г. Евтенко, Ю. Н. Благодатный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 4. – С. 17–20.

УДК 631.348.4

Поступила в редакцию 18.07.2025
Received 18.07.2025

А. В. Ленский, А. А. Жешко

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: alex_lensky@mail.ru

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ КУКУРУЗЫ ОТ НАСЕКОМЫХ-ВРЕДИТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ АГРОДРОНА

Аннотация. В статье представлена программа и методика исследований эффективности обработки кукурузы от насекомых-вредителей при помощи агродрона, приведены особенности настройки параметров химической обработки.

Ключевые слова: агродрон, насекомые-вредители, химическая защита, параметры эксплуатации, качество осаждения, результаты эксперимента, оценка биологической эффективности.

A. V. Lenski, A. A. Zheshka

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: alex_lensky@mail.ru

ON THE ISSUE OF ASSESSING THE BIOLOGICAL EFFECTIVENESS OF PROCESSING CORN FROM INSECT PESTS USING AN AGRODRON

Abstract. The program and methodology of research on the effectiveness of processing corn from insect pests using an agrodron are presented, and the features of setting the parameters of chemical treatment are given.

Keywords: agricultural drone, insect pests, chemical protection, operating parameters, deposition quality, experimental results, biological efficiency assessment.

Введение

Современные технологии растениеводства основаны на широком применении химических средств защиты растений, использование которых оказывает решающую роль в получении сельскохозяйственной продукции требуемых объемов и качества. При этом немаловажное значение имеют показатели экономической и биологической эффективности, производительности и «экологичности» (минимизации негативного воздействия на окружающую среду) химических обработок. Новые возможности для улучшения этих показателей открылись с появлением и все более активным применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или агродронов. В настоящее время на рынке доступно множество моделей специализированных БПЛА, однако ощущается нехватка научного обеспечения и подтверждения целесообразности использования дронов для химической обработки различных культур.

В Беларуси были проведены определенные исследования, доказывающие экономическую и технологическую эффективность использования агродронов. В частности, производственный анализ применения технологии опрыскивания с помощью БПЛА собственной разработки А-60Х был выполнен компанией «Авиационные технологии и комплексы» при внесении средств защиты растений на посевах зерновых культур и подсолнечника [1].

Выполненные исследования подчеркивают возрастающую роль БПЛА в трансформации традиционных методов сельскохозяйственного производства, а также их потенциальные возможности в части повышения эффективности и снижения экологического воздействия на окружающую среду. В то же время существует объективная необходимость выполнения более масштабных исследований и оптимизации эксплуатационных параметров опрыскивания высокостебельных культур с применением БПЛА, в том числе с проведением оценки биологической эффективности действия препаратов.

Основная часть

Исследование технологических аспектов химической обработки кукурузы от насекомых-вредителей осуществляется с применением специализированного агродрона промышленного производства. В качестве базовой модели принят агродрон Z30 компании EFT Electronic Technology (для проведения исследований допускается использовать иную модель БПЛА, имеющую аналогичные технические и эксплуатационные характеристики).

Агродрон Z30 имеет модульную конструкцию и состоит:

– из механических элементов: рама, стойки шасси, лучи с механизмом складывания и фиксации, крышки и корпусные изделия;

– электронных компонентов управления полетом: контроллер, система RTK и GPS, система связи;

– силовой установки: бесколлекторные моторы с регуляторами оборотов (ESC), пропеллеры;

– систем контроля: фронтальный и задний радары, радар высоты, FPV-камера;

– системы внесения пестицидов: бак с насосами и датчиком потока, весовой модуль, центробежные форсунки;

– системы питания: аккумуляторная батарея, платы распределения питания (рисунок 1).

Масса агродрона с установленной системой внесения пестицидов и аккумулятором составляет 40 кг, максимальная взлетная масса – 70 кг. Габаритные размеры БПЛА – 2435 × 2541 × 752 мм (в рабочем положении), 979 × 684 × 752 мм (в транспортном положении). В конструкции агродрона Z30 использованы современные материалы, обладающие высокой прочностью и износостойкостью: материал рамы и шасси – авиационный алюминий, материал несущих элементов – ударопрочный углеродный пластик, материал лучей и пропеллеров – карбон.

Эксплуатационные характеристики агродрона Z30 приведены на основе документации производителя БПЛА:

– максимальная высота полета – до 60 м; минимальная рабочая высота при опрыскивании – 1 м над культурой;

– максимальное время полета – 17,5 мин (пустой бак); 7,5 мин (при полной загрузке) при использовании батареи типа 14S30000 mAh;

– максимальная дальность полета – до 3 км при отсутствии препятствий;

– максимальный угол крена – 15–30°;

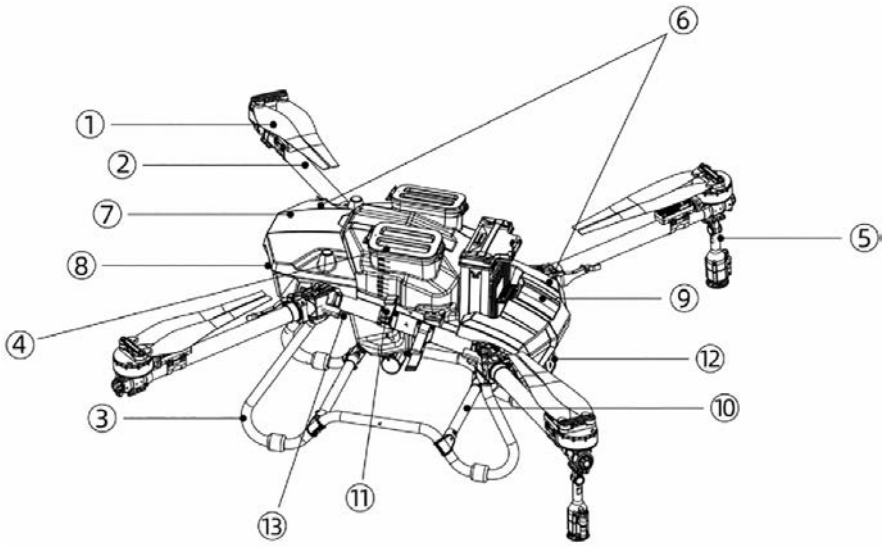


Рисунок 1 – Общий вид агродрона EFT Z30: *1* – бесколлекторный мотор с регулятором оборотов (в комплекте); *2* – луч (диаметр 50 мм); *3* – стойки шасси; *4* – бак для пестицидов (емкость 30 л); *5* – центробежная форсунка; *6* – защитные панели; *7* – передняя крышка; *8* – фронтальная камера; *9* – задняя крышка; *10* – поперечина шасси; *11* – транспортировочная защелка луча; *12* – радар предотвращения столкновений; *13* – антенны радиосвязи

– максимальная скорость полета – 20 м/с; минимальная рабочая скорость при опрыскивании – 0,5 м/с;

– максимальная допустимая скорость ветра – 5 м/с; температура воздуха при эксплуатации – от 0 °С до +40 °С.

Агродрон Z30 несет на себе следующие элементы полезной нагрузки: система внесения пестицидов (включает бак с установленными насосами, датчиком потока и уровня, трубопроводы, центробежные форсунки), радар высоты, радары предотвращения столкновений, фронтальная камера и контрольные светодиодные фонари. Система внесения удобрений изначально является составной частью агродрона и показатели центровки Z30 установлены изготовителем с учетом ее обязательной установки. Максимальная производительность водяных насосов составляет 16 л/мин (2 × 8 л/мин). Центробежные форсунки с принудительным охлаждением обеспечивают распыление рабочего раствора в пределах 50–500 мкм в зависимости от установленной ширины внесения.

Радар высоты (производство JIYI Robot) установлен в нижней части агродрона и предназначен для отслеживания изменения рельефа в направлении полета и корректировки высоты полета для обеспечения равномерного опрыскивания. Диапазон рабочей высоты радара – 0,3–15 м, точность определения высоты – 0,05 м. Радары предотвращения столкновений (JIYI Robot) установлены в передней и задней части агродрона и предназначены для измерения относительного расстояния между БПЛА и препятствием в процессе полета. Рабочий диапазон радаров предотвращения столкновений – 1,0–25 м, точность определения расстояния – 0,1 м, разрешение – 0,6 м. Наиболее эффективно радары работают при скорости полета не более 6 м/с, когда угол крена – до 20°, а высота полета – не менее 2 м.

Фронтальная камера с LED-подсветкой предназначена для передачи видеоизображения на пульт оператора БПЛА для дополнительного контроля окружающей обстановки. Контрольные светодиодные фонари интегрированы в лучи БПЛА и предназначены для упрощения визуального контроля за работой агродрона, особенно в темное время суток.

Радар высоты, радары предотвращения столкновений, фронтальная камера и контрольные светодиодные фонари – существенно не изменяют вес, центровку, нагрузку на электросеть и динамику полета.

Целевая нагрузка включает рабочий раствор для внесения. Добавление целевой нагрузки увеличивает массу, но существенно не изменяет центровку БПЛА. Учет динамического изменения массы агродрона Z30 в процессе работы осуществляется полетным контроллером, который соответствующим образом корректирует работу моторов для стабильного выполнения полета.

Силовая установка и система питания. На агродроне Z30 используется целостная силовая установка производства компании HobbyWing, которая включает регулятор оборотов (ESC), бесколлекторный электродвигатель и воздушный винт:

– модель двигателя: 11115 (95kV);

– максимальная тяга: 34 кг;

– максимальный пиковый ток регулятора оборотов: 150 А (в течение 10 с);

– количество воздушных винтов: 4.

Вид и объем используемого топлива: Smart-аккумулятор компании Shenzhen Zhian New Energy Technology Co., Ltd., модель – ZAB1430-02, емкость аккумулятора – 30000 mAh, масса – 10,2 кг. Батареи для БПЛА емкостью 30 Ah (ZAB1430-02) рекомендованы производителем БПЛА и имеют соответствующие сертификаты и протоколы испытаний.

Контроль за работой силовой установки, уровнем заряда и состоянием ячеек аккумулятора осуществляется с пульта управления оператора БПЛА в приложении «Агро Помощник». Дополнительно уровень заряда аккумулятора отображается светодиодной индикацией на его корпусе (5 светодиодов обеспечивают шаг контроля – 20 %). При достижении низкого уровня заряда аккумулятора производится оповещение в приложении «Агро Помощник», при достижении критического уровня заряда аккумулятора – автоматический возврат на точку взлета или принудительная посадка БПЛА (низкий и критический уровни устанавливаются в приложении «Агро Помощник»).

Производителем Shenzhen Zhian New Energy Technology Co., Ltd установлен гарантийный срок эксплуатации аккумуляторов – 650 циклов заряд/разряд. Количество циклов отображается на дисплее зарядного устройства в процессе зарядки аккумулятора либо может быть проконтролировано при помощи Android-приложения, рекомендуемого производителем аккумуляторов.

Система управления и навигации. Расположение авионики основано на групповом модульном принципе – в передней части агродрона Z30 на специальной площадке смонтированы полетный контроллер, приемник радиосигнала, модуль точного позиционирования (RTK) и приемник GPS. Антенны RTK размещены по краям площадки с соблюдением минимального расстояния между ними (не менее 40 см). Антенны радиосвязи с пультом оператора расположены под несущей рамой БПЛА. Подключение силовой установки и полезной нагрузки к полетному контроллеру осуществляется через платы управления и питания, смонтированные в передней и задней частях агродрона (рисунок 2).

Агродрон Z30 оснащен полетным контроллером серии K++V2 (JIYI Robot). При необходимости импорт ключевых параметров можно осуществить с пульта управления в приложении «Агро Помощник».

Принцип определения БПЛА своего местоположения – спутниковая система позиционирования GPS и точное позиционирование RTK на основе собственной базовой станции или дифференциальных поправок NTRIP.

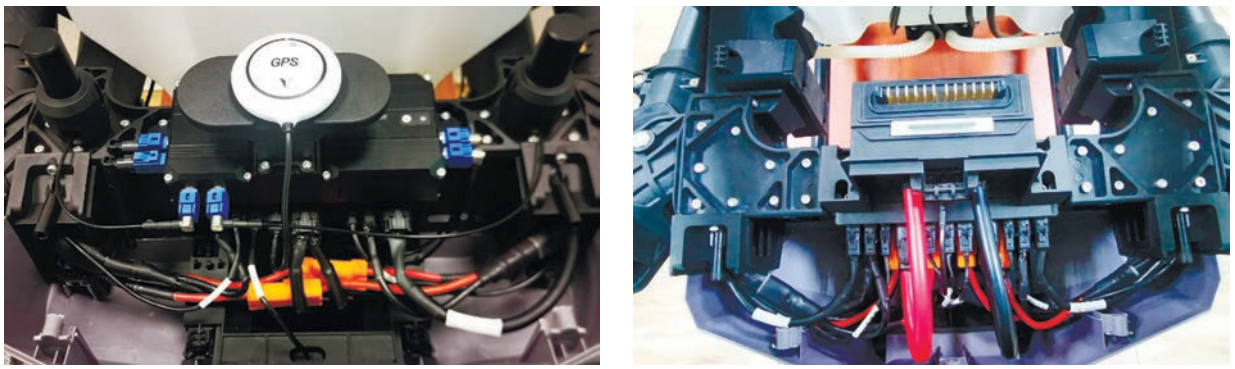
Точность позиционирования GPS*:* горизонтальная – ±1,5 м; вертикальная – ±0,5 м; точность позиционирования RTK*:* горизонтальная – ±0,05 м; вертикальная – ±0,1 м.

Процедура проверки навигационной системы – автоматическая с отображением типа сигнала, количества спутников и мощности сигнала RTK на пульте оператора в приложении «Агро Помощник». Резервная система навигации – визуальное позиционирование (с учетом радара высоты, радаров предотвращения столкновений, фронтальной камеры).

При эксплуатации агродрона Z30 предусмотрено 3 режима полета: ручной с искусственной стабилизацией и удержанием высоты, автоматический на основе запланированного и рассчитанного маршрута, A-B (параллельно заданной линии).

Для управления агродроном используется пульт дистанционного управления MK15 (рисунок 3). Канал управления использует спектр радиочастот, соответствующий законодательству Республики Беларусь. Соединение пульта с БПЛА осуществляется по протоколу UART. Для обеспечения стабильности сигнала и безопасности полета рекомендуется, чтобы расстояние между пультом дистанционного управления и дроном не превышало 1 000 м.

На пульте отображаются маршрут полета, технологические параметры внесения пестицидов, параметры полета, видео с камеры агродрона. При помощи стиков, встроенных кнопок и переключателей осуществляется управление агродроном Z30, полезной нагрузкой, обеспечивается переключение режимов работы. Пульт управления работает с приложением «Агро Помощник»



а *б*

Рисунок 2 – Расположение элементов авионики агродрона Z30:
а – плата контроллера с GPS и RTK; *б* – плата распределения питания



Рисунок 3 – Пульт дистанционного управления агродрона Z30

на операционной системе Android. При эксплуатации агродрона Z30 предусмотрен комплекс предупреждающих сигналов, поступающих оператору с экрана пульта управления:

– необходимость калибровки пульта или систем контроллера (акселерометра, магнитного компаса, GPS);

– предупреждение об уровне сигнала RTK;

– предупреждение о фиксации лучей;

– информирование о записи маршрута;

– предупреждение о низком и критическом уровне заряда батареи;

– предупреждение о срабатывании радаров предотвращения столкновений (с прекращением полета и зависанием дрона на месте);

– предупреждение об изменении режима полета;

– предупреждение об остатке рабочего раствора / минеральных удобрений в баке (при выработке бака – зависание или возврат на точку взлета);

– предупреждение о возврате на точку взлета или посадке.

Кроме того, на пульте имеется 5 светодиодов, которые могут отображать предупреждающие сигналы о состоянии пульта и агродрона.

Системы наземного вспомогательного оборудования. Транспортировка агродрона Z30 осуществляется в сложенном состоянии на грузовом микроавтобусе. При транспортировке БПЛА должен быть зафиксирован ремнем, продетым через монтажные кронштейны рамы, лопасти пропеллеров должны быть сложены и зафиксированы специальными креплениями.

Запрещается транспортировка БПЛА с заполненной емкостью для пестицидов (в целях безопасности и исключения повреждения других устройств).

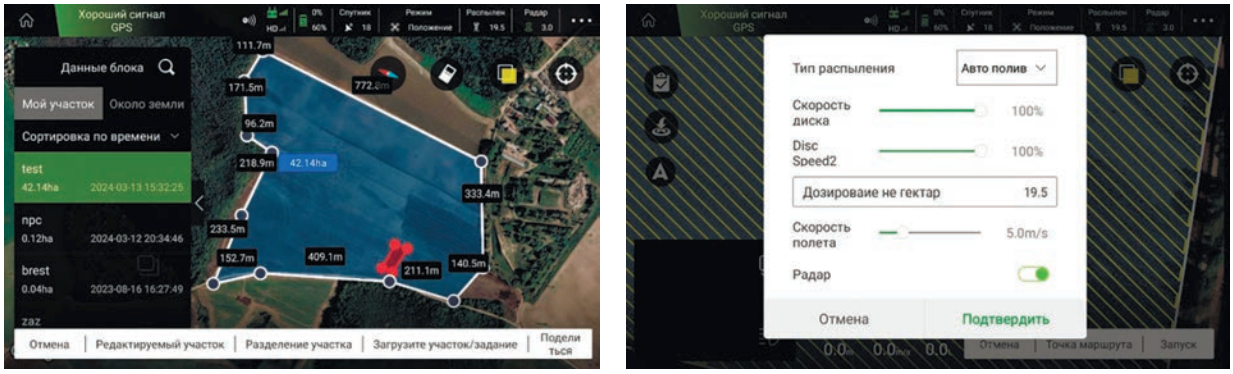
Запрещается транспортировка БПЛА с установленным в нем аккумулятором.

Для зарядки аккумуляторов БПЛА используется двухканальное зарядное устройство ZAC60A0-01 компании Shenzhen Zhian New Energy Technology Co., Ltd., рекомендованное изготовителем БПЛА. Устройство обеспечивает возможность быстрой зарядки аккумулятора в течение 10–12 мин, имеет защиту от перенапряжения, перегрузки по току, короткого замыкания, имеет поддержку связи с батареей интеллектуального режима зарядки и обновления по USB.

В качестве источника энергии используется бензиновый генератор с розеткой 32 А мощностью не менее 7 кВт.

Для контроля метеоусловий, в частности, для измерения скорости ветра, используется портативный ультразвуковой анемометр, установленный на штативе на высоте порядка 3 м.

Настройка параметров химической обработки. Проведение химических обработок с применением агродронов предполагает выполнение комплекса подготовительных процедур для обес-



а *б*

Рисунок 4 – Определение параметров полета: *а* – определение границ участка и препятствий; *б* – определение параметров внесения рабочего раствора

печения безопасности полетов. Их последовательность определена в эксплуатационной документации БПЛА, включая «Оценку эксплуатационных рисков при выполнении полетов гражданского беспилотного летательного аппарата EFT Z30».

После выполнения всех процедур предполетной подготовки осуществляется непосредственное планирование маршрута полета в соответствии со схемой экспериментальных исследований. Для агродрона Z30 определение плана полета и параметров химических обработок выполняется в приложении «Агро Помощник» (непосредственно с пульта управления). В данном приложении устанавливаются границы участка, ширина захвата, высота и скорость полета, норма внесения рабочего раствора (рисунок 4).

Помимо проверки работоспособности элементов авионики и навигации БПЛА особое внимание необходимо уделить корректности функционирования системы внесения пестицидов [2]. Для этого непосредственно в поле осуществляется проверка и при необходимости калибровка датчика потока и весового модуля в соответствии с рекомендациями изготовителя БПЛА [3, 4].

При этом важно, чтобы равномерность распыления различными форсунками и общий расход рабочего раствора экспериментально были проверены в ходе контрольных полетов непосредственно перед проведением основного эксперимента.

После настройки и проверки всех систем агродрона осуществляется подготовка рабочего раствора пестицида требуемой концентрации в соответствии с планом эксперимента. Для выполнения исследований по защите кукурузы от стеблевого кукурузного мотылька применяется инсектицид Кораген, КС (хлорантранилипрол, 200 г/л) с нормой расхода 0,2 л/га. Обработка растений от западного кукурузного жука проводится инсектицидом Органза, КС (ацетамиприд, 100 г/л + лямбда-цигалотрин, 100 г/л) с нормой расхода 0,2 л/га.

При подготовке рабочего раствора обязательно соблюдается рекомендуемая норма внесения препарата, т. е. для различных схем внесения могут использоваться растворы различной концентрации. Так, при установке в приложении «Агро Помощник» нормы 15 л/га для обработки 1 гектара используется рабочий раствор, содержащий 14,8 л воды и 0,2 л препарата (концентрация раствора 1,3 %).

Программа экспериментальных исследований. Для определения технологических параметров процесса химической защиты посевов кукурузы от насекомых-вредителей при помощи агродрона с центробежными распределяющими рабочими органами программой экспериментальных исследований предусматривается решить следующие задачи.

1. Исследовать влияние скорости полета, нормы внесения рабочего раствора и скорости вращения атомайзеров форсунок на распределение капель (для двух ярусов растений) при фиксированной ширине опрыскивания и рекомендуемой высоте полета. Исследовать осаждение капель на поверхность почвы (при возможности).

Цель – установить зависимость эффективности осаждения рабочего раствора от технологических параметров БПЛА (для нижнего и верхнего ярусов кукурузы).

2. Выполнить оценку биологической эффективности действия инсектицидов против стеблевого мотылька и западного кукурузного жука при наиболее рациональных технологических параметрах работы агродрона, обеспечивающих наилучшее осаждение рабочего раствора по ярусам растений.

Цель – установить показатели снижения численности насекомых-вредителей (западного кукурузного жука) и уменьшения повреждаемости культурных растений стеблевым мотыльком при обработке кукурузы при помощи БПЛА.

Методика проведения экспериментальных исследований. Цель полетов – химическая обработка кукурузы от насекомых-вредителей. Полеты осуществляются в ручном и/или автоматизированном режиме с целью проведения химической обработки в условиях VLOS в сегрегированном воздушном пространстве над землями сельскохозяйственного назначения (полевые участки).

Полеты гражданского БПЛА выполняются на основании поданной в Центр единой системы организации воздушного движения (ЦЕС ОрВД) и одобренной заявки на использование воздушного пространства Республики Беларусь (ИВП).

Условия проведения экспериментальных исследований. Химическая обработка сельскохозяйственных угодий агродроном проводится при следующих режимах полета и метеоусловиях:

– максимальная рабочая высота полета – до 6 м, максимальная высота возврата на точку взлета – до 20 м;

– максимальная рабочая скорость полета при опрыскивании – до 10 м/с;

– максимальная дальность полета – зона радиусом в 500 м от точки взлета;

– максимальная допустимая скорость ветра – 5 м/с, рабочая температура – от +15 ºС до +40 ºС, погодные ограничения: туман, дождь, шквалистый ветер, мокрый снег, снег с дождем;

– время полета: день, ночь (при работающих светодиодах красного и зеленого цвета).

На качество опрыскивания при помощи агродрона оказывает достаточное влияние возможность сноса препарата, поэтому для контроля этого риска следует руководствоваться практическими рекомендациями: выполнять обработку на высотах не более 3 м над культурой и скорости ниже 8 м/с (в настоящем исследовании оценка сноса не проводится) [5].

Экспериментальные исследования должны проводиться при минимальной вариации температуры воздуха и скорости ветра, чтобы исключить или снизить потенциальные риски, связанные с воздействием указанных факторов на процесс распыления и осаждения капель рабочего раствора.

Измерения метеорологических параметров проводятся при помощи портативной метеостанции Ecowitt WS3901 (рисунок 5).

Для корректного отображения параметров окружающей среды измерительное оборудование должно быть установлено стационарно на расстоянии не менее 20 м от экспериментального участка и на высоте 3 м над землей.



Скорость ветра	от 0 м/с до 40 м/с (точность: <10 м/с, ±0,5 м/с; ≥10 м/с, ±5 %)
Направление ветра	от 0° до 359° (точность: <2 м/с, ±10°; ≥2 м/с, ±7°)
Температура	от –40° до +60° (точность: ±0,3°)
Влажность	от 1 % до 99 % (точность: ±3,5 %)
Освещенность	от 0 до 200 лк (точность: ±15 %)
Уровень УФ	от 1 до 15 (точность: ±2)
Осадки	от 0 мм до 9 999 мм
Давление	от 300 гПа до 1 100 гПа (точность: ±1,5 гПа)

Рисунок 5 – Метеостанция Ecowitt WS3901

Методика исследования технологических параметров агродрона при обработке кукурузы. Оценка влияния технологических параметров агродрона на эффективность распыления осуществляется на отдельных участках длиной не менее 50 м при фиксированной ширине участка 8,4 м (13 рядков кукурузы), высоте полета 2,5 м над культурой и различных комбинациях исследуемых факторов: скорость полета (X_1 – 4 и 8 м/с), скорость атомайзеров (X_2 – 50 и 90 %, соответствует размеру капли 250 и 80 мкм), норма внесения (X_3 – 15 и 35 л/га). В качестве выходного параметра Y принят показатель степени (равномерности) осаждения рабочего раствора на поверхность листьев кукурузы.

Для проведения исследований выбран план полного факторного эксперимента 2^3 с добавлением центральной точки (таблица). Последующая обработка результатов будет проводиться с применением специализированного пакета Statistica для построения и оценки качества регрессионных моделей.

План эксперимента для исследования технологических параметров работы агродрона

Номер опыта	Независимые параметры			Функция отклика
	X_1	X_2	X_3	Y
1	4 м/с	50 %	15 л/га	Y_1
2	4 м/с	50 %	35 л/га	Y_2
3	8 м/с	50 %	15 л/га	Y_3
4	8 м/с	50 %	35 л/га	Y_4
5	4 м/с	90 %	15 л/га	Y_5
6	4 м/с	90 %	35 л/га	Y_6
7	8 м/с	90 %	15 л/га	Y_7
8	8 м/с	90 %	35 л/га	Y_8
9	6 м/с	70 %	25 л/га	Y_9

Такой подход позволит изучить взаимосвязь технологических параметров работы агродрона при опрыскивании высокостебельных культур и их взаимное влияние на эффективность осаждения капель.

Эксперимент будет включать 9 различных комбинаций обработок, характеризующихся различным сочетанием скорости полета, размера капли и нормы внесения при установленной ширине опрыскивания и рекомендуемой высоте полета над культурой. Поскольку задачей данного этапа исследований является оценка эффективности осаждения рабочего раствора, обработка проводится без использования пестицидов.

Характеристики условий проведения исследований записываются на отдельном листе с указанием даты и места проведения исследований, характеристики культуры (сортовые особенности, стадия роста, высота), характеристики участка и метеоусловий (размер участка, рельеф, температура и относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра по отношению к полету БПЛА).

Степень осаждения распыляемого рабочего раствора фиксируется при помощи водочувствительной бумаги (ВЧБ) компании Syngenta размером 76 × 26 мм (рисунок 6). Допускается использование аналога ВЧБ другого производителя при условии ее способности эффективно фиксировать капли размером 50–500 мкм и мгновенно менять цвет при контакте с жидкостью.

Для оценки распределения капель на двух ярусах кукурузы размещается ВЧБ, закрепленная на верхней части листьев при помощи зажимов или степлера. Высота ярусов фиксируется на отметках 0,6–1,0 м (нижний ярус) и 1,3–1,7 м (верхний ярус) (рисунок 7).

При возможности ВЧБ размещается на поверхности почвы в междурядьях (на деревянных или металлических подставках). Это позволит оценить полноту осаждения рабочего раствора на растения, а также экологическую нагрузку на почву (количество инсектицида, не вступившего в контакт с целевым объектом).



а *б*

Рисунок 6 – Пример ВЧБ до и после воздействия рабочего раствора: *а* – ВЧБ до использования; *б* – ВЧБ после использования

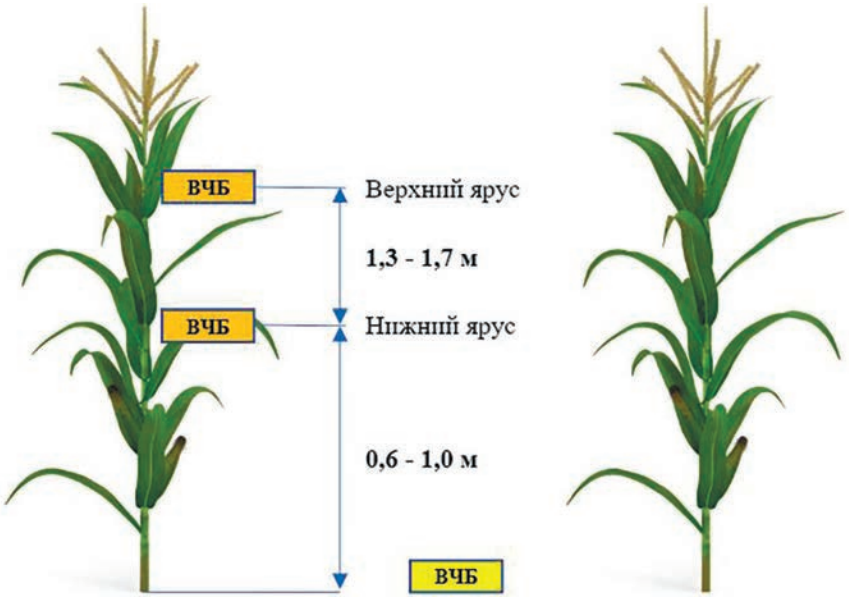


Рисунок 7 – Схема расположения ВЧБ на кукурузе

Визуализация схемы экспериментальных исследований представлена на рисунке 8. Агродрон перемещается над центральным рядком и обрабатывает при фиксированной ширине опрыскивания до 13 рядков кукурузы с междурядьями 70 см. Результаты каждого опыта фиксируются не менее двух раз в целях обеспечения сопоставимости и оценки стабильности выходного параметра.

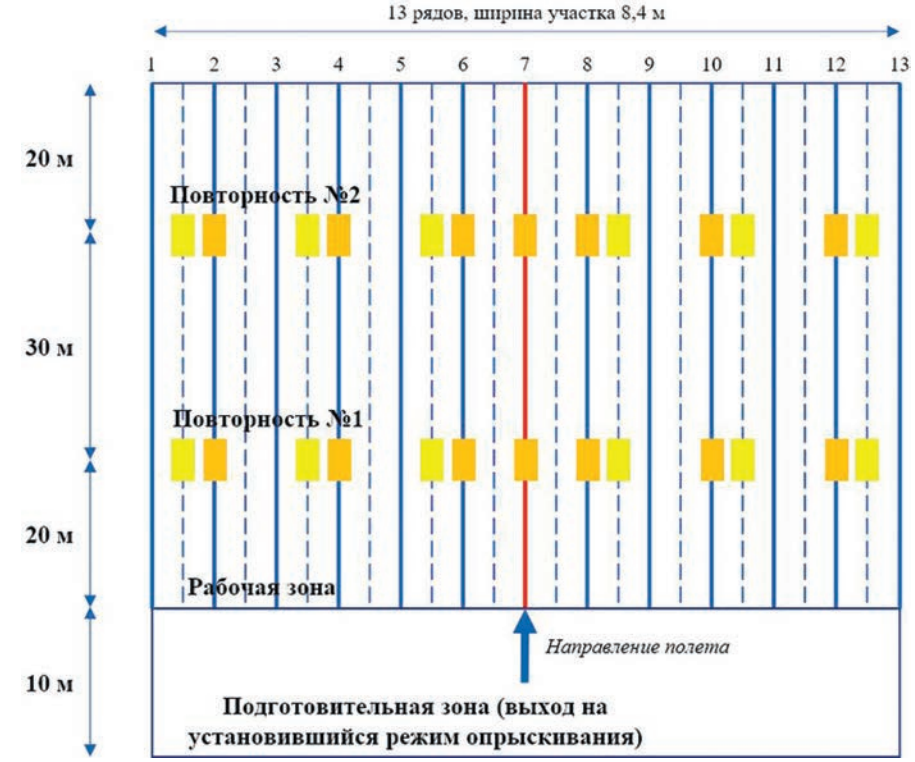
После проведения опыта листы ВЧБ должны быть аккуратно собраны и упакованы в подписанные индивидуальные пакеты с zip-замком (чтобы исключить контакт между отдельными образцами ВЧБ, предотвратить возможное изменение цвета под воздействием влаги и обеспечить качество полученных данных).

Определение рациональных технологических параметров работы агродрона для проведения биологической эффективности действия инсектицидов выполняется путем первичной визуальной оценки ВЧБ и выбора значений X_1–X_3 (номера опыта), обеспечивающих лучшее осаждение рабочего раствора по ярусам растений.

Основная оценка качества распыления проводится в лабораторных условиях путем сканирования и создания цифровых изображений ВЧБ с дальнейшей их обработкой в программном приложении DepositScan (оценка плотности капель, степени покрытия и пр.). Для выполнения основной программы исследований потребуется обработать 252 образца ВЧБ (при дополнительном исследовании осаждения рабочего раствора на поверхность почвы – 360 образцов ВЧБ).

Полученные результаты используются для построения регрессионных моделей эффективности осаждения рабочего раствора в зависимости от технологических параметров БПЛА (по ярусам кукурузы).

Методика оценки биологической эффективности обработки кукурузы от насекомых-вредителей при помощи агродрона. Экспериментальные исследования должны проводиться при



– ВЧБ, размещенная на поверхности почвы в междурядьях (1 ед.)

– ВЧБ, размещенная на листьях по ярусам кукурузы (2 ед. на растении)

Рисунок 8 – Схема экспериментальных исследований

максимальной скорости ветра не более 5 м/с и температуре окружающей среды от +18 °С до +30 °С. Технологические параметры агродрона устанавливаются на основании предварительной оценки качества осаждения рабочего раствора в зависимости от скорости полета, размера капли и нормы внесения.

Экспериментальные исследования по защите кукурузы от стеблевого кукурузного мотылька проводятся на стадии «8–10 листьев – начало выбрасывания метелки» при высоте растений 1,5–1,7 м (II–III декады июля), от западного кукурузного жука – в стадии «цветение – развитие первых зерен» при высоте растений 2,0–3,0 м (I–II декады августа).

Рабочий раствор для проведения исследований по биологической оценке эффективности действия пестицидов готовится непосредственно перед обработкой (емкость заполняется на 2/3 водой, добавляется необходимый объем пестицида и раствор перемешивается, добавляется оставшийся объем воды и готовый раствор снова перемешивается).

Инсектицидная обработка кукурузы проводится после предварительной оценки пороговых значений численности вредителей: стеблевой кукурузный мотылек – 1–2 яйцекладки/100 растений (при возделывании на зерно) и 2–3 яйцекладки/100 растений (при возделывании на зеленую массу); западный кукурузный жук – 20 особей/ловушку за 7 суток.

Имаго западного кукурузного жука концентрируются на рыльцах початков и метелке кукурузы. Эксперименты по определению биологической эффективности обработки кукурузы от насекомых-вредителей осуществляются на отдельных полевых участках методом сплошного опрыскивания при ранее определенных рациональных параметрах эксплуатации агродрона.

Заключение

Эффективность обработки растений против стеблевого кукурузного мотылька определяют непосредственно перед уборкой. Стебли и початки осматривают, срезают на уровне почвы и, при наличии повреждений вредителем, вскрывают их вдоль до основания. Определяется количество

гусениц и рассчитывается степень поврежденности растений в сравнении с базовым вариантом (без проведения химической обработки).

Эффективность обработки против западного кукурузного жука определяется на основании подсчета отловленных имаго вредителя феромонными ловушками. Ловушки располагают в посевах кукурузы за 3–5 суток до обработки на разные рядки по диагонали на высоте 1 м с последующей заменой на новые непосредственно перед обработкой и далее в разные дни учетов (через 1–3 суток, 6–8 суток, 12–16 суток после обработки). Определяется среднесуточная численность на ловушку и рассчитывается снижение численности имаго вредителя в сравнении с исходной численностью.

Список использованных источников

1. Оценка эффективности применения комплекса защиты растений на базе агродрона А60-Х / Ю. Леоновец, А. Кувшинов, А. Жуковский [и др.] // Наука и инновации. – 2023. – № 11. – С. 32–36.

2. Z30/Z50 Routine Maintenance Guide : интернет-видеоплатформа. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=3Fp_xE6zI-4 (date of access: 05.02.2024).

3. How to Calibrate the Flow Meter of Z series. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=4FaV88WB6Y8&t=3s (date of access: 05.02.2024).

4. If the weighing module is not working. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=ld_-DCSS4qI (date of access: 05.02.2024).

5. Equipment for crop protection – Methods for field measurement of spray drift. International standard ISO 22866:2005. – URL: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:22866:ed-1:v1:en (date of access: 05.02.2024).

УДК 631.348.4

Поступила в редакцию 18.07.2025
Received 18.07.2025

А. В. Ленский[1], С. В. Бойко[2], А. А. Жешко[1], М. Г. Немкевич[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: alex_lensky@mail.ru
[2]РУП «Институт защиты растений»
аг. Прилуки, Минский район, Минская обл., Республика Беларусь

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ АГРОДРОНА ПРИ ИНСЕКТИЦИДНЫХ ОБРАБОТКАХ КУКУРУЗЫ

Аннотация. В статье представлены основные результаты экспериментальных исследований по оценке технологических параметров работы агродрона при инсектицидных обработках кукурузы.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, сельское хозяйство, химическая защита растений, насекомые-вредители, параметры эксплуатации агродрона, эксперимент.

A. V. Lenski[1], S. V. Boyko[2], A. A. Zheshka[1], M. G. Nemkevich[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: alex_lensky@mail.ru
[2]RUE "Institute of Plant Protection"
ag. Priluki, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES TO EVALUATE THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE AGRODRON IN THE INSECTICIDAL TREATMENT OF CORN

Abstract. The main results of experimental studies on the evaluation of the technological parameters of the agricultural drone during insecticidal corn treatments are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicle, Agricultural, chemical plant protection, insect pests, agricultural drone operation parameters, experiment.

Введение

В современном сельском хозяйстве применение химических средств защиты растений (СЗР) имеет важное значение для обеспечения роста урожайности сельскохозяйственных культур и качественных показателей производства продукции растениеводства. В то же время использование сельскохозяйственной химии может оказывать негативное воздействие на окружающую среду, особенно при значительных объемах обработок либо нарушении технологии выполнения работ.

Новые возможности применения СЗР открылись с появлением и все более активным использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или агродронов, работающих по технологии ультрамалообъемного опрыскивания. В настоящее время на рынке доступно множество моделей специализированных БПЛА, однако ощущается нехватка научного обеспечения и подтверждения целесообразности использования дронов для химической обработки различных культур.

Исследованиями, которые активно проводятся в Республике Беларусь и за рубежом, установлено, что применение агродронов позволяет повысить эффективность работ более чем в 1,5 раза, сократив при этом использование пестицидов на 20–30 % за счет применения систем автономной маршрутизации и точности выполнения работ (параллельные проходы, соблюдение высоты

распыления, оптимизация перекрытий), а также использование воды в 15–20 раз за счет реализации технологии ультра- или малообъемного опрыскивания.

В рамках данного исследования была выполнена оценка параметров полета при различных режимах обработки кукурузы на стадиях роста «8–10 листьев – начало выбрасывания метелки» и «цветение – развитие первых зерен», а также оценка биологической эффективности химических обработок, когда затруднено или невозможно применение наземной техники, включая самоходные высококлиренсные опрыскиватели.

Основная часть

Оценка численности доминантных насекомых-вредителей кукурузы. Перед выполнением экспериментальных исследований был проведен мониторинг в агроценозах кукурузы в разных агроклиматических зонах. Выявлено активное развитие доминантного вредителя кукурузы – стеблевого кукурузного мотылька (Lepidoptera: Crambidae: *Ostrinia nubilalis* Hbn., СКМ) в центральных и южных регионах республики. Отмечено, что популяция представлена имаго, яйцами и личинками (гусеницами) 1-го возраста. При визуальном учете плотность яйцекладок СКМ в посевах, возделываемых на зерно, составила 1,0–5,0 шт./100 растений (ЭПВ 1,0–2,0 шт./100 растений), на зеленую массу – 1,0–3,0 шт. (ЭПВ 3,0–4,0 шт./100 растений). Яйцекладки размещались преимущественно на нижней стороне листа (6–7 лист) на высоте 0,4–1,2 м (высота растений кукурузы 1,4–2,1 м) (рисунок 1).

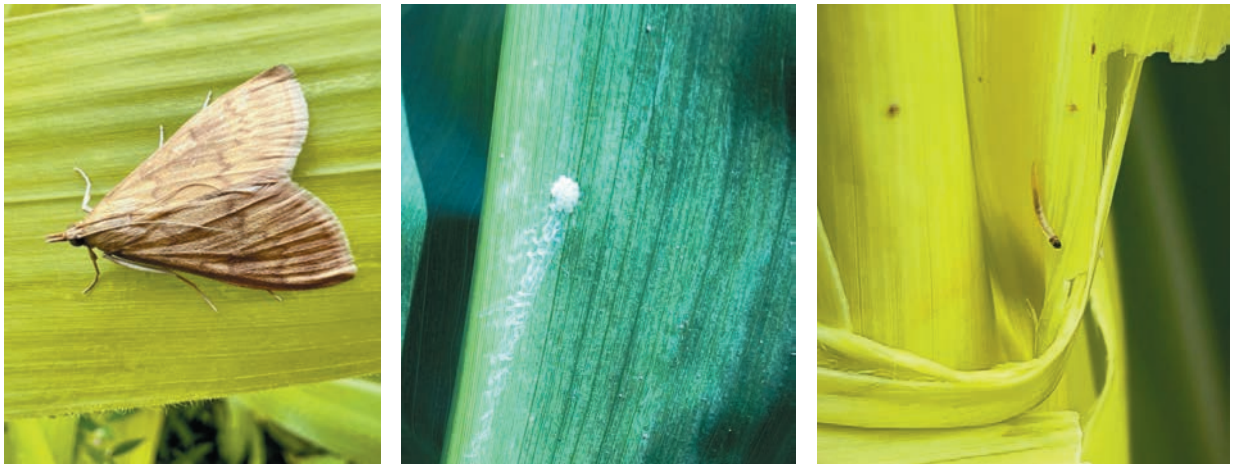
Таким образом установлено, что необходимо контролировать на растениях плотность яйцекладок СКМ независимо от зоны выращивания культуры, гибрида и его ФАО, срока сева, предшественника, стадии развития в каждом конкретном агроценозе.

На основании полученных данных по численности яйцекладок стеблевого мотылька и с учетом погодных условий была проведена закладка производственного опыта по оценке эффективности инсектицидов от СКМ с применением агродрона (Молодечненский район).

Для выявления очагов высокой численности западного кукурузного жука (*Diabrotica virgifera virgifera* Le Conte, ЗКЖ) в посевах кукурузы, возделываемой на зерно и на зеленую массу, сотрудниками лаборатории энтомологии РУП «Институт защиты растений» был выполнен феромониторинг карантинного вредителя.

С этой целью были установлены ловушки типа «PAL» (лист прозрачного пластика (36 × 23 см), одна сторона которого покрыта энтомологическим клеем «Унифлекс») с феромоном «Дивабат» (рисунок 2).

Согласно результатам феромонного мониторинга, проведенного в агроценозах кукурузы, в конце июля и I декаде августа высокая численность имаго кукурузного жука (28,5–471,7 ос./ловушку за 7 суток) выявлена в Брестской области.



а *б* *в*

Рисунок 1 – Популяция стеблевого кукурузного мотылька в посевах кукурузы:
а – имаго, *б* – яйцекладка, *в* – гусеница



а *б*

Рисунок 2 – Расстановка ловушек типа «PAL» в посевах кукурузы: *а* – феромонная ловушка, *б* – мониторинг посевов кукурузы (производственные посевы, Брестская обл.)

Экспериментальные исследования технологических параметров агродрона при обработке кукурузы. Исследование технологических параметров агродрона при химической обработке кукурузы от насекомых-вредителей выполнялось с применением специализированного гражданского БПЛА промышленного производства Z30 компании EFT Electronic Technology (рисунок 3) [1].

В соответствии с разработанной программой и методикой проведения полевых исследований технологических параметров работы БПЛА при защите кукурузы от насекомых-вредителей предполагалось осуществить полный факторный эксперимент 2^3 с добавлением центральной точки [2]. В качестве изменяемых параметров изначально были выбраны скорость полета (4 и 8 м/с), скорость вращения атомайзеров центробежных форсунок (50 и 100 %), норма внесения рабочего раствора (15 и 35 л/га). В процессе предварительных полевых испытаний и визуальной оценки качества осаждения план эксперимента был скорректирован.

1. Скорость полета свыше 8 м/с представляется избыточной, поскольку при работе на высоких скоростях наблюдается явление турбулентности и хаотичного распределения рабочего раствора (рисунок 4, *а*).



Рисунок 3 – Общий вид агродрона EFT Z30

2. Максимальная скорость вращения атомайзеров уменьшена до 50 %, минимальная – до 30 % в целях уменьшения сноса и исключения испарения мелкодисперсной капли рабочего раствора при полете агродрона на высотах до 4 м над культурой (рисунок 4, *б*).

3. Норма внесения рабочего раствора составляла 8–20 л/га.

Таким образом, выполняемый эксперимент был основан на предварительной оценке полетных параметров и включал 5 разных комбинаций обработок, характеризующихся различным сочетанием высоты полета, скорости полета, размера капли и нормы внесения при фиксированной ширине опрыскивания. Этап исследования технологических параметров полета агродрона проводился без использования пестицидов.

Степень осаждения распыляемого рабочего раствора фиксировалась при помощи водочувствительной бумаги (ВЧБ) компании Syngenta.

Для оценки распределения капель на двух ярусах кукурузы была размещена ВЧБ, закрепленная на верхней части листьев [3, 4]. Высота ярусов зафиксирована на отметках 0,6 м (нижний ярус) и 1,7 м (верхний ярус).

Агродрон перемещался над центральным рядком и обрабатывал при фиксированной ширине опрыскивания до 11 рядков кукурузы с междурядьями 70 см (рисунок 5).

Результаты каждого опыта фиксировались два раза в целях обеспечения сопоставимости и оценки стабильности выходного параметра (рисунки 6 и 7).

После проведения опыта листы ВЧБ были собраны и упакованы в отдельные пакеты.

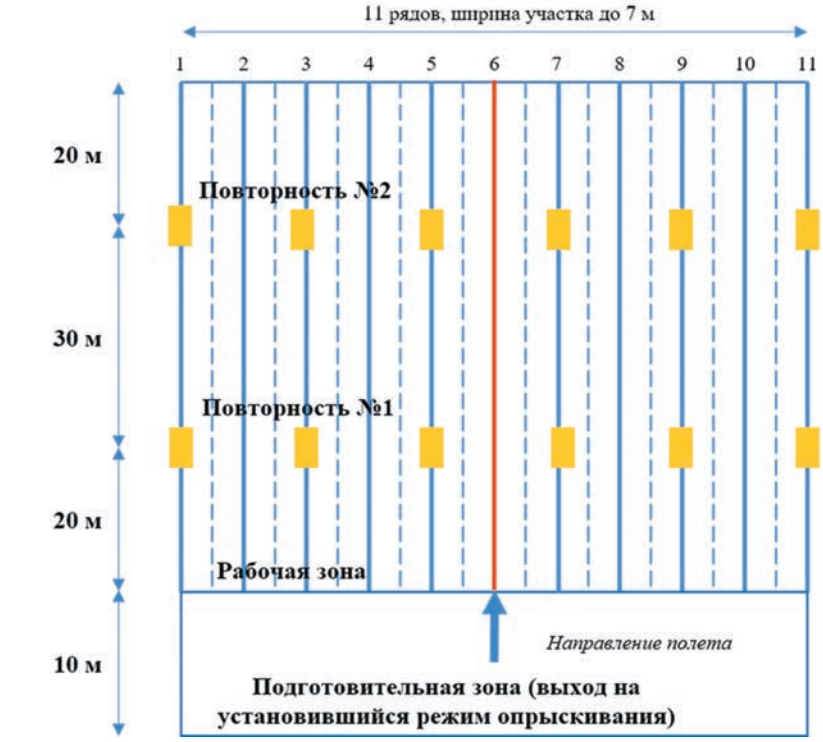
В процессе выполнения эксперимента отдельные листы ВЧБ изменили цвет при повышении относительной влажности окружающей среды (вечернее время), что не повлияло на результат оценки осаждения рабочего раствора.

Характеристики параметров полета и внесения рабочего раствора для оценки распределения капель приведены в таблице 1.



а *б*

Рисунок 4 – Предварительные испытания агродрона с различными параметрами полета при обработке кукурузы в стадии «9–10 листьев»: *а* – завихрения распыляемого раствора при высокой скорости полета; *б* – снос рабочего раствора при мелкодисперсной капле



– ВЧБ, размещенная на листьях по ярусам кукурузы (2 ед. на растении)

Рисунок 5 – Схема экспериментальных исследований

Определение рациональных технологических параметров работы агродрона для проведения биологической эффективности действия инсектицидов была выполнена путем первичной визуальной оценки ВЧБ и выбора соответствующих параметров полета, обеспечивающих хорошее осаждение рабочего раствора по ярусам растений.

На основании предварительной оценки качества осаждения рабочего раствора установлены рациональные параметры обработки: расход рабочего раствора – до 20 л/га (при обработке больших площадей – 8–10 л/га в целях повышения производительности без снижения качества распыления), высота полета – 3,5–4 м над культурой, скорость полета – 6–8 м/с, скорость атомайзеров – 30–70 %.



Рисунок 6 – Размещение ВЧБ на растениях



Рисунок 7 – Пример ВЧБ после воздействия рабочего раствора: *а* – ВЧБ на верхнем ярусе растения; *б* – ВЧБ на нижнем ярусе растения

Таблица 1 – **Характеристики параметров полета и внесения рабочего раствора**

Параметры полета	Номер эксперимента				
	1	2	3	4	5
Скорость полета, м/с	6,0	8,0	6,0	6,0	7,0
Высота полета над культурой, м	3,0	3,5	3,5	4,0	3,5
Ширина внесения рабочего раствора, м	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Норма внесения рабочего раствора, л/га	10	10	8	10	9
Скорость атомайзеров форсунок, % от максимума	50	40	30	30	40

Основная оценка качества распыления проводится в лабораторных условиях путем сканирования и создания цифровых изображений ВЧБ с дальнейшей их обработкой в специализированном программном приложении, например, DepositScan (оценка плотности капель, степени покрытия и пр.) [5].

Экспериментальные исследования инсектицидных обработок кукурузы при помощи агродрона. Цель полетов – химическая обработка кукурузы от насекомых-вредителей. Полеты осуществляются в автоматизированном режиме в условиях VLOS в сегрегированном воздушном пространстве над землями сельскохозяйственного назначения (полевые участки).

Полеты гражданского БПЛА выполняются на основании поданной в Центр единой системы организации воздушного движения (ЦЕС ОрВД) и одобренной заявки на использование воздушного пространства Республики Беларусь (ИВП).

Экспериментальные исследования по защите кукурузы от стеблевого кукурузного мотылька были проведены в стадии «9–10 листьев» при высоте растений до 1,8 м (III декада июля) в ОАО «Городилово» Молодечненского района (рисунки 8, 9).

Эксперимент был заложен на двух участках с применением инсектицидных препаратов от различных производителей (таблица 2) [6].

Рабочий раствор для проведения исследований по биологической оценке эффективности действия пестицидов готовился непосредственно перед обработкой в объеме, необходимом для опыта.

Примечание. Дополнительно осуществлялся выборочный контроль качества опрыскивания с применением ВЧБ, расположенной по ярусам растений.

Эффективность обработки против стеблевого кукурузного мотылька определяется непосредственно перед уборкой путем подсчета количества гусениц и расчета степени поврежденности растений в сравнении с базовым вариантом (без проведения химической обработки).



Рисунок 8 – Обработка инсектицидом «Кораген»



Рисунок 9 – Обработка инсектицидом «Рино А»

Таблица 2 – **Характеристики эксперимента по биологической эффективности действия пестицидов**

Параметры полета	Номер эксперимента	
	1	2
Скорость полета, м/с	6,0	6,0
Высота полета над культурой, м	3,5	3,0
Ширина внесения рабочего раствора, м	8,0	8,0
Норма внесения рабочего раствора, л/га	20,0	20,0
Скорость атомайзеров форсунок, % от максимума	50	50

Дополнительные полевые испытания работы агродрона с центробежными распылителями по оценке качества осаждения рабочего раствора были проведены в стадии «цветение – развитие первых зерен» при высоте растений свыше 2,7 м (I декада августа) в ОАО «Остромечево» Брестского района (рисунки 10 и 11).

Также были заложены опыты по защите кукурузы от доминантных насекомых-вредителей (выполнены тестовые обработки) с использованием инсектицидов системного действия «Эфория» и «Органза» (рисунок 12, *а*). Общая площадь обработок составила 24 га (рисунок 12, *б*).



Рисунок 10 – Проведение дополнительных испытаний работы агродрона



а *б*

Рисунок 11 – Оценка осаждения рабочего раствора: *а* – оценка распыления сотрудниками РУП «Институт защиты растений»; *б* – осаждение раствора на высоте 1,6 м



а *б*

Рисунок 12 – Объем тестовых обработок и применяемые СЗР: *а* – применяемые инсектициды; *б* – карта опытных полей

Опыты проводились в соответствии с разработанной программой и методикой эксперимента на кукурузе высотой свыше 2,7 м. Режим обработки был установлен на основании полученных ранее результатов оценки технологических параметров БПЛА при опрыскивании высокостебельных культур (высота полета – 3,6 м над культурой, скорость полета – 6,5 м/с, норма внесения рабочего раствора – 10 л/га, размер капли – 260 мкм).

Обработки проводились как в дневное, так и вечернее время (в целях снижения испарения капель рабочего раствора) при отсутствии ветра, нормальной влажности и температуре окружающей среды 18–20 °С (рисунок 13). Контроль параметров окружающей среды осуществлялся при помощи стационарной ультразвуковой метеостанции.



Рисунок 13 – Выполнение тестовых полетов

Заключение

Проведенные исследования по оценке влияния технологических параметров работы агродрона на качество инсектицидных обработок кукурузы от насекомых-вредителей позволили сделать следующие выводы.

Выполнен мониторинг наличия доминантных насекомых-вредителей в агроценозах кукурузы в разных агроклиматических зонах. В условиях вегетационного периода необходимо контролировать на растениях плотность яйцекладок СКМ независимо от зоны выращивания культуры, гибрида, срока сева, предшественника, стадии развития в каждом конкретном агроценозе. Для выявления очагов высокой численности западного кукурузного жука выполнен феромониторинг карантинного вредителя. В конце июля и I декаде августа высокая численность имаго кукурузного жука (28,5–471,7 ос./ловушку за 7 суток) выявлена в Брестской области.

Установлены рациональные параметры обработки кукурузы при помощи агродрона с центробежными форсунками: расход рабочего раствора – до 20 л/га (при обработке больших площадей – 8–10 л/га в целях повышения производительности без снижения качества распыления), высота полета – 3,5–4 м над культурой, скорость полета – 6–8 м/с, скорость атомайзеров – 30–70 %.

Выполнены тестовые обработки экспериментальных полевых участков кукурузы против доминантных насекомых-вредителей в стадиях роста культуры «9–10 листьев» и «цветение – развитие первых зерен» при высоте растений до 1,8 м и свыше 2,7 м соответственно. Обработки проводились в ОАО «Городилово» Молодечненского района и ОАО «Остромечево» Брестского района. Эксперименты были заложены на участках общей площадью 25 га с применением инсектицидных препаратов от разных производителей.

Список использованных источников

1. EFT : офиц. сайт компании. – URL: http://www.effort-tech.com/en/home (дата обращения: 16.07.2024).

2. Программа и методика проведения полевых исследований технологических параметров работы БПЛА при защите кукурузы от насекомых-вредителей : отчет о НИР / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ; рук. А. В. Ленский ; исполн.: А. А. Жешко [и др.] – Мн., 2024. – 25 с. – № ГР 20240301.

3. Оценка чувствительной бумаги : офиц. сайт компании Sprayers101. – URL: https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt1/ (дата обращения: 16.07.2024).

4. Изучение применения дронов-распылителей на соевых бобах : офиц. сайт компании Sprayers101. – URL: https://sprayers101.com/drone-soybean/ (дата обращения: 16.07.2024).

5. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution / Heping Zhu [et al.] // Computers and Electronics in Agricultural. – 2011. – № 76. – P. 38–43. – URL: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/50820500/Publications/Zhu_2010_DepositScan.pdf (date of access: 16.07.2024).

6. Контролируем стеблевого кукурузного мотылька в посевах кукурузы : эл. ресурс. – Мн., 2018–2025. – URL: https://pesticidy.by/operativnaya-informatsiya/kontroliruem-steblevogo-kukuruznogo-motylka-v-posevah-kukuruzy/ (дата обращения: 16.07.2024).

УДК 631.363.2

Поступила в редакцию 12.08.2025
Received 12.08.2025

Э. В. Дыба, Л. И. Трофимович, А. М. Хартанович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: Khartanovich7759@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДБОРА И ЗАГРУЗКИ РУЛОНОВ НА ТРАНСПОРТНУЮ ПЛАТФОРМУ

Аннотация. Статья посвящена обзору отечественных машин для подбора, загрузки и транспортировки рулонов спрессованных кормов с полей.

Ключевые слова: грубый корм, транспорт, спрессованный корм, погрузочно-разгрузочные работы, транспортировка спрессованного корма.

E. V. Dyba, L. I. Trofimovich, A. M. Khartanovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: Khartanovich7759@gmail.com

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF SELECTION AND LOADING ROLLS ONTO THE TRANSPORT PLATFORM

Abstract. The article is dedicated to reviewing domestic machines for selecting, loading, and transporting bales of compressed feed from the fields.

Keywords: rough feed, transportation, pellet feed, loading and unloading operations, transportation of pellet feed.

Введение

Развитие животноводства неразрывно связано с созданием прочной кормовой базы, увеличением производства высококачественных грубых кормов и повышением уровня их сохранности.

Заготовка грубых кормов является важной составляющей агропромышленного комплекса и играет ключевую роль в обеспечении стабильного и эффективного кормления сельскохозяйственных животных.

Грубые корма, такие как сенаж, силос, сено и солома, являются основным источником энергии и питательных веществ для скота в зимний период и в условиях ограниченного пастбищного сезона. Правильная заготовка и хранение грубых кормов позволяют сохранить их питательную ценность, предотвратить порчу и обеспечить животных качественным кормом в течение всего года.

Основная часть

Технологии заготовки кормов определяются, прежде всего, их видом. В валовом производстве кормов около 60 % занимают объемистые, более 30 % – концентрированные. Основу рациона КРС составляют комбикорма и силос. Однако для полноценного функционирования пищеварительной системы животных требуется в их рацион вводить грубые корма, к которым относятся сено, сенаж и солома различных сельскохозяйственных культур.

Технология заготовки травяных кормов (сенаж, сено, солома) прессованием в крупногабаритные тюки или рулоны позволяет механизировать все технологические операции, снизить потери кормов при их заготовке, а также повысить сохранность заготавливаемых.

При этом перспективной технологией, позволяющей осуществить комплексную механизацию заготовки кормов в условиях Республики Беларусь, является уборка их рулонными пресс-подборщиками.



Рисунок 1 – Технологическая схема уборки спрессованных кормов

Эффективная заготовка кормов по удельным затратам ресурсов может быть организована только при правильном наборе технологических операций и технических средств. Технологические схемы уборки спрессованных кормов с полей, применяемые в настоящее время в сельском хозяйстве, основаны на применении универсальных фронтальных погрузчиков и транспортных средств (прицепов, полуприцепов и т. п.) (рисунок 1).

Роль транспорта в сельскохозяйственном производстве трудно переоценить. Он является связующим звеном в единой технологической цепи агропромышленного производства. Обеспечивая материальные потоки разнообразной сельскохозяйственной продукции на всех стадиях и этапах ее производства, транспорт выступает как интегратор производственной деятельности сельскохозяйственных, перерабатывающих и обслуживающих предприятий.

Производство продукции растениеводства и животноводства связано с выполнением большого объема транспортных работ, уровень эффективности которых зависти от расстояния и скорости перевозок, типа и грузоподъемности подвижного состава, времени, затрачиваемого на погрузочно-разгрузочные работы, применяемых технологий, а также организации перевозок.

На перевозку кормов в агропромышленном комплексе приходится 35 % всех грузоперевозок, соответственно, и на выполнение погрузочно-разгрузочных работ в зависимости от зональных особенностей и производственной специализации отдельных сельхозтоваропроизводителей структура грузоперевозок может различаться.

В Республике Беларусь осуществляется выпуск отечественных погрузчиков-транспортировщиков рулонов типа ТП-10 (ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш», рисунок 2) и ПТР-12С (ОАО «Вороновская сельхозтехника», рисунок 3), которые без участия погрузчиков самостоятельно осуществляют погрузку и укладку рулонов на платформу, а также выгрузку на месте складирования.

Данный транспорт используется в хозяйствах Беларуси для перевозки соломы и сена. Перевозка сенажа и кормов, запрессованных в полимерную пленку, невозможна из-за несовершенства конструкции захватного устройства и самой платформы.



Рисунок 2 – погрузчик-транспортировщик рулонов типа ТП-10



Рисунок 3 – погрузчик-транспортировщик рулонов ПТР-12С

За последние 10 лет в Беларуси успешно зарекомендовала себя технология заготовки травяных кормов различной влажности в рулонах, упакованных в пленку. Она прошла широкую хозяйственную проверку, в результате которой подтверждена несомненная эффективность данной технологии. А именно:

– меньшая зависимость от погодных условий позволяет сократить сроки заготовки кормов;

– комплексная механизация заготовки кормов наряду со значительным снижением общих трудозатрат (25–30 %) исключает ручной труд, экономит энергозатраты;

– исключены потери кормов при их заготовке и скармливании;

– обеспечивается высокое качество кормов.

Однако нерешенным остается вопрос погрузки, перевозки, скирдования рулонов сенажа, упакованных в полимерную пленку. Из-за несовершенства конструкций погрузочных устройств, а также транспортных платформ происходит повреждение упаковки рулона (рисунок 4), которое в дальнейшем приводит к снижению качества кормов.

В РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» разработана самозагружающаяся платформа с манипулятором ПМК-10 (рисунок 5), которая выпускается предприятием ООО «Биоком Технология». Данная машина, в отличие от вышеописанного комплекса машин, обеспечивает подбор, транспортировку и скирдование тюков или рулонов, в том числе упакованных в полимерную пленку. В зимнее время выполняет разбор скирд и доставку спрессованных кормов к месту назначения.

Однако вышеперечисленные операции (подбор, погрузка, скирдование) осуществляются в ручном режиме, требующем частых остановок и манипуляций со стороны механизатора, что определенно влияет на производительность.

Одним из решений существующей проблемы является использование специализированных сборочно-транспортных средств с автоматизированным подбором и загрузкой спрессованных



Рисунок 4 – Повреждение упаковочного материала рулона сенажа грузозахватными устройствами при погрузке и выгрузке



Рисунок 5 – Самозагружающаяся платформа с манипулятором ПМК-10



Рисунок 6 – Зарубежные специализированные сборочно-транспортные средства
с автоматизированным подбором и загрузкой спрессованных кормов

кормов (рисунок 6), получивших широкое распространение за рубежом, но недостаточно адаптированных для условий Республики Беларусь. Применение данных средств механизации позволяет повысить производительность и снизить затраты на ТСМ, сократить холостые пробеги по полю и исключить непроизводительные переезды, а также обеспечить наиболее полное использование грузоподъемности транспортных средств.

Заключение

Вышеизложенный материал подтверждает необходимость разработки эффективных технологий уборки спрессованных травяных кормов, создания новых погрузочно-транспортных средств и определения их оптимальных параметров, позволяющих минимизировать материало- и энергоемкость процесса подбора и погрузки спрессованных кормов на транспортную платформу, что является актуальной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Список использованных источников

1. Техническое обеспечение кормоуборочных работ. Состояние и перспективы / И. М. Лабоцкий, П. В. Яровенко, Н. А. Горбацевич, И. М. Ковалева // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» в 2 т. – Мн., 2013. – Вып. 46. − Т. 2. – С. 3−10.

2. Ахламов, Ю. Л. Заготовка корма в рулонах / Ю. Л. Ахламов, А. В. Шевцов // Кормопроизводство. – 2001. – № 6. – С. 28–29.

3. Измайлов, А. Ю. Технологии и технические решения по повышению эффективности транспортных систем АПК / А. Ю. Измайлов // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГНУ «Российский НИИ информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса». – М. : Росинформагротех, 2007.

4. Средства механизации для уборки стебельчатых кормов, запрессованных в тюки или рулоны / Л. И. Трофимович // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Минск, 18–20 октября 2017 г. – Мн. : Бел. навука, 2017. – С. 59–68.

5. Технологии и комплекс машин для уборки соломы / А. Ш. Джамбуршин [и др.] // Комплексная механизация производственных процессов в с.-х. : сб. науч. тр. – Алма-Ата : Кайнар, 1983. – 114 с.

6. Никитин, В. А. Совершенствование процесса погрузки рулонов грубых кормов с оптимизацией параметров рабочего органа : дис. … канд. техн. наук / Никитин Владимир Алексеевич ; СГАУ имени Н. И. Вывилова. – Саратов, 2000. – 133 л.

7. Особов, В. И. Сеноуборочные машины и комплексы / В. И. Особов, Г. К. Васильев. – М. : Машиностроение, 1983. – 304 с.

8. Иванова, О. В. Совершенствование грузозахватного устройства и технологического процесса погрузки при заготовке рулонов прессованных кормов : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Иванова Ольга Владимировна ; СГАУ имени Н. И. Вавилова. – Саратов, 2004. – 184 л.

УДК 631.363.2

Поступила в редакцию 10.01.2026
Received 10.01.2026

Э. В. Дыба, П. В. Яровенко, А. М. Хартанович

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНЯТИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАПРЕССОВАННЫХ КОРМОВ

Аннотация. В статье представлено описание макетного образца устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов, а также анализ результатов экспериментальных исследований макетного образца.

Ключевые слова: рулон, резчик, устройство, упаковка, резание, снятие, хранение, параметры, качество кормов, полимерные материалы, солома, сенаж, сетка.

E. V. Dyba, P. V. Yarovenko, A. M. Khartanovich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

ANALYSIS OF RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF MOCK-UP SAMPLE OF DEVICE FOR REMOVAL OF POLYMER MATERIALS FROM PRESSED FODDERS

Abstract. The article presents a description of the prototype of the device for removing polymer materials from pressed feed, as well as an analysis of the results of experimental studies of the prototype.

Keywords: roll, cutter, device, packing, cutting, removal, storage, parameters, feed quality, polymer materials, straw, haylage, net.

Введение

Почвенно-климатические условия Республики Беларусь с достаточным количеством света, тепла и осадков способствуют формированию устойчивых урожаев укосных и пастбищных травостоев, а наличие площадей, отведенных под сенокосы и пастбища, определяют основное направление сельскохозяйственного производства – животноводство. Состояние животноводства определяет развитие кормопроизводства, в первую очередь луговое, так как основным компонентом рационов жвачных животных являются объемистые (грубые и сочные) корма: силос, сенаж и сено.

Консервированные грубые и сочные корма составляют более половины рационов мясного и молочного крупного рогатого скота. Количественные и качественные характеристики заготовленных кормов в значительной мере определяют объемы и себестоимость животноводческой продукции, ее конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках.

Основным требованием, предъявляемым к технологиям заготовки кормов, является обеспечение минимальных потерь питательных веществ. При существующей технологии заготовки и хранения кормов из трав и силосных культур потери питательных веществ достигают 35–40 %. Недобор последних происходит не только из-за несоблюдения оптимальных сроков уборки трав, но и вследствие значительных потерь в процессе хранения кормов. В хозяйствах республики ежегодно заготавливается более 25 млн т кормов в виде сенажа, силоса из провяленных трав и силосных культур. Массовое распространение получил сенаж. Качественный корм этого вида приготавливают при строгом соблюдении технологии его заготовки: провяливании до влаж-

ности 50–55 %, уплотнении до плотности не менее 600 кг/м^3, экспозиции загрузки хранилища не более 2–3 дней и герметизации корма [1–10].

Анализ материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной научно-технической литературе, показывает, что создание конкурентоспособной, высокопроизводительной и надежной техники, которая обеспечивает высококачественное выполнение технологических операций, позволяет снизить расход топлива и других ресурсов на единицу производимой продукции и сократить все виды потерь, является одним из приоритетных направлений аграрной науки. Поэтому обоснование перспективных ресурсосберегающих механизированных технологий и прогнозирование рациональных параметров машин и агрегатов – непременные предпосылки успешного создания, производства и использования новой техники. Решение всех этих проблем позволит увеличить производство сельскохозяйственной продукции и значительно снизить ее себестоимость.

Основная часть

На основании проведенного обзора и анализа устройств для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов, а также теоретических исследований лабораторией механизации заготовки кормов РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» была разработана конструкторская документация УСП 00.00.000, согласно которой был изготовлен макетный образец устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов (рисунок 1).

Макетный образец устройства для снятия полимерных материалов представляет собой резчик рулонов сенажа, оснащенный двойным крючковым захватом полимерной упаковки. Макетный образец предназначен для снятия полимерной упаковки с запрессованных кормов в процессе загрузки кормов на территориях кормовых дворов в кормораздатчики или на кормовой стол. Макетный образец устройства УСП 00.00.000 агрегатируется с широко распространенными в хозяйствах Республики Беларусь погрузчиками АМКОДОР 332С, АМКОДОР 342С или АМКОДОР 352С (рисунок 2).



Рисунок 1 – Макетный образец устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов



Рисунок 2 – Макетный образец в агрегате с погрузчиком АМКОДОР 332С



Рисунок 3 – Вид на захват крючковый УСП 03.00.000 и резак УСП 02.00.000

Для проведения экспериментальных исследований макетный образец устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов был оснащен захватом крючковым – УСП 03.00.000 и резаком УСП 02.00.000 с комплектом съемных режущих ножей 342С.45.45.000 отделителей силоса АМКОДОР А342С.45.45.000 (рисунок 3).

В исходной позиции нож резака находится в нижнем положении, захват упаковки открыт. При подаче масла в линию подъема оно начинает поступать к гидроцилиндрам ГЦ 1 и ГЦ 2 подъема резака и через концевой клапан КП 3 к клапану последовательности КП 1, отрегулированному на давление резания рулона, например, 10,0 МПа. Сначала резак прижимает рулон к корпусу устройства и захвату упаковки, затем при достижении давления резания сработает клапан последовательности КП 1 и захват зажмет полимерную упаковку. Захват полимерной упаковки будет теперь закрыт при любом положении резака, кроме крайнего нижнего. В крайнем нижнем положении резака захват откроется при нажатии резаком концевого клапана КП 3 и произойдет слив масла из поршневой полости гидроцилиндра захвата полимерной упаковки в гидросистему погрузчика.

Привод захвата УСП 03.00.000 выполнен гидроцилиндром КГЦ 857.50-25-160 с диаметром цилиндра 50 мм и ходом 160 мм, подключенным параллельно силовым гидроцилиндрам

привода резака. В качестве гидроцилиндров привода резака применялись гидроцилиндры СГЦ 100.50.400.730.11 с диаметром цилиндра 100 мм.

Захват крючковый УСП 03.00.000 имеет рабочую ширину захвата полимерной упаковки 1500 мм и оснащен десятью крючками УСП 03.00.002, расположенными в два ряда по пять штук. Крючки одного из рядов вращаются по часовой стрелке, а другого против часовой стрелки.

Результаты исследований

Разработанное устройство для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов в виде двойных крючковых захватов позволяет исключить потребность во вспомогательном рабочем на погрузочных работах рулонов сенажа в кормораздатчик и повысить производительность труда на операции. Целью экспериментальных исследований является изучение влияния основных конструктивных, кинематических и силовых параметров нового рабочего органа и изучение возможных потерь травяных кормов со снимаемой упаковкой.

Программа экспериментальных исследований предусматривает:

– установить влияние формы крючкового захвата и глубины его внедрения на полноту захвата снимаемых полимерных материалов;

– установить влияние формы крючкового захвата и глубины его внедрения на потери травяных кормов со снимаемой упаковкой;

– установить минимальную толщину крючков для внедрения в корма различной плотности прессования и необходимые параметры силовых гидроцилиндров привода устройства.

Для исследования глубины внедрения зубьев крючкового захвата на качество работы устройства захват полимерной упаковки УСП 03.00.000 был оснащен сменными ограничителями УСП 03.00.009, УСП 03.00.011, УСП 03.00.012, которые закреплялись винтами на корпусе УСП 03.01.001 и позволяли изменять глубину внедрения зубьев захвата в рулон соответственно: 20; 25; 30 или 35 мм при демонтаже сменных ограничителей.

Экспериментальные исследования процесса снятия полимерной упаковки с запрессованных кормов проводились в производственных условиях на базе предприятия ГП «Экспериментальная база «Зазерье» на рулонах соломы, обмотанных сеткой, и длинностебельной неизмельченной сенажной массы диаметром 1200–1500 мм и длиной 1200 мм с плотностью прессования для соломы: 69–75 кг/м^3, сенажа – 146–240 кг/м^3. В процессе испытаний рулоны взвешивались, обмерялись и маркировались (рисунок 4).



Рисунок 4 – Процесс взвешивания рулонов

В заготовленных рулонах длинностебельной сенажной массы плотность прессования не превышала 240 кг/м^3. Результаты замеров и показатели работы макетного образца приведены в таблице.

Результаты замеров и показатели работы макетного образца

Наименование показателя	При механизированном снятии упаковки							
	Глубина внедрения зубьев захвата полимерной упаковки, мм							
	20		25		30		35	
	Диаметр рулона, мм							
	1 200	1 500	1 200	1 500	1 200	1 500	1 200	1 500
Рулон соломы без измельчения и упаковкой в сетку								
Исходные показатели качества запрессованных кормов								
масса рулона, кг	–	158	–	147	–	152	–	150
влажность, %	–	22	–	21	–	21	–	21
плотность, кг/м^3	–	74,5	–	69,3	–	71,7	–	70,8
давление резания рулона, МПа	–	26,0	–	26,0	–	26,0	–	26,0
давление внедрения зубьев захвата, МПа	–	13,0	–	13,0	–	13,0	–	13,0
время снятия упаковки, с	–	22	–	24	–	23	–	21
потери травяных кормов со снимаемой упаковкой, кг	–	0,8	–	0,75	–	1,2	–	0,9
Рулон сенажа без измельчения с упаковкой в сетку и стрейч-пленку								
масса рулона, кг	–	500	–	505	–	508	–	495
влажность, %	–	53	–	55	–	56	–	56
плотность, кг/м^3	–	235,8	–	238,2	–	240,0	–	233,5
давление резания рулона, МПа	–	26,0	–	26,0	–	26,0	–	26,0
давление внедрения зубьев захвата, МПа	–	16,0	–	16,0	–	16,0	–	16,0
время снятия упаковки, с	–	25	–	24	–	22	–	23
потери травяных кормов со снимаемой упаковкой, кг	–	1,2	–	1,5	–	1,9	–	1,4
Рулон сенажа без измельчения с упаковкой шпагатом и в стрейч-пленку								
масса рулона, кг	305	–	290	–	310	–	300	–
влажность, %	58	–	55	–	57	–	58	–
плотность, кг/м^3	153,9	–	146,4	–	156,4	–	151,4	–
давление резания рулона, МПа	26,0	–	26,0	–	26,0	–	26,0	–
давление внедрения зубьев захвата, МПа	16,0	–	15,0	–	15,0	–	15,0	–
время снятия упаковки, с	24	–	23	–	23	–	25	–
потери травяных кормов со снимаемой упаковкой, кг	1,1	–	0,9	–	1,2	–	1,0	–

На макетной установке УСП 00.00.000 на резаке использовался комплект режущих ножей 342С.45.45.000 отделителей силоса АМКОДОР А342С.45.45.000 (рисунок 3). Рулоны сенажа, спрессованные пресс-подборщиками без измельчения прессуемой травяной массы, имеют рыхлую сердцевину и крайне плотный наружный слой. Макетный образец разрезал плотный наружный слой рулонов неизмельченного сенажа на глубину 450–500 мм и процесс резания рыхлой сердцевины приостанавливался, рулон деформировался и приобретал гантелевидную форму (рисунок 5). При этом неизмельченная сенажная масса из надреза полимерной упаковки не высыпалась, а усилие резания ножа, развиваемое двумя гидроцилиндрами макетной установки диаметром 100 мм и четырьмя гидроцилиндрами диаметром 120 мм, составляло не менее 280 000 Н при рабочем давлении в гидросистеме макетной установки 26,0 МПа. Усилие резания, развиваемое макетным образцом УСП 00.00.000, значительно превышало усилие резания ножа, обоснованное В. И. Галковым [11], при разрезании рулонов сенажа диаметром 1,4–1,5 м и длиной 1,2 м на глубину 250–300 мм – 1930–6130 Н. Понятно, что разрезание рулона на глубину более 1 м



Рисунок 5 – Испытание макетного образца – разрезание рулона неизмельченного сенажа



Рисунок 6 – Работа макетного образца с рулонами соломы

потребует значительно больших усилий резания, но основной фактор – резание макетным образцом неизмельченной растительной массы.

Гидросистема макетного образца при работе с рулонами сенажа и соломы функционировала адекватно: крючковый захват начинал внедряться в солому при давлении в гидросистеме 13,0 МПа, а в сенаж – 16 МПа. При сжатии рулона соломы резаком макетного образца (при возрастании давления до 26,0 МПа) происходило разрезание полимерной сетки и неглубокое надрезание нижней стороны рулона на глубину 200–250 мм, сенажа – 450–500 мм. Для уменьшения давления внедрения зубьев крючкового захвата в рулон плотностью выше 240 кг/м^3 целесообразно произвести замену гидроцилиндра привода захвата УСП 03.00.000 с диаметром поршня 50 мм (площадь поршня 19,6 см^2) на гидроцилиндр с площадью поршня не менее 40,0 см^2 (рисунок 6).

Форма крючкового захвата обеспечивает полноту захвата снимаемых полимерных материалов при глубинах внедрения зубьев: 20; 25; 30 и 35 мм. Потери травяных кормов со снимаемой упаковкой не превышают 2 %.

Испытания проводились на макетном образце с толщиной крючков 8 мм. За время экспериментальных исследований отказов макетного образца по причине деформации или поломки крючков выявлено не было. Толщина крючков 8 мм является достаточной, увеличение толщины крючка не требуется.

Заключение

В результате экспериментальных исследований уточнена и проверена достоверность полученных теоретических положений по конструкции макетного образца устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов и произведена оценка функциональных показателей макетного образца устройства по снятию полимерной упаковки с запрессованных кормов:

– разработанный макетный образец устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов выполнял процесс снятия полимерных материалов с рулонов соломы, обмотанных сеткой, и длинностебельной неизмельченной сенажной массы диаметром 1200–1500 мм и длиной 1200 мм с плотностью прессования для соломы 69–75 кг/м^3 и для сенажа – 146–240 кг/м^3;

– гидросистема макетного образца при работе с рулонами сенажа и соломы функционировала адекватно: крючковый захват начинал внедряться в солому при давлении в гидросистеме 13,0 МПа,

а в сенаж – 16 МПа. При сжатии рулона соломы резаком макетного образца (при возрастании давления до 26,0 МПа) происходило разрезание полимерной сетки и неглубокое надрезание нижней стороны рулона на глубину 200–250 мм, сенажа – 450–500 мм. Для уменьшения давления внедрения зубьев крючкового захвата в рулон плотностью выше 240 кг/м^3 целесообразно произвести замену гидроцилиндра привода захвата УСП 03.00.000 с диаметром поршня 50 мм (площадь поршня 19,6 см^2) на гидроцилиндр с площадью поршня не менее 40,0 см^2;

– в соответствии с технологией заготовки сенажа в рулонах, для обеспечения полного разрезания рулонов макетным образцом их плотность должна быть 330–350 кг/м^3, а масса рулонов диаметром 1,45 м должна составлять 700–900 кг;

– форма крючкового захвата обеспечивает полноту захвата снимаемых полимерных материалов при глубине внедрения зубьев 20; 25; 30 и 35 мм. Потери травяных кормов со снимаемой упаковкой не превышают 2 %;

– испытания проводились на макетной установке с толщиной крючков 8 мм. За время экспериментальных исследований отказов макетного образца по причине деформации или поломки крючков выявлено не было. Толщина крючков 8 мм является достаточной, увеличение толщины крючка не требуется.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны технические требования на конструкцию устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов.

Список использованных источников

1. Хохрин, С. Н. Корма и кормление животных : учеб. пособие / С. Н. Хохрин. – СПб. : Лань, 2002. – 512 с.
2. Орлянская, И. А. Повышение эффективности процесса заготовки сенажа в рулонах, упакованных в пленку : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Орлянская Ирина Александровна ; Ставрополь, 2018. – 166 л.
3. Щеглов, В. В. Корма: приготовление, хранение, использование : справочник / В. В. Щеглов, Л. Г. Боярский. – М. : Агропромиздат, 1990. – 255 с.
4. Организация производства и контроля за качеством объемистых кормов: практ. рекомендации / Ш. К. Шакиров, Ф. С. Гибадуллина, М. Ш. Тагиров [и др.]. – Казань : Фолиантъ, 2013. – 53 с.
5. Сенаж. Технология приготовления кормов сенажного типа : сайт – 2011–2026. – URL: https://farmnamberutwo.ru/zh/zh.senazh.html?ysclid=mkql3seans896627698 (дата обращения: 20.09.2025).
6. Тамаровская, В. В. Потери питательных веществ в кормах при различных способах заготовки и хранения : автореф. дис. … канд. с.-х. наук : 06.02.02 / Тамаровская Валентина Викторовна ; Алма-Ат. зооветерин. ин-т. – Алма-Ата, 1989. – 21 с.
7. Бубенщиков, Е. П. Сенаж в упаковке – технология вашего успеха: руководство по технологии / Е. П. Бубенщиков, В. М. Гуляев. – Пермь : Крестьянский дом, 2010. – 60 с.
8. Приготовление сенажа: рекомендации / ГНУ ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса. – М. : ФГУ РЦСК, 2007. – 14 с.
9. Гуляев, В. М. Второе рождение старого корма, или как показал себя на практике «сенаж в упаковке» / В. М. Гуляев // Крестьянские ведомости. – 2001. – № 21–22. – С. 24–27.
10. Кузнецов, М. Ю. Влияние сенажа, приготовленного по новой технологии, на продуктивность дойных коров : автореф. дис. … канд. с.-х. наук : 06.02.02 / Кузнецов Максим Юрьевич. – Саранск, 2005. – 19 с.
11. Гальков, В. Ю. Совершенствование процесса подготовки рулонов сенажа для приготовления кормосмесей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Гальков Виталий Юрьевич ; Мичурин. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2015. – 19 с.

УДК: 631.373-374

Поступила в редакцию 10.01.2026
Received 10.01.2026

Э. В. Дыба[1], А. М. Хартанович[1], А. Н. Пунько[2], Г. И. Кошля[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. В статье представлена конструктивно-технологическая схема с алгоритмом функционирования захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу, а также описан технологический процесс работы подборщика-транспортировщика с автоматизированным захватывающим устройством, представлена методика экспериментальных исследований оптимальных параметров автоматизированного захватывающего устройства.

Ключевые слова: уборка спрессованных кормов, подборщик-транспортировщик, платформа, методика, эксперимент, исследование, устройство, режим, показатель, усилие, коэффициент, упаковка, полимерный материал, транспорт, травяные корма, рулон, захватывающее устройство.

E. V. Dyba[1], A. M. Khartanovich[1], A. N. Punko[2], G. I. Koshlya[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
[2]UE "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL RESEARCH METHODS FOR JUSTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF AUTOMATED GRIPPING DEVICE

Abstract. The article presents a structural and technological scheme with an algorithm of operation of a gripping device for automated selection and loading of compressed feed on a transport platform, as well as describes the technological process of operation of a picker-transporter with an automated gripping device, presents a methodology for experimental studies of optimal parameters of an automated gripping device.

Keywords: harvesting of compressed feed, picker-transporter, platform, technique, experiment, research, device, mode, indicator, effort, coefficient, packaging, polymer material, transport, grass feed, roll, gripping device.

Введение

За последние годы в Республике Беларусь предприняты решительные шаги по внедрению в сельхозпроизводство прогрессивных идей. На это потрачены значительные средства, но результаты порой оказываются гораздо скромнее ожидаемых. Впрочем, в ряде хозяйств, где ставку сделали на инновации, достигнуты высокие показатели продуктивности животных при низких трудовых и энергетических затратах на производство молока. Очевидно, что для обеспечения снижения затрат на производство продукции животноводства необходимо применять эффективные ресурсосберегающие технологии. Наиболее полно соответствует этому требованию технология заготовки травяных кормов (сенаж, сено, солома) прессованием в крупногабаритные тюки или рулоны. Данная технология позволяет механизировать все технологические операции, снизить потери кормов при их заготовке, а также повысить сохранность заготавливаемых кормов. При этом перспективной технологией, позволяющей осуществить комплексную механизацию

заготовки кормов в условиях Республики Беларусь, является уборка их рулонными пресс-подборщиками [1]. Благодаря простоте конструкции и гораздо меньшей стоимости по сравнению с пресс-подборщиками для заготовки кормов в крупногабаритных прямоугольных тюках они занимают доминирующее положение на мировом рынке среди прессовальной техники (до 80 % продаж машин для подбора валков) [2]. Рулонные пресс-подборщики отличаются универсальностью, с их помощью можно заготавливать сено, сенаж, солому и лен. Создание устройства для герметичной упаковки рулонов в полимерную пленку открыло широкие возможности для заготовки в рулонах кормов повышенной влажности [3].

Однако одним из узких мест, сдерживающих темпы и эффективность заготовки травяных кормов, являются транспортные и погрузочно-разгрузочные работы. В общих затратах труда на производство продукции животноводства, транспортирование и погрузочно-разгрузочные работы составляют от 40 до 45 %, а затраты топлива до 50 % [4]. Это объясняется несовершенством средств механизации, предназначенных для работ со сформированными рулонами. Потеря времени на операциях подбора и укладки рулонов в скирду приводят к снижению производительности. Кроме того, увеличивается время уборки кормов с поля, что приводит к увеличению вероятности попадания под дождь и ухудшению качества заготавливаемого корма. Поле не освобождается от спрессованных кормов в требуемые сроки, что задерживает проведение последующих агротехнических мероприятий [5]. Нерешенным остается и вопрос погрузки, перевозки, скирдования рулонов сенажа, упакованных в полимерную пленку. Из-за несовершенства конструкций погрузочных устройств, а также транспортных платформ происходит повреждение упаковки [6].

Поэтому повышение эффективности транспортных и погрузочно-разгрузочных работ является одним из существенных резервов для снижения себестоимости животноводческой продукции и роста рентабельности предприятий агропромышленного комплекса.

Одно из решений существующей проблемы – использование специализированных сборочно-транспортных средств с автоматизированным подбором и загрузкой спрессованных кормов, получивших широкое распространение за рубежом, но недостаточно адаптированных для условий Республики Беларусь. Применение данных средств механизации позволяет повысить производительность и снизить затраты на ТСМ, разгрузить механизатора и дать ему возможность лучше сконцентрироваться на окружающей его обстановке, сократить холостые пробеги по полю и исключить непроизводительные переезды, а также обеспечить наиболее полное использование грузоподъемности транспортных средств [7].

В ходе выполнения научно-исследовательской работы была разработана конструктивно-технологическая схема и алгоритм функционирования захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу, а также обоснованы конструктивные и кинематические параметры автоматизированного захватывающего устройства. По результатам проделанной работы необходимо провести экспериментальные исследования для уточнения и проверки достоверности полученных теоретических положений, а также для определения оптимальных конструктивных и кинематических параметров захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу.

Основная часть

Анализ патентной информации наиболее развитых стран в отношении подборщиков-транспортировщиков спрессованных кормов с автоматизированным захватывающим устройством позволил определить лучшие промышленно-освоенные объекты техники. В результате выполненного обзора было установлено, что фирмами ANDERSON GROUPE (Канада) и SAMCO SYSTEM (Ирландия) были разработаны и реализуются сельхозпроизводителям подборщики-транспортировщики спрессованных кормов с автоматизированным захватывающим устройством, предназначенные для подбора, самопогрузки и транспортировки рулонов сена, соломы и провяленной зеленой массы (в том числе упакованных в полимерную пленку), а также саморазгрузки в месте складирования [8, 9].

На основании проведенного обзора и анализа современных конструкций захватывающих устройств, применяемых для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу, лабораторией механизации заготовки кормов РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» была разработана конструктивно-технологическая схема и алгоритм функционирования захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов.

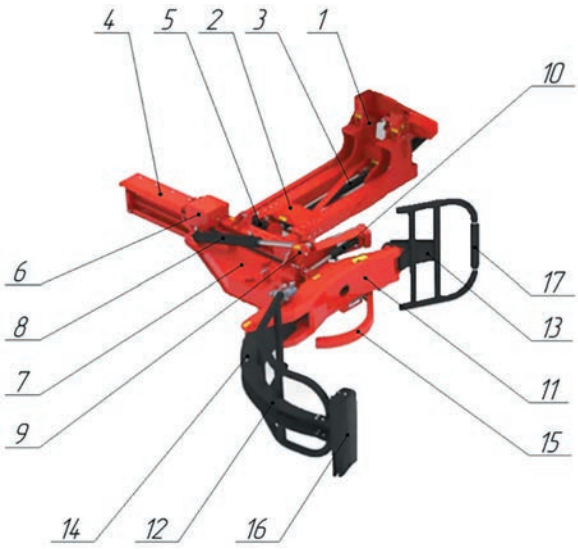


Рисунок 1 – Погрузочно-захватывающее устройство

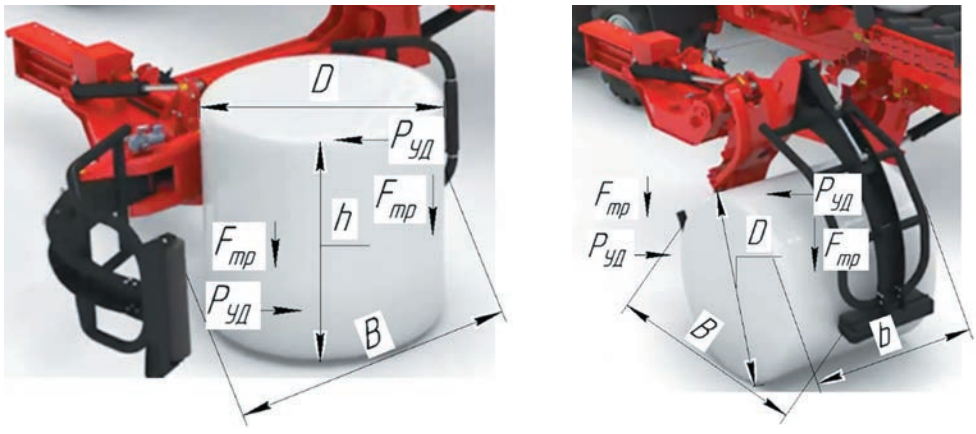
Погрузочно-захватывающее устройство (рисунок 1) предназначено для подбора и погрузки рулонов на транспортную платформу в автоматизированном или ручном режиме. Специальная конструкция погрузочно-захватывающего устройства позволяет захвату при подборе рулона автоматически выполнять движение назад, перемещаясь по несущей балке захвата, что дает возможность за это время сжать и поднять погрузочным рычагом рулон с земли без волочения, пока трактор продолжает движение к следующему рулону при максимальной скорости 3 км/ч.

Погрузочно-захватывающее устройство состоит из основания *1*, к которому крепится телескопический погрузочный рычаг *2* с гидроцилиндром *3*, несущей балки *4* с гидроцилиндром *5* и гидромотором *6*, по которой перемещается захватывающее устройство, состоящее из несущего корпуса *7* с гидроцилиндром *8*, подъемно-поворотного блока *9* с гидроцилиндром *10*, зажимной рамы *11*, двух прижимных лап большой *12* и малой *13*, гидроцилиндра *14*, упора-датчика *15*, двух обрезиненных прижимных вальцов *16* и *17,* а также осей, втулок, крепежных деталей и других элементов гидрооборудования.

На рисунке 2 представлена конструктивно-технологическая схема захвата рулона автоматизированным погрузочно-захватывающим устройством.

На рисунке 3 представлены функции работы подборщика-транспортировщика рулонов с автоматизированным захватывающим устройством.

Описание функций работы подборщика-транспортировщика рулонов с автоматизированным захватывающим устройством (рисунок 3): *1* – открытие и закрытие захвата; *2* – подъем-опускание



а *б*

Рисунок 2 – Конструктивно-технологическая схема захвата рулона автоматизированным погрузочно-захватывающим устройством: *а* – захват рулона, расположенного на торцовой поверхности (вертикально); *б* – захват рулона, расположенного на боковой поверхности (горизонтально)

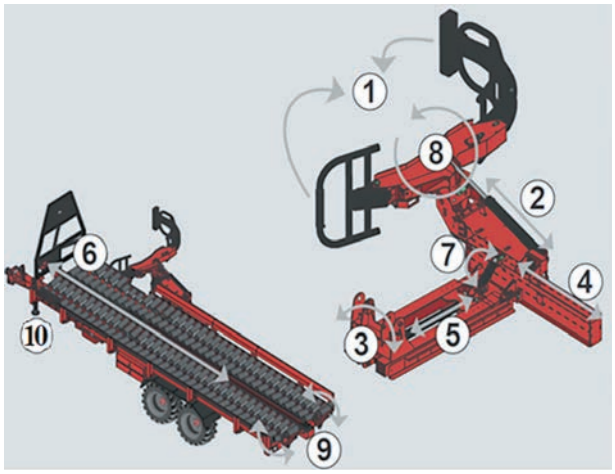


Рисунок 3 – Функции работы подборщика-транспортировщика рулонов с автоматизированным захватывающим устройством

блока захвата; *3* – подъем-опускание погрузочного рычага; *4* – продольное перемещение захватывающего устройства (назад-вперед); *5* – выдвижение и втягивание погрузочного рычага; *6* – перемещение толкающей стенки (назад-вперед); *7* – поворот несущей балки; *8* – поворот блока захвата; *9* – подъем-опускание задних бортов; *10* – наклон платформы.

Технологический процесс захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу осуществляется следующим образом. Перед началом процесса подбора и загрузки спрессованных кормов тракторист-машинист с помощью пульта управления выбирает режим работы захватывающего устройства (автоматический или ручной), а также выбирает размеры (1,2 м; 1,5 м или 1,8 м) и ориентацию захвата (вертикальная, горизонтальная) загружаемых рулонов. Также при необходимости регулируется давление захвата для рулонов разной плотности прессования. Согласно технологическому процессу подбор и загрузка рулонов происходит в движении (без остановки подборщика-транспортировщика), следовательно, в момент захвата и подъема рулона он не должен двигаться по почве (стерне), чтобы не повреждать полимерную упаковку и не загрязняться. Чтобы выполнялось это условие, конструкция погрузочно-захватывающего устройства имеет несущую балку, по которой при помощи гидромотора перемещается несущий корпус захвата со скоростью $\upsilon_{гм}$ равной или большей рабочей скорости подборщика-транспортировщика $\upsilon_{птр}$ = = 3 км/ч. Таким образом, при движении подборщика-транспортировщика и выполнении операций захвата (сжатия) рулона и начала его подъема, захватывающее устройство со стоящим на месте рулоном перемещается назад по несущей балке (около 1 м или 1,2–2,0 с) до момента подъема рулона и опрокидывания его в вертикальном положении на 90° с помощью подъемно-поворотного блока. Далее, после того как рулон поднят с земли и опрокинут в вертикальном положении на 90°, захватывающее устройство вместе с рулоном перемещается в исходное переднее положение для последующей его загрузки на платформу погрузочным рычагом. Телескопическая конструкция погрузочно-захватывающего устройства позволяет загружать рулоны в два яруса.



Рисунок 4 – Этап захвата рулона в вертикальном положении автоматизированным захватывающим устройством



Рисунок 5 – Этап подъема рулона и опрокидывания его в вертикальном положении на 90° автоматизированным захватывающим устройством



Рисунок 6 – Этап загрузки рулона, расположенного вертикально, на платформу погрузочным рычагом



Рисунок 7 – Этап перемещения рулонов по платформе толкающей стенкой



Рисунок 8 – Этап захвата рулона в горизонтальном положении автоматизированным захватывающим устройством



Рисунок 9 – Этап подъема рулона и опрокидывания его в горизонтальном положении на 135° автоматизированным захватывающим устройством



Рисунок 10 – Этап поворота рулона в горизонтальном положении на 90°



Рисунок 11 – Этап загрузки рулона в горизонтальном положении на платформу погрузочным рычагом

На рисунках 4–7 представлена технологическая схема подбора и загрузки рулонов в вертикальном положении.

На рисунках 8–11 представлена технологическая схема подбора и загрузки рулонов в горизонтальном положении.

На рисунках 12 и 13 представлены технологические схемы выгрузки рулонов с платформы в вертикальное и горизонтальное положение. Выгрузка рулонов осуществляется путем наклона платформы назад под определенным углом при помощи гидроцилиндра, а также с помощью

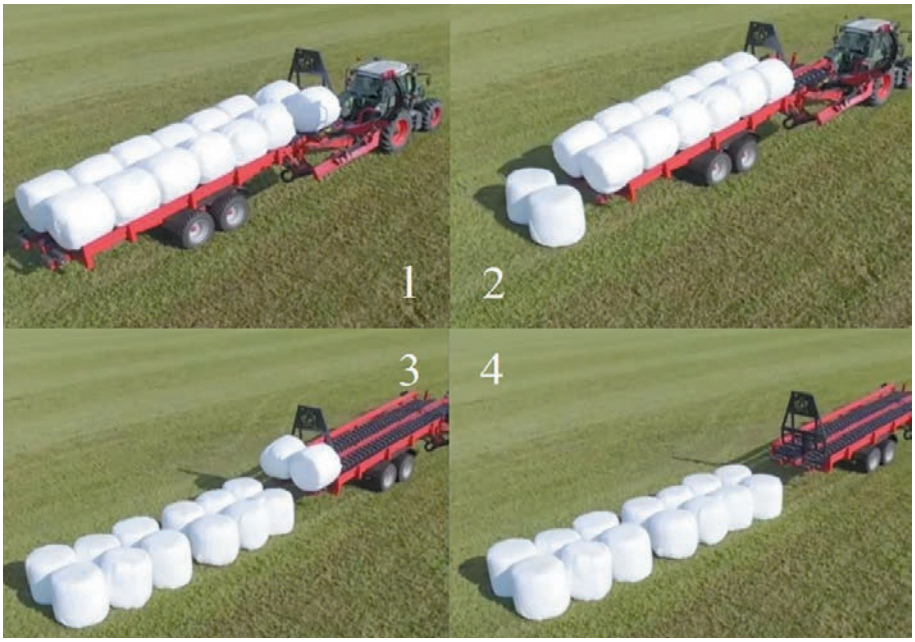


Рисунок 12 – Технологическая схема выгрузки рулонов с платформы в вертикальное положение

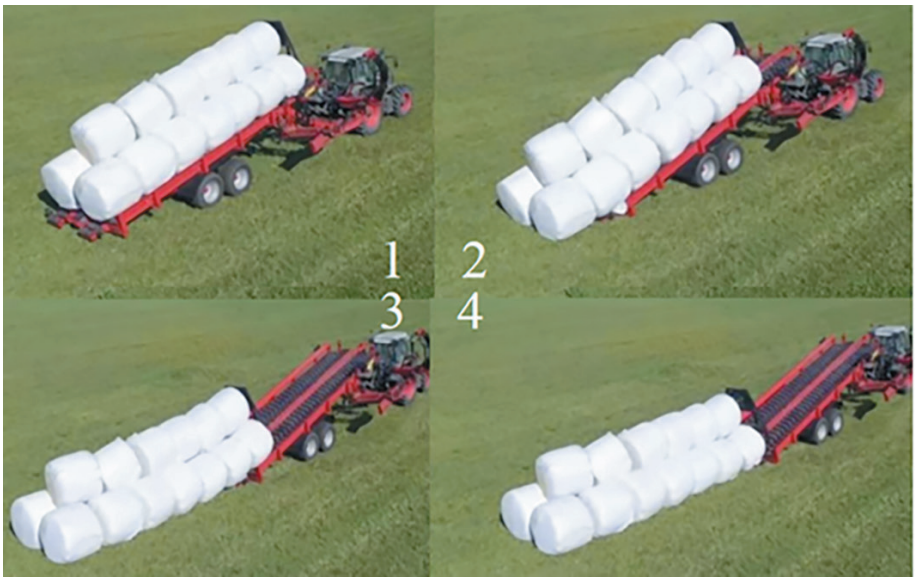


Рисунок 13 – Технологическая схема выгрузки рулонов с платформы в горизонтальное положение

толкающей стенки, которая последовательно перемещает рулоны до полной выгрузки. В результате поступательного движения трактора рулоны последовательно укладываются в вертикальное (рисунок 12) или горизонтальное (рисунок 13) положение, в два или три ряда. Чтобы выгрузить рулоны в вертикальное положение необходимо поднять платформу наполовину (на 15°). При таком угле выгрузки в результате поступательного движения трактора рулоны последовательно укладываются (съезжают с задних роликовых бортов платформы) на землю в два ряда. Для того, чтобы выгрузить рулоны в горизонтальное положение необходимо поднять платформу до упора (на 30°). При таком угле выгрузки в результате поступательного движения трактора рулоны последовательно съезжают с задних роликовых бортов платформы на землю в два или три ряда. Для контроля процесса выгрузки рулонов подборщик-транспортировщик оборудован задней видеокамерой.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы была разработана конструктивно-технологическая схема и алгоритм функционирования захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу, а также обоснованы конструктивные и кинематические параметры автоматизированного захватывающего устройства. По результатам этих выполненных работ необходимо провести экспериментальные исследования, чтобы убедиться в точности и достоверности полученных теоретических положений, а также с целью определить оптимальные конструктивные и кинематические параметры захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу.

Программа экспериментальных исследований предусматривает следующие действия:

– установить влияние усилия сжатия рулона и угла обхвата рулона захватывающим устройством на надежность удержания при различной плотности рулонов со следующими переменными факторами: усилие сжатия $F_{сж}$, кН; угол обхвата рулона α°; плотность рулона, ρ, кг/м^3;

– отработать алгоритм функционирования захватывающего устройства в автоматизированном и ручном режиме при подборе и погрузке рулонов на транспортную платформу в вертикальном положении.

Выбор факторов, влияющих на значения основных критериев, определяющих оптимальные параметры захватывающего устройства при удержании рулона, основывался на анализе данных из литературных источников, поисковых опытов и собственных наблюдений. Факторы, влияние которых уже установлено, а значения оптимизированы другими исследователями, принимались постоянными. Другие факторы устанавливались, исходя из условий проведения экспериментов и результатов поисковых опытов. За константы при проведении экспериментов были приняты величины, ранее оптимизированные другими исследователями.

Было установлено, что на усилие сжатия рулона и усилие удержания влияют:

– количество поперечных прижимных труб на захватах и расстояние между ними. Расстояние между прижимными трубами должно обеспечивать надежное удержание рулона как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, компенсировать отклонение положения захвата от центра рулона, а также исключать повреждение упаковочного материала рулона. Для проведения исследований было назначено расстояние между прижимными трубами захватов 0,45 м, при количестве труб на одном захвате – 3 шт.;

– геометрическая форма захватов, которая должна обеспечивать максимальную силу трения о поверхность рулона или упаковочный материал при минимальном усилии сжатия рулона. Для проведения исследований был назначен радиус кривизны рамы захватывающего устройства – 0,7 м;

– угол обхвата рулона захватывающим устройством, который должен обеспечивать надежное удержание рулона при приложении минимально необходимого усилия сжатия с целью обеспечения целостности обвязки или обмотки рулона. Для проведения опытов было назначено три значения угла обхвата рулона: 240°, 255°, 270°;

– площадь поперечного сечения захватов. Рама захватывающего устройства повторяет форму образующей поверхности рулона. Следовательно, можно предположить, что наибольшее усилие будет возникать на концах захватов. Диаметр захватов определяется прочностными характеристиками материала захватов и выбирается наименьшим, обеспечивающим жесткость конструкции и надежность захвата рулона захватывающим устройством;

– физико-механические свойства сенажа;

– способ упаковки рулонов.

Надежность удержания рулона определяется следующим коэффициентом удержания:

$$K_{\text{у}} = \frac{F_{\text{уд}}^{i}}{F_{G\text{Р}}}, \qquad (1)$$

где $F_{\text{уд}}^{i}$ – усилие удержания рулона в горизонтальном (i = г) или вертикальном (i = в) положениях, кН; $F_{G\text{Р}}$ – фактический вес рулона, кН.

Определение средней плотности материала рулона будет осуществляться с помощью взвешивания рулона на весах. Определение средней плотности материала рулона будет производиться по формуле

$$\rho = \frac{4m_{\text{р}}}{\pi d^2 L}, \quad (2)$$

где $m_{\text{р}}$ – масса рулона, кг; d – диаметр рулона, м; L – длина рулона, м.

Для расчетов будут применяться средние показатели замеров массы, диаметра и длины реального рулона. Диаметр и длина рулона замеряются после взвешивания. Для определения диаметра рулон разбивается на четыре части, а замеры производятся по четырем высотам, в таблицу заносятся средние значения.

Перечень основных средств измерений, применяемых при исследованиях, представлены в таблице, приборы, определенные стандартными методиками, не приведены.

Перечень приборов, оборудования и приспособлений, применяемых при проведении исследований

Определяемая величина	Средство измерений	Погрешность
Время, с	Секундомер типа СДС ГОСТ 5072-79	±0,2
Масса, кг	Весы автомобильные Динамометр типа ДПУ-10-2 (100–1000 кг)	±1 ±10
Линейные размеры, мм	Линейка измерительная (до 2,0 м) ГОСТ 427-75 Рулетка типа ЗПТЗ	±1 ±1
Рабочее давление, МПа	Манометр (30 МПа)	±1
Усилие сжатия, кН	Манометр (40 кН)	±1

При упаковке рулона в пленку снижается коэффициент трения захватов о рулон. Опыты должны проводиться на рулонах, обмотанных в сетку, а также упакованных в пленку массой до 1 000 кг. В процессе проведения опытов будут определены:

– физико-механические свойства рулонов: плотность, влажность, а также деформация рулона;

– технологические свойства рулонов: масса, геометрические параметры, расположение на поле.

Для проведения исследований работы захватывающего устройства, будут заготовлены рулоны из сена и провяленных трав различной плотности – 110, 205, 300 кг/м^3. Опыты будут проводиться для каждого материала при различной плотности отдельно по плану. Для определения влияния упаковочного материала на надежность удержания рулона, будут проводиться опыты на рулонах из провяленных трав, обмотанных стрейч-пленкой в 5–6 слоев. Исходя из анализа литературных источников, коэффициент трения стали по пленке составляет 0,25.

При проведении исследований ставится задача получить данные по усилию удержания рулона на весу в вертикальном положении, а также возможной деформации рулона при воздействии на него захватов. Для решения поставленной задачи макетный образец захватывающего устройства будет оснащен регулятором давления усилия сжатия рулона, а также измерительными манометрами, которые будут установлены в каналы соответствующих гидравлических магистралей. Также в процессе проведения исследований будет отработан алгоритм функционирования и работа захватывающего устройства в автоматизированном режиме.

Заключение

Проведение экспериментальных исследований по определению оптимальных конструктивных и кинематических параметров захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу согласно разработанной методике, позволит уточнить и проверить достоверность полученных теоретических положений, а также определить рациональное значение ключевых факторов и величин.

На основании проведенных экспериментальных исследований будут разработаны технические требования на конструкцию автоматизированного захватывающего устройства.

Список использованных источников

1. Соловьева, Н. Ф. Современные рулонные пресс-подборщики / Н. Ф. Соловьева // Техника и оборудование для села. – 2001. – № 11. – С. 18–22.

2. Особов, В. И. Современные пресс-подборщики «КЛААС» / В. И. Особов // Техника и оборудование для села. – 2000. – № 9. – С. 8–10.

3. Ахламов, Ю. Л. Заготовка корма в рулонах / Ю. Л. Ахламов, А. В. Шевцов // Кормопроизводство. – 2001. – № 6. – С. 28–29.

4. Измайлов, А. Ю. Технологии и технические решения по повышению эффективности транспортных систем АПК / А. Ю. Измайлов // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса». – М. : Росинформагротех, 2007. – 197 с.

5. Техническое обеспечение кормоуборочных работ. Состояние и перспективы : в 2 т. / И. М. Лабоцкий, П. В. Яровенко, Н. А. Горбацевич, И. М. Ковалева // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : 2013. – Вып. 47. − Т. 2. – С. 3−10.

6. Трофимович, Л. И. Средства механизации для уборки стебельчатых кормов, запрессованных в тюки или рулоны / Л. И. Трофимович // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Минск, 18–20 октября 2017 г. – Мн. : Бел. навука, 2017. – С. 59–68.

7. Современные механизированные технологии заготовки кормов из трав и перспективы их развития / И. М. Лабоцкий, С. В. Крылов, Н. А. Горбацевич [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохоз. производстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 октября 2010 г. : в 2 т. – Мн. : НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2010. − Т. 2. – С. 8−13.

8. Самозагружающиеся транспортировщики рулонов : оф. сайт компании ANDERSON GROUPE. – URL: https://grpanderson.com/en/trailers (дата обращения: 05.12.2025).

9. Самозагружающийся транспортировщик рулонов CTS-1600 : оф. сайт компании SAMCO SYSTEM. – URL: https://www.samco.ie/machinery/bale-trailer (дата обращения: 05.12.2025).

УДК: 631.373-374

Поступила в редакцию 12.01.2026
Received 12.01.2026

Э. В. Дыба[1], А. М. Хартанович[1], А. Н. Пунько[2], Г. И. Кошля[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. В статье представлен анализ экспериментальных исследований оптимальных параметров автоматизированного захватывающего устройства.

Ключевые слова: подборщик-транспортировщик, платформа, эксперимент, исследование, устройство, режим, показатель, усилие, коэффициент, упаковка, полимерный материал, транспорт, травяные корма, рулон, захватывающее устройство, параметры.

E. V. Dyba[1], A. M. Khartanovich[1], A. N. Punko[2], G. I. Koshlya[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
[2]UE "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru; Khartanovich7759@gmail.com

ANALYSIS OF RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES TO SUBSTANTIATE OPTIMAL PARAMETERS OF AUTOMATED GRIPPING DEVICE

Abstract. The article presents an analysis of experimental studies of optimal parameters of an automated gripping device.

Keywords: picker-transporter, platform, experiment, research, device, mode, indicator, effort, coefficient, packaging, polymer material, transport, grass feed, roll, gripping device, parameters.

Введение

За последние 10 лет в Беларуси успешно зарекомендовала себя технология заготовки травяных кормов различной влажности в рулонах, упакованных в пленку, которая прошла длительную хозяйственную проверку, в результате которой подтверждена несомненная эффективность данной технологии. А именно:

– меньшая зависимость от погодных условий позволяет сократить сроки заготовки кормов;

– комплексная механизация заготовки кормов, наряду со значительным (25–30 %) снижением общих трудозатрат, исключает ручной труд, экономит энергозатраты;

– исключены потери кормов при их заготовке и скармливании;

– обеспечивается высокое качество кормов.

Основными технологическими звеньями этого способа заготовки кормов являются:

– процесс подбора и прессования провяленной до влажности 45–55 % травяной массы, обеспечивающие повышенную плотность (400–500 кг/м^3) прессования сенажа и качественную форму рулона;

– процесс обмотки (упаковки) рулона пленкой;

– процесс погрузки и транспортировки рулонов сенажа к месту хранения.

В настоящее время по данной технологии заготавливается около 1 400 тыс. т сенажа. Технические возможности позволяют заготавливать до 1 533 тыс. т [1]. Примечательно, что Минсельхозпрод считает целесообразным довести в ближайшие годы эти объемы до 3 млн т, что позволит обеспечить потребность дойного стада в высококачественных кормах.

Однако существенными причинами, сдерживающими темпы и эффективность заготовки травяных кормов, являются транспортные и погрузочно-разгрузочные работы. В общих затратах труда на производство продукции животноводства транспортирование и погрузочно-разгрузочные работы составляют от 40 до 45 %, а затраты топлива – до 50 % [2]. Нерешенной остается и проблема, связанная с погрузкой, перевозкой, скирдованием рулонов сенажа, упакованных в полимерную пленку. Из-за несовершенства конструкций погрузочных устройств, а также транспортных платформ происходит повреждение упаковки рулона [3].

Эффективная заготовка кормов по удельным затратам ресурсов может быть организована только при правильном наборе технологических операций и технических средств. Последние должны быть адаптированы к конкретным производственным условиям: виду убираемых культур, типу имеющихся в наличии кормоуборочных и транспортных машин, объемам заготовки, расстояниям транспортировки корма, природно-климатическим условиям и др.

Для повышения эффективности работ необходима разработка погрузочно-транспортного средства с грузозахватным устройством для рулонов, позволяющего укладывать рулон как на образующую, так и на основание, конструкция которого не препятствовала бы плотной укладке рулонов на транспортную платформу с последующей укладкой в штабель, предусматривала маневренность при подборе и укладке рулона на платформу, не нарушая при этом целостности упаковки, а также выполняла процесс подбора и укладки рулона на платформу в автоматическом или ручном режиме.

Основная часть

На основании проведенных теоретических исследований, а также выполненных расчетов, позволивших определить основные конструктивные и технологические параметры автоматизированного захватывающего устройства, лабораторией механизации заготовки кормов РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» была разработана конструкторская документация АПЗУ 00.00.000 на макетный образец захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу (рисунок 1).

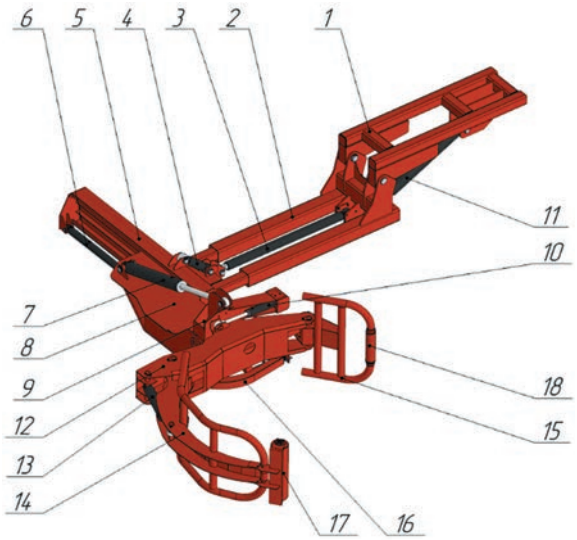


Рисунок 1 – 3D-модель макетного образца захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу: *1* – основание; *2* – рычаг; *3, 4, 6 ,7, 10, 11, 13* – гидроцилиндры; *5* – балка (несущая); *8* – корпус (несущий); *9* – блок (подъемно-поворотный); *12* – захват; *14* – лапа прижимная (большая); *15* – лапа прижимная (малая); *16* – упор-датчик; *17, 18* – валец прижимной

Погрузочно-захватывающее устройство (в соответствии с рисунком 1) состоит из основания *1* с гидроцилиндром *11*, к которому крепится телескопический погрузочный рычаг *2* с гидроцилиндром *3*; несущей балки *5* с гидроцилиндрами *4* и *6*, по которой перемещается захватывающее устройство *12*, состоящее из несущего корпуса *8* с гидроцилиндром *7*; подъемно-поворотного блока *9* с гидроцилиндром *10*; двух прижимных лап большой *14* и малой *15*; гидроцилиндра *13*; упора-датчика *16*; двух обрезиненных прижимных вальцов *17* и *18*; а также осей, втулок, крепежных деталей и других элементов гидрооборудования.

Для проведения экспериментальных исследований по отработке алгоритма функционирования захватывающего устройства в автоматизированном и ручном режиме при подборе и погрузке рулонов на транспортную платформу в вертикальном положении, а также по установлению влияния усилия сжатия рулона и угла обхвата рулона захватывающим устройством на надежность удержания рулона ОАО «Вороновская сельхозтехника» изготовлен макетный образец захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу (рисунок 2).

Макетный образец в виде подборщика-транспортировщика рулонов с автоматизированным захватывающим устройством предназначен для подбора, самозагрузки и транспортирования рулонов сена, соломы и провяленной зеленой массы в полимерной упаковке с последующей саморазгрузкой их в местах складирования или хранения. Агрегатируется с тракторами мощностью от 120 до 150 л. с., и допускается агрегатирование с тракторами меньшей мощности при соответствующей массе транспортируемых рулонов или их количестве. Привод рабочих органов, в том числе автоматизированного захватывающего устройства, осуществляется от собственной гидросистемы подборщика-транспортировщика, которая приводится в действие от ВОМ трактора (число оборотов ВОМ 16,7 $с^{-1}$) посредством карданного вала и входного редуктора с гидронасосом. Управление гидросистемой (рабочими органами) подборщика-транспортировщика осуществляется из кабины трактора при помощи пульта управления, питание которого осуществляется от бортовой системы трактора напряжением 12 В.

Макетный образец погрузочно-захватывающего устройства осуществляет подбор и погрузку рулонов на транспортную платформу в автоматизированном или ручном режиме. Специальная конструкция погрузочно-захватывающего устройства позволяет захвату при подборе рулона автоматически выполнять движение назад, перемещаясь по несущей балке захвата, что дает возможность за это время сжать и поднять погрузочным рычагом рулон с земли без волочения, пока трактор продолжает движение к следующему рулону при максимальной скорости 3 км/ч.

Согласно технологическому процессу подбор и загрузка рулонов будет происходить в движении (без остановки подборщика-транспортировщика), следовательно, в момент захвата и подъема рулона он не должен двигаться по почве (стерне), чтобы не повреждать упаковку и не загрязняться.



Рисунок 2 – Общий вид макетного образца захватывающего устройства для автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу

Чтобы выполнялось это условие, конструкция погрузочно-захватывающего устройства имеет несущую балку, по которой при помощи гидромотора перемещается несущий корпус захвата со скоростью $\upsilon_{гм}$, равной или большей рабочей скорости подборщика-транспортировщика $\upsilon_{птр}$ = = 3 км/ч. Рабочая скорость движения несущего корпуса с захватом должна составлять 0,8–1,0 м/с. Таким образом, при движении подборщика-транспортировщика и выполнении операций захвата (сжатия) рулона и начала его подъема захватывающее устройство со стоящим на месте рулоном перемещается назад по несущей балке (около 1 м или 1,2–2,0 с) до момента подъема рулона и опрокидывания его в вертикальном положении на 90° с помощью подъемно-поворотного блока. Далее, после того как рулон поднят с земли и опрокинут в вертикальном положении на 90°, захватывающее устройство вместе с рулоном перемещается в исходное переднее положение.

Для проведения экспериментальных исследований по установлению влияния усилия сжатия рулона и угла обхвата рулона захватывающим устройством на надежность удержания рулона макетный образец оснащен сменными захватами, позволяющими менять угол обхвата рулона на – 240°, 255°, 270°. Также макетный образец захватывающего устройства оснащен регулятором усилия сжатия рулона в пределах 0–36 кН.

Сравнение и анализ значений выбранных критериев оптимизации позволят определить конструктивные параметры захватывающего устройства, способствующие наиболее надежному захвату и удержанию рулона при минимальных энергетических затратах.

Для проведения исследований работы захватывающего устройства были заготовлены рулоны из соломы, сена и провяленных трав различной плотности – 80–130, 140–200, 400–500 кг/м^3 соответственно. Опыты проводились для каждого материала при различной плотности отдельно по плану. Для определения влияния упаковочного материала на надежность удержания рулона проводились опыты на рулонах из провяленных трав, обмотанных стрейч-пленкой в 5–6 слоев [2, 4, 5].

Подготовка макетного образца для проведения экспериментальных исследований состояла из комплекса мероприятий по техническому обслуживанию механической и гидравлической частей, подключению и настройке пульта управления, обкатке трущихся поверхностей, настройке гидравлической системы на оптимальный режим работы, проверке работы регуляторов изменения усилия сжатия рулона, а также правильности показаний измерительной аппаратуры.

Перед проведением исследований была выполнена настройка, а также отработка алгоритма функционирования захватывающего устройства в автоматизированном и ручном режиме при подборе и погрузке рулонов на транспортную платформу в вертикальном положении. В ходе проведения настройки и отработки функционирования захватывающего устройства были проведены контрольные заезды на подборе рулонов с их загрузкой на платформу. Экспериментальные исследования проводились в ОАО «Вороновская сельхозтехника».

При проведении настройки и отработки функционирования захватывающего устройства было выявлено, что при обхвате рулона на 240° при диаметре рулона 1 800 мм не обеспечивается надежное удержание рулона, поскольку возникает необходимость приложения больших усилий, что приводит к деформации и выскальзыванию (выталкиванию) рулона из захвата. Также выявлено, что для надежного удержания при захвате рулона сенажа, упакованного в пленку, необходимо приложение усилия не менее 18 кН. Остальные конфигурации захватывающего устройства обеспечивают надежный захват и удержание рулона диаметром от 1 500 до 1 800 мм.

В ходе выполнения контрольных заездов с разными комбинациями захватывающих устройств установлено, что макетный образец захватывающего устройства полностью выполняет технологический процесс автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу (рисунок 3).

В ходе наблюдения за процессом автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу было установлено, что при подборе рулона сенажа, упакованного в пленку, усилия сжатия $F_{сж}$ = 18 кН недостаточно, а именно, рулоны с большей массой медленно выскальзывают из захвата. В свою очередь, при силе сжатия $F_{сж}$ = 36 кН выявлено надежное удержание рулона без повреждения упаковочного материала.



Рисунок 3 – Подбор и загрузка рулона, упакованного в пленку автоматизированным захватывающим устройством

Также следует отметить, что в процессе автоматизированного подбора рулонов соломы и сена при небольшой плотности (70–130 кг/м^3) и при силе сжатия рулона 36 кН происходит сильная деформация рулона, при угле 240° происходит выталкивание рулона.

Для расчетов данных по усилию удержания рулона на весу применялись средние показатели замеров массы, диаметра и длины реального рулона (таблица 1).

Таблица 1 – **Перечень вспомогательных показателей для расчета плотности рулона**

Масса рулона, $m_р$, кг	Диаметр рулона, d, м	Длина рулона, L, м	Плотность рулона, ρ, кг/м^3
Рулон обвязан шпагатом			
235	1,85	1,44	60,7
300	1,81	1,42	82,0
293	1,86	1,41	76,5
Рулон обвязан сеткой			
326	1,54	1,22	143,6
330	1,50	1,24	150,6
342	1,52	1,2	157,2
Рулон упакован в пленку			
852	1,35	1,23	485
820	1,32	1,2	500
815	1,28	1,23	515

При проведении исследований ставилась задача получить данные по усилию удержания рулона на весу в вертикальном положении, а также возможной деформации рулона при воздействии на него захватов (таблица 2).

В процессе проведения исследований был отработан алгоритм функционирования и работы захватывающего устройства в автоматизированном режиме. Специальная конструкция погрузочно-захватывающего устройства позволяет захвату при подборе рулона автоматически выполнять движение назад, перемещаясь по несущей балке захвата, что дает возможность за это время сжать и поднять погрузочным рычагом рулон с земли без волочения, пока трактор продолжает движение к следующему рулону при максимальной скорости 3 км/ч. Согласно технологическому процессу подбор и загрузка рулонов происходит в движении (без остановки подборщика-транспортировщика). Конструкция погрузочно-захватывающего устройства имеет несущую балку,

по которой при помощи гидромотора перемещается несущий корпус захвата со скоростью $\upsilon_{гм}$, равной или большей рабочей скорости подборщика-транспортировщика $\upsilon_{птр}$ = 3 км/ч. Таким образом, при движении подборщика-транспортировщика и выполнении операций захвата (сжатия) рулона и начала его подъема, захватывающее устройство со стоящим на месте рулоном перемещается назад по несущей балке (около 1 м или 1,2–2,0) до момента подъема рулона и опрокидывания его в вертикальном положении на 90° с помощью подъемно-поворотного блока. Далее, после того как рулон поднят с земли и опрокинут в вертикальном положении на 90°, захватывающее устройство вместе с рулоном перемещается в исходное переднее положение.

Таблица 2 – **Перечень показателей, определяемых при проведении исследований по усилию удержания рулона**

Угол обхвата рулона, град.	Масса рулона, $m_р$ кг	Плотность, кг/м^3	Коэффициент удержания рулона Ку при силе сжатия рулона $F_{сж}$			Степень деформации рулона
			3 кН	18 кН	36 кН	
Рулон обвязан шпагатом						
240	235	60,7	1,28	7,56	15,32	При силе сжатия рулона 36 кН сильная деформация рулона, при угле 240° происходит выталкивание рулона
255	300	82,0	1,00	6,00	12,00	
270	293	76,5	1,02	6,14	12,29	
Рулон обвязан сеткой						
240	326	143,6	0,92	5,52	11,04	При силе сжатия рулона 36 кН незначительная деформация рулона
255	330	150,6	0,91	5,45	10,91	
270	342	157,2	0,88	5,26	10,53	
Рулон упакован в пленку						
240	852	485	0,35	2,11	4,23	Существенной деформации рулона, а также повреждения пленки не выявлено. При силе сжатия рулона 18 кН, а также угле 240° происходит выскальзывание рулона
255	820	500	0,37	2,20	4,39	
270	815	515	0,37	2,21	4,42	

При оценке функциональных показателей макетного образца захватывающего устройства автоматизированного типа рабочая скорость при номинальных оборотах двигателя трактора составила 3,0–10,0 км/ч. Захватывающее устройство обеспечивает качественное выполнение технологического процесса подбора и погрузки рулонов в автоматическом и ручном режимах.

Фактическая грузоподъемность захватывающего устройства при подборе рулонов спрессованных травяных кормов составила до 1 050 кг, продолжительность цикла загрузки рулона составила до 23 с, диаметр загружаемых рулонов составил 1,30–1,85 м. Деформация рулонов и повреждение упаковочного материала рулонов при оптимальных режимах работы захватывающего устройства отсутствует.

Анализ данных по усилию удержания рулона на весу в вертикальном положении, полученных при проведении исследований, а также функциональных показателей работы макетного образца в автоматизированном режиме покажет наиболее эффективные параметры и режимы работы захватывающего устройства автоматизированного типа.

На основании проведенных экспериментальных исследований по определению показателей по усилию удержания рулона на весу в вертикальном положении, а также по определению функциональных показателей работы макетного образца захватывающего устройства в автоматизированном режиме выполнен анализ данных, полученных в ходе проведения экспериментальных исследований, и обобщены полученные результаты.

В процессе проведения исследований был отработан алгоритм функционирования и работы захватывающего устройства в автоматизированном режиме. Установлено, что захватывающее устройство полностью выполняет технологический процесс подбора и погрузки рулона на транспортную платформу в автоматическом и ручном режимах, а именно, специальная конструкция погрузочно-захватывающего устройства позволяет захвату при подборе рулона автоматически выполнять движение назад (около 1 м или 1,2–2,0 с), перемещаясь по несущей балке захвата,

что дает возможность за это время сжать и поднять погрузочным рычагом рулон с земли без волочения, пока трактор продолжает движение к следующему рулону при максимальной скорости 3 км/ч и более.

Анализируя проведенные исследования и построенные графики (рисунки 4–6), можно сделать вывод, что грузозахватное устройство с углом обхвата рулона a = 255° и более при усилии сжатия 18 кН обеспечивает надежное удержание рулона в вертикальном положении. Полученные зависимости показывают, что значение коэффициента удержания рулона в вертикальном положении возрастает с увеличением силы сжатия рулона грузозахватным устройством. Также анализ построенных графиков показывает, что угол обхвата рулона существенно не влияет на показатели коэффициента удержания рулона, которые в большей мере зависят от силы сжатия рулона. Однако в ходе проведения исследований было установлено, что при угле обхвата 240° происходит выталкивание рулона диаметром 1 800 мм, так как в процессе автоматизированного подбора рулонов соломы и сена при небольшой плотности (70–130 кг/м^3) и при силе сжатия рулона 36 кН происходит его сильная деформация. Так, при усилии сжатия $F_{сж}$ = 18 кН коэффициент удержания рулона, обвязанного шпагатом, при средней плотности 100 кг/м^3 составил $К_у$ = 6,00–7,56 при углах обхвата рулона a = 240–270° соответственно (рисунок 4). В свою очередь, при силе сжатия $F_{сж}$ = 36 кН коэффициент удержания рулона составил $К_у$ = 12,00–15,32, чем и объясняется сильная деформация рулона, а также его выталкивание из захвата.

При усилии сжатия $F_{сж}$ = 18 кН коэффициент удержания рулона, обвязанного сеткой, при средней плотности 100 кг/м^3 составил $К_у$ = 5,26–5,52 при углах обхвата рулона a = 240–270° соответственно (рисунок 5). В свою очередь, при силе сжатия $F_{сж}$ = 36 кН, коэффициент удержания рулона составил $К_у$ = 10,53–11,04. Захват рулона выполняется качественно, выявлено надежное удержание рулона без повреждения сетки и выскальзывания рулона.

При выдвижении захватов на поверхности контакта рулона и грузозахватного устройства помимо сил трения возникает также усилие опирания рулона на захваты, способствующее надежному удержанию рулона. При малом угле обхвата рулона a = 240° и приложении усилия сжатия больше 18 кН надежность удержания снижается из-за изменения направления действия сил, возникающих на концах выдвижных захватов. Силы, выталкивающие рулон из грузозахватного устройства, начинают превышать силы трения, возникающие на поверхности контакта.

Значение коэффициента удержания рулона в вертикальном положении практически не зависит от угла обхвата рулона грузозахватным устройством, поскольку в таком положении удержание рулона происходит в основном за счет сил трения рулона о захваты (прижимные лапы), а при выдвижении захватов площадь поверхности трения увеличивается незначительно. Выталкивания рулона не происходит из-за влияния составляющей усилия прижатия рулона к раме захвата.

Коэффициент удержания рулона, упакованного в пленку, по сравнению с рулоном, обвязанным шпагатом или сеткой, снижается в результате снижения сил трения, возникающих на поверх-

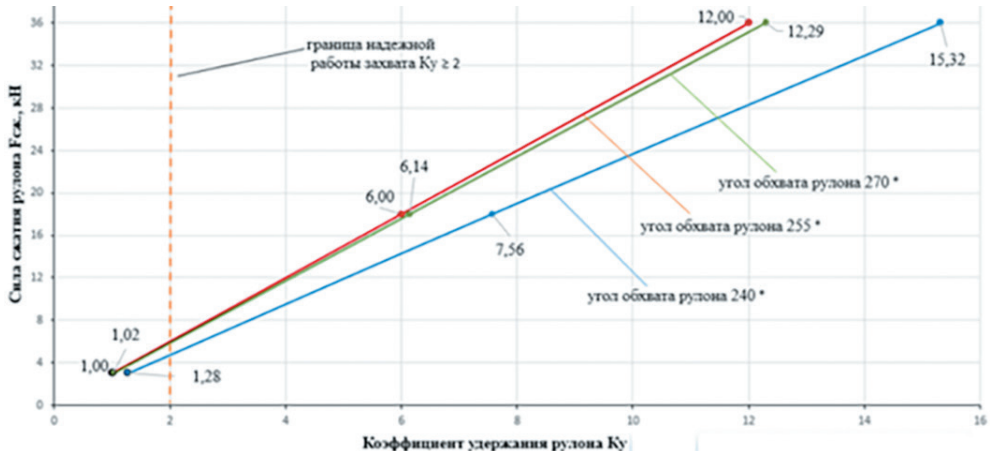


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента удержания от усилия сжатия и угла обхвата рулона грузозахватным устройством для рулонов, обвязанных шпагатом, при средней плотности 100 кг/м^3

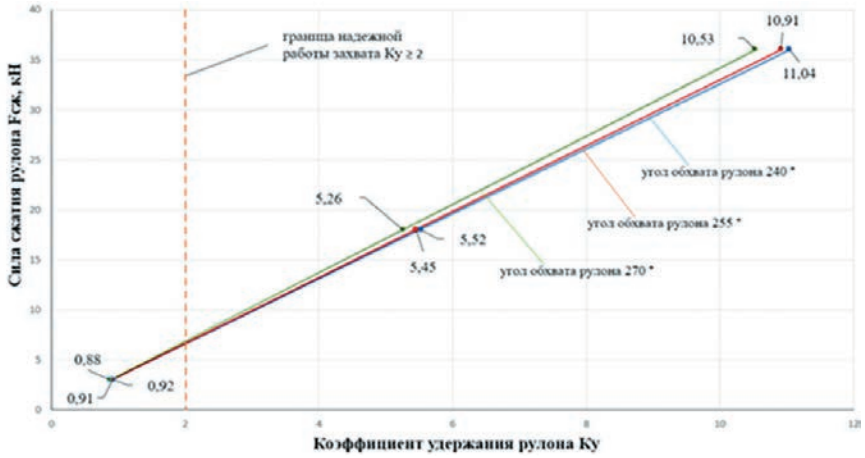


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента удержания от усилия сжатия и угла обхвата рулона грузозахватным устройством для рулонов, обвязанных сеткой, при средней плотности 150 кг/м^3

ности контакта. Зависимость коэффициента удержания от плотности рулона показывает, что с увеличением плотности надежность удержания снижается, что вызвано возрастанием упругих свойств материала.

В ходе наблюдения за процессом автоматизированного подбора и загрузки спрессованных кормов на транспортную платформу, а также анализа проведенного исследования и построенных графиков было установлено, что при подборе рулона сенажа, упакованного в пленку, усилия сжатия $F_{сж}$ = 18 кН недостаточно, а именно, рулоны с большей плотностью и массой медленно выскальзывают из захвата. При усилии сжатия $F_{сж}$ = 18 кН коэффициент удержания рулона составил $К_у$ = 2,11–2,21 при углах обхвата рулона a = 240–270° соответственно (рисунок 6). В свою очередь, при силе сжатия $F_{сж}$ = 36 кН выявлено надежное удержание рулона без повреждения упаковочного материала, коэффициент удержания рулона составил $К_у$ = 4,23–4,42.

Главным критерием оценки надежной работы захватывающего устройства следует признать коэффициент удержания рулона, который должен быть больше или равен двум, поскольку учитывает инерционные нагрузки в процессе погрузки рулона, неточность захвата рулона, а также неоднородность его материала.

При оценке функциональных показателей макетного образца захватывающего устройства автоматизированного типа рабочая скорость при номинальных оборотах двигателя трактора составила 3,0–10,0 км/ч. Захватывающее устройство обеспечивает качественное выполнение технологического процесса подбора и погрузки рулонов в автоматическом и ручном режимах.

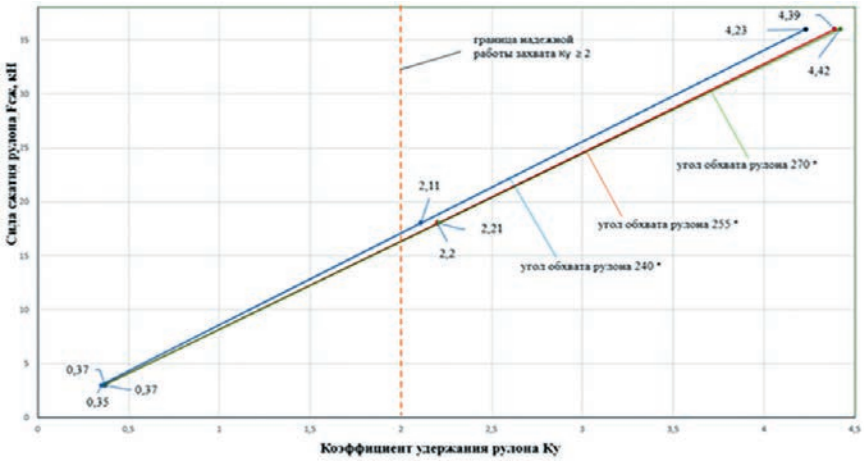


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента удержания от усилия сжатия и угла обхвата рулона грузозахватным устройством для рулонов, упакованных в пленку, при средней плотности 500 кг/м^3

Фактическая грузоподъемность захватывающего устройства при подборе рулонов спрессованных травяных кормов составила до 1 050 кг, продолжительность цикла загрузки рулона составила до 23 с, диаметр загружаемых рулонов составил 1,30–1,85 м. Деформация рулонов и повреждение упаковочного материала рулонов при оптимальных режимах работы захватывающего устройства отсутствует.

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлены следующие рациональные параметры макетного образца захватывающего устройства автоматизированного типа:

– угол обхвата рулона $a = 255°$;

– радиус кривизны рамы захватывающего устройства $r = 0{,}7$ м;

– для рулонов в вертикальном положении массой до 300 кг и плотностью до 150 кг/м^3 сила сжатия рулона $F_{сж} = 18$ кН;

– для рулонов в вертикальном положении массой до 900 кг и плотностью до 500 кг/м^3 сила сжатия рулона $F_{сж} = 36$ кН.

При оценке функциональных показателей макетного образца захватывающего устройства автоматизированного типа рабочая скорость при номинальных оборотах двигателя трактора составила 3,0–10,0 км/ч. Захватывающее устройство обеспечивает качественное выполнение технологического процесса подбора и погрузки рулонов в автоматическом и ручном режимах.

Фактическая грузоподъемность захватывающего устройства при подборе рулонов спрессованных травяных кормов составила до 1 050 кг, продолжительность цикла загрузки рулона составила до 23 с, диаметр загружаемых рулонов составил 1,30–1,85 м. Деформация рулонов и повреждение упаковочного материала рулонов при оптимальных режимах работы захватывающего устройства отсутствует.

В ходе проведения экспериментальных исследований и отработки функционирования захватывающего устройства в автоматическом режиме было выявлено, что обхват рулона менее, чем на 240° при диаметре рулона 1 800 мм не обеспечивает надежное удержание рулона, поскольку возникает необходимость приложения больших усилий, что приводит к деформации и выскальзыванию (выталкиванию) рулона из захвата. Также выявлено, что для надежного удержания при захвате рулона сенажа, упакованного в пленку, необходимо приложение усилия не менее 18 кН. При этом, для надежного удержания рулона без повреждения упаковочного материала необходимо усилие сжатия $F_{сж} = 36$ кН, так как рулоны с большей массой (более 850 кг) медленно выскальзывают из захвата, а также повреждается упаковочный материал. Остальные конфигурации захватывающего устройства при углах обхвата рулона 255 и 270° обеспечивают надежный захват и удержание рулона диаметром от 1 500 до 1 800 мм.

Также следует отметить, что в процессе автоматизированного подбора рулонов соломы и сена при небольшой плотности (70–130 кг/м^3) и при силе сжатия рулона 36 кН происходит сильная деформация рулона, при угле обхвата 240° происходит выталкивание рулона.

Список использованных источников

1. Планируемый объем заготовки травяных кормов в сельскохозяйственных организациях республики в 2024–2025 гг. : офиц. сайт Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – Мн., 2007–2026. – URL: https://mshp.gov.by/uploads/ Files/documents/plant/rplan-korma2025.pdf (дата обращения: 18.11.2025).

2. Измайлов, А. Ю. Технологии и технические решения по повышению эффективности транспортных систем АПК / А. Ю. Измайлов // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса». – М. : Росинформагротех, 2007. – 197 с.

3. Трофимович, Л. И. Средства механизации для уборки стебельчатых кормов, запрессованных в тюки или рулоны / Л. И. Трофимович // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 18–20 октября 2017 г. – Мн. : Бел. навука, 2017. – С. 59–68.

4. Ахламов, Ю. Л. Заготовка корма в рулонах / Ю. Л. Ахламов, А. В. Шевцов // Кормопроизводство. – 2001. – № 6. – С. 28–29.

5. Техническое обеспечение кормоуборочных работ. Состояние и перспективы / И. М. Лабоцкий, П. В. Яровенко, Н. А. Горбацевич, И. М. Ковалева // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», в 2 т. – Мн. : 2013. – Вып. 47. − Т. 2. – С. 3−10.

УДК 663.18 +628.355.1

Поступила в редакцию 10.08.2025
Received 10.08.2025

Н. Ф. Капустин, В. К. Клыбик, Ю. А. Ракевич

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npcter@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА И ВРЕМЕНИ ПРОЦЕССА САМОСОГРЕВАНИЯ ТВЕРДОГО СЕПАРИРОВАННОГО НАВОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА НА ЕГО ТЕМПЕРАТУРУ

Аннотация. В статье рассматриваются результаты исследований температуры самосогревания твердого сепарированного навоза КРС в зависимости от двух факторов: времени протекания процесса самосогревания и удельного расхода воздуха, подаваемого в досушиваемый материал для его окисления в аэробных условиях.

Ключевые слова: твердый сепарированный навоз КРС, температура, удельный расход воздуха, самосогревание, время процесса самосогревания.

N. F. Kapustin, V. K. Klybik, Yu. A. Rakevich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npcter@yandex.ru

STUDY OF THE INFLUENCE OF AIR CONSUMPTION AND TIME OF THE SELF-HEATING PROCESS OF SEPARATED SOLID CATTLE MANURE ON ITS TEMPERATURE

Abstract. The article examines the results of studies of the self-heating temperature of solid separated cattle manure depending on two factors: the time of the self-heating process and the specific air consumption supplied to the drying material for its oxidation under aerobic conditions.

Keywords: solid separated cattle manure, temperature, specific air consumption, self-heating, self-heating process time.

Введение

Одним из направлений получения вторичных продуктов из твердой фракции животноводческих отходов может стать изготовление подстилки для животных с помощью биоферментационных установок. Твердые сепарированные отходы, например, крупного рогатого скота (КРС), содержат большое количество непереваренных растительных волокон, которые после соответствующей обработки могут быть использованы в качестве материала для подстилки [1]. Однако в литературных источниках нет данных по исследованиям влияния удельного расхода воздуха, подаваемого в досушиваемый твердый сепарированный навоз крупного рогатого скота, и времени протекания в аэробных условиях окислительного процесса самосогревания навоза КРС на его температуру. Отсутствие таких исследований не позволяет оптимизировать режимные параметры технологии приготовления подсушенного подстилочного материала на основе твердых сепарированных животноводческих отходов и разработать технические требования к комплекту оборудования для ее осуществления.

Основная часть

Цель экспериментальных исследований, описываемых в данной статье, состояла в получении и проверке адекватности эмпирической зависимости температуры самосогревания твердого сепарированного навоза КРС от удельного расхода воздуха на единицу органического сухого вещества (ОСВ) и времени протекания процесса самосогревания.

Зависимость такого рода, полученная экспериментальным путем, позволяет избегать целого ряда упрощающих допущений, применяемых при выводе ее теоретическим путем. Это повышает точность расчета температуры самосогревания, а значит, и таких технологических параметров, как удельный расход воздуха на единицу массы сухого вещества твердого сепарированного навоза КРС и время протекания процесса самосогревания.

В качестве основных переменных факторов, влияющих на исследуемый процесс, были выбраны удельный расход воздуха на единицу массы органического сухого вещества твердого сепарированного навоза КРС и время протекания процесса самосогревания. Значения таких факторов, как содержание сухого вещества в твердом сепарированном навозе КРС, температура и влажность, подаваемых для досушивания атмосферного воздуха, поддерживались неизменными и составляли соответственно 25 %, 20 °С и 65 %. Параметром функции отклика в настоящем исследовании являлась температура досушиваемого твердого сепарированного навоза КРС.

Вопрос по нахождению эмпирической зависимости в некоторой области факторного пространства сводится к интерполяционной задаче, для решения которой удобно воспользоваться планированием эксперимента.

В таблице 1 представлены выбранные на основании априорной информации экспериментальные области определения основных факторов, их условные обозначения, уровни и интервалы варьирования.

Таблица 1 – **Уровни и интервалы варьирования факторов**

Наименование фактора	Условное обозначение	Уровни			Интервал варьирования
		Нижний (–1)	Основной (0)	Верхний (+1)	
Удельный расход воздуха, подаваемого на единицу массы органического сухого вещества досушиваемого материала W, м^3/кг ОСВ	X_1	0,6	1,5	2,4	0,9
Время протекания процесса самосогревания τ, ч	X_2	12	42	72	30

Для определения функции отклика в виде температуры самосогревания твердого сепарированного навоза КРС и получения соответствующей математической модели, в ходе эксперимента был реализован полный факторный план типа 2^2 с варьированием двух независимых факторов

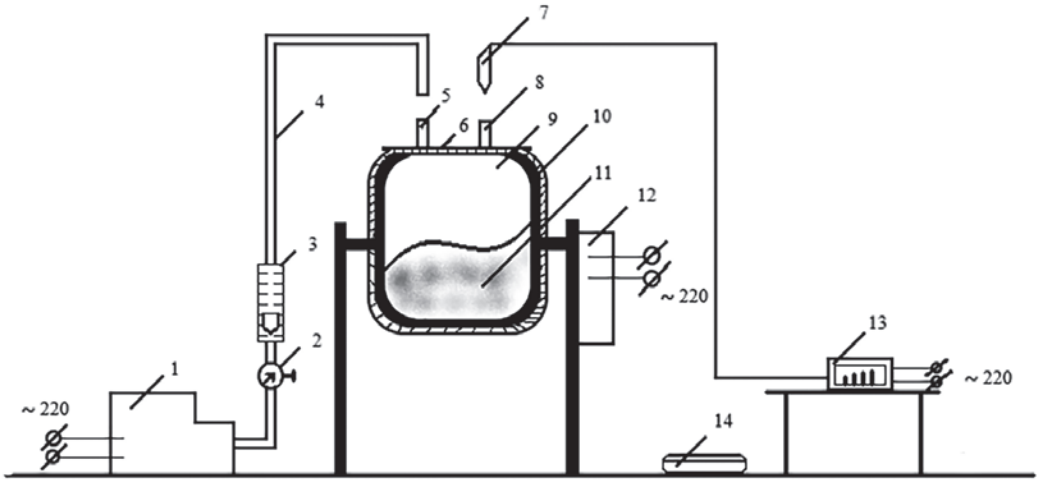


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования режимов самосогревания в аэробных условиях твердых сепарированных отходов на их тепловлажностные характеристики: *1* – компрессор (воздухонагнетатель); *2* – регулятор расхода воздуха; *3* – ротаметр; *4* – шланг подачи воздуха в ротационную бочку; *5* – патрубок для присоединения шланга подачи воздуха; *6* – крышка ротационной бочки; *7* – хромель-капелевая термопара; *8* – патрубок для ввода термопары в исследуемый материал; *9* – ротационная бочка; *10* – теплоизоляция; *11* – исследуемый материал; *12* – электропривод ротационной бочки; *13* – электронный потенциометр для измерения температуры материала с помощью термопары; *14* – весы напольные



Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки для исследования режимов самосогревания в аэробных условиях твердых сепарированных отходов на их тепловлажностные характеристики

на двух уровнях. В каждой точке спектра плана проводили по два повторных опыта с рандомизацией по времени. Такой план позволил оценить независимо друг от друга линейные эффекты и парные взаимодействия. Опыты проводили по специальной схеме, оформленной в виде матрицы (таблица 2) на созданной экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1, а общий вид – на рисунке 2.

Таблица 2 – **Матрица планирования эксперимента с эффектом взаимодействия**

Опыт №	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	Y_j
1	+	–	–	+	43
2	+	+	–	–	46
3	+	–	+	–	26
4	+	+	+	+	46

В методическом плане эксперимент начинали с установки значений второстепенных факторов. Исходное содержание сухого вещества в твердом сепарированном навозе, подвергающемуся процессу самосогревания, составляло 25 %. Температура и влажность воздуха, подаваемого для осуществления окислительного процесса в аэробных условиях, в результате которого происходит самосогревание твердого сепарированного навоза КРС, составляли соответственно 20 °С и 65 %.

Подача атмосферного воздуха в досушиваемый твердый сепарированный навоз, размещенный в ротационном барабане, осуществляли компрессором. При этом удельная подача воздуха на единицу массы органического сухого вещества исследуемого материала варьировалась в соответствии с планом эксперимента от 0,6 до 2,4 м^3/кг ОСВ.

По описанной методике и в соответствии с матрицей планирования была поставлена серия опытов, результаты которых представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

Следует отметить, что температура навоза в процессе его самосогревания через какое-то время достигала своего максимума, а затем снижалась. Это свидетельствует о том, что к моменту достижения максимальной температуры процесс окисления органического сухого вещества и, как следствие, его самосогревание завершались. Дальнейшая подача холодного атмосферного

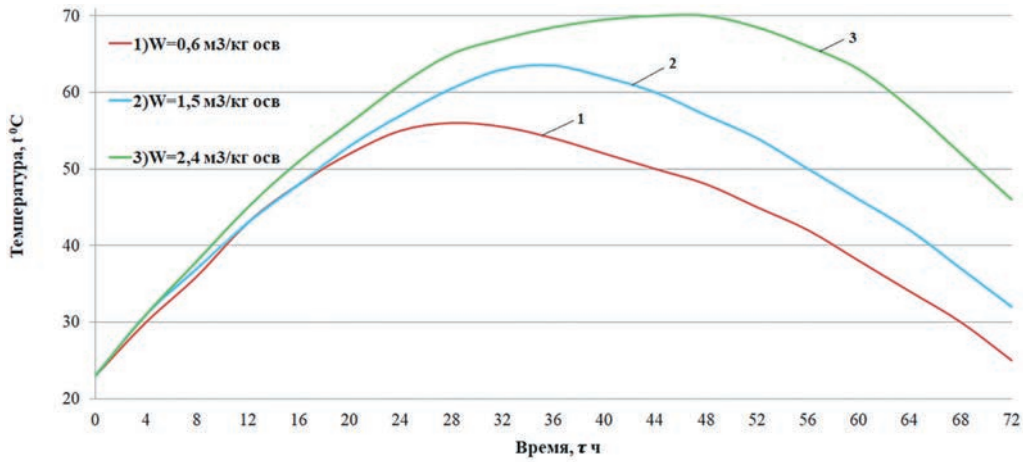


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость температуры досушивания твердых сепарированных отходов КРС от времени их самосогревания в аэробных условиях и удельного расхода воздуха для их обеспечения

воздуха в досушиваемый материал приводило только к снижению его температуры. Таким образом, можно установить предельное время осуществления процесса самосогревания, при котором продолжение подачи воздуха в досушиваемый материал нецелесообразно. Также установлено, что для досушиваемого материала с первоначальной влажностью 75 % время продолжения процесса самосогревания составляло 44 ч при удельной подаче воздуха не менее 2,4 м^3/кг ОСВ. Удельная подача воздуха ниже этого значения не обеспечивала достаточной эффективности процесса самосогревания навоза и достижения его температуры порядка 70 °С.

По результатам эксперимента, используя метод наименьших квадратов, вычисляли коэффициенты регрессии принятой полиномиальной модели. Свободный член определяли по следующей формуле:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} y_j, \tag{1}$$

где N – число опытов; j – номер опыта.

Тогда

$$b_0 = \frac{1}{4}\cdot\sum_{1}^{4}(43+46+26+46) = 40,25.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляли по следующему выражению:

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} X_i y_j, \tag{2}$$

Тогда

$$b_1 = \frac{1}{4}\cdot\sum_{1}^{4}\left[(-1)\cdot 43 + 1\cdot 46 + (-1)\cdot 26 + 1\cdot 46\right] = 5,25;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}\cdot\sum_{1}^{4}\left[(-1)\cdot 43 + (-1)\cdot 46 + 1\cdot 26 + 1\cdot 46\right] = -4,25.$$

Коэффициент регрессии, характеризующий эффект взаимодействия, определяли по формуле

$$b_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} X_i X_l y_j, \tag{3}$$

где i и l – номера факторов

$$b_{12} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{1}^{4} \left[1 \cdot 43 + (-1) \cdot 46 + (-1) \cdot 26 + 1 \cdot 46\right] = 4,25.$$

Функцию отклика выражали полиномом первой степени в виде следующего уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_i + b_2 x_2 + \ldots + b_k x_k + b_{12}\, x_1 x_2 + \ldots . \quad (4)$$

Таким образом, уравнение регрессии получили в следующем виде:

$$y = 40,25 + 5,25 X_1 - 4,25 X_2 + 4,25 X_1 X_2 . \quad (5)$$

Уравнение (5) неудобно для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому его преобразовали по формуле перехода от кодированных значений X_1, X_2 к натуральным значениям факторов W и τ

$$x_i = \frac{x_i - x_{io}}{\Delta x_i}, \quad (6)$$

где x_i, x_{io} и Δx_i – натуральные значения фактора, его основного уровня и интервала варьирования соответственно.

Тогда

$$x_1 = \frac{w - 1,5}{0,9}; \; x_2 = \frac{\tau - 42}{30}. \quad (7)$$

Таким образом, уравнение (5) с учетом соотношений (7) приняло следующий вид:

$$t = 81,63 - 22,25 W - 1,13\tau + 0,66 W \tau. \quad (8)$$

Полученная экспериментальным путем зависимость (8) позволяет аналитически рассчитать температуру сепарированных отходов в процессе их досушивания за счет самосогревания в аэробных условиях при различном удельном расходе подаваемого воздуха и времени протекания процесса.

Заключение

Самосогревание массы влажного органического материала является следствием протекания окислительного процесса в аэробных условиях. Достигаемая при этом температура зависит как от времени протекания процесса, так и от удельного расхода воздуха, приходящегося на единицу массы органического вещества.

Так, для твердого сепарированного навоза КРС с первоначальной влажностью 75 % при удельной подаче воздуха в объеме 0,6; 1,5 и 2,4 м^3/кг ОСВ максимальные температуры навоза достигали 56, 63 и 68 °С в течение 28, 36 и 44 ч соответственно.

При удельном расходе воздуха до 2,4 м^3/кг ОСВ не достигалось полного окисления органического материала, о чем свидетельствует рост его максимальной температуры. Увеличение удельного расхода воздуха выше значения 2,4 м^3/кг ОСВ не приводило к дальнейшему росту максимальной температуры органического материала, что свидетельствовало о его полном окислении.

Полученные экспериментальные данные позволяют устанавливать оптимальную воздухопроизводительность, а следовательно, и энергозатраты вентилятора для конкретной массы органического сырья в процессе его самосогревания.

Список использованных источников

1. Menear, J. R. Dairy-cattle manure liquid – solid separation with a screw press / J. R. Menear, L. W. Swith // Journal of animal Science. – 1973. – Vol. 36. – P. 788–791.

УДК 663.18+628.355.1

Поступила в редакцию 12.08.2025
Received 12.08.2025

Н. Ф. Капустин, В. К. Клыбик, Ю. А. Ракевич

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npcter@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОСОГРЕВАНИЯ ТВЕРДОГО СЕПАРИРОВАННОГО НАВОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА НА ЕГО ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВЛАГОПОГЛОЩАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности и влагопоглощающей способности для твердой фракций сепарированного навоза КРС, подсушенного за счет самосогревания при различных температурах.

Ключевые слова: твердый сепарированный навоз КРС, самосогревание, коэффициент теплопроводности, влагопоглощающая способность.

N. F. Kapustin, V. K. Klybik, Yu. A. Rakevich

RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npcter@yandex.ru

INFLUENCE OF SELF-HEATING TEMPERATURE OF SOLID SEPARATED CATTLE MANURE ON ITS THERMAL CONDUCTIVITY AND MOISTURE-ABSORBING CAPACITY

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the thermal conductivity coefficient and moisture absorption capacity for the solid fraction of separated cattle manure dried by self-heating at various temperatures.

Keywords: solid separated cattle manure, self-heating, thermal conductivity coefficient, moisture absorption capacity.

Введение

В настоящее время в Беларуси на молочно-товарных фермах и комплексах по содержанию крупного рогатого скота (КРС) ежегодно образуется 15 млн т полужидкого бесподстилочного навоза. При бесподстилочном содержании животные размещаются на резиновых матах или ковриках, уложенных по бетонному полу, а образующийся полужидкий навоз убирается с прохода в отводящий канал скреперно-насосным способом, не позволяющим использовать соломенную подстилку. В природно-климатических условиях Республики Беларусь особенно в холодный период года отсутствие подстилки приводит к некомфортному содержанию животных в местах их размещения. В то же время навоз КРС содержит большое количество непереваренных растительных волокон, которые после соответствующей обработки могут быть использованы в качестве материала для подстилки.

В зарубежной и отечественной практике имеется опыт использования в качестве подстилочного материала твердой фракции сепарированного и подсушенного за счет самосогревания навоза КРС. Подстилка предназначена для создания животным теплого, сухого и мягкого ложа. Для оценки эффективности подстилочного материала весьма важно иметь характеристики его теплопроводности и влагопоглощающей способности.

Основная часть

Цель экспериментальных исследований, описываемых в данной работе, состояла в получении зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагопоглощающей способности твердой фракции сепарированного полужидкого навоза КРС, в зависимости от температуры его самосо-

гревания. Зависимости такого рода позволяют оценить эффективность использования твердой фракции навоза КРС в качестве подстилочного материала.

Коэффициент теплопроводности количественно характеризует способность материала проводить тепловую энергию от более нагретых его частей к менее нагретым.

Влагопоглощение – это способность материла впитывать и удерживать воду, оно характеризуется ее количеством, поглощенным сухим материалом, полностью погруженным в воду, и выражается в процентах от его массы.

Температура самосогревания твердого сепарированного навоза КРС зависит от его первоначальной влажности, удельного объема воздуха, приходящегося на единицу массы органического вещества, и времени протекания его самосогревания в аэробных условиях. Как правило, эта температура лежит в пределах от 50 до 70 °С. Коэффициент теплопроводности исследуемых образцов определяли согласно СТБ 1618-2006 с помощью прибора ПИТ-2,1 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Определение коэффициента теплопроводности твердого сепарированного навоза КРС с помощью прибора ПИТ-2,1

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента теплопроводности ($К_т$) твердой фракции сепарированного навоза КРС от его температуры самосогревания (t), полученная в процессе экспериментальных исследований.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что при повышении температуры самосогревания твердой фракции сепарированного навоза КРС с 50 до 70 °С коэффициент его тепло-

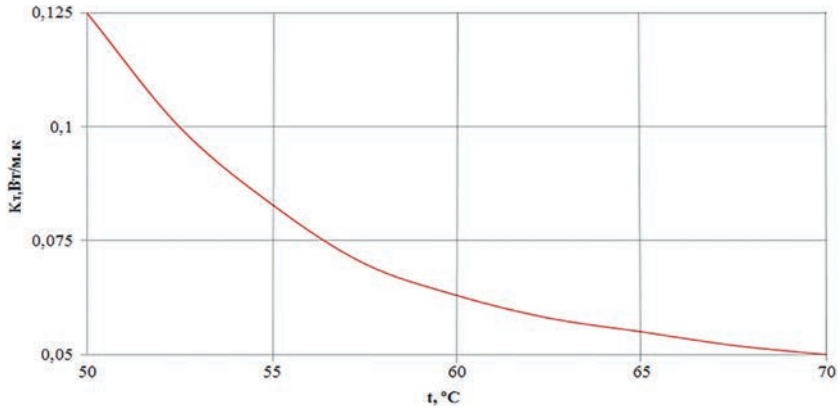


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности навоза КРС от температуры его самосогревания

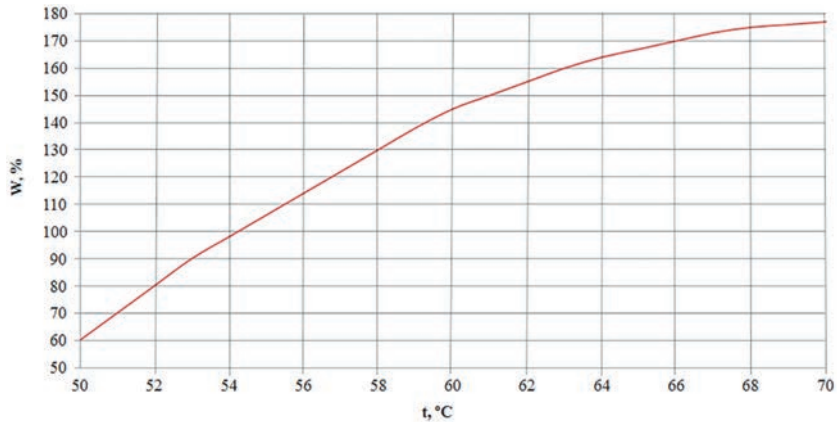


Рисунок 3 – Зависимость влагопоглощающей способности твердой фракции сепарированного навоза КРС от температуры его самосогревания в аэробных условиях

проводности уменьшается в 2,5 раза. При этом его значение составляет 0,05 Вт/(м·К), что свидетельствует о высоких теплоизолирующих свойствах твердого сепарированного подсушенного за счет самосогревания навоза КРС при его использовании в качестве подстилочного материала.

На рисунке 3 представлена экспериментальная зависимость влагопоглощающей способности твердой фракции сепарированного навоза КРС от температуры его самосогревания в аэробных условиях. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что при увеличении температуры самосогревания исследуемого материала с 50 до 70 °С его влагопоглощающая способность увеличивается в три раза, достигая 170 % (т. е. 1 кг навоза КРС поглощает 1,77 кг влаги).

Заключение

При температуре самосогревания в аэробных условиях твердой фракции сепарированного навоза КРС, равной 70 °С, коэффициент его теплопроводности составляет 0,05 Вт/(м·К), а влагопоглощающая способность достигает 177 %, что свидетельствует об эффективности использования такого материала в качестве подстилки для животных.

УДК 636.084

Поступила в редакцию 17.11.2025
Received 17.11.2025

Д. Ф. Кольга[1], Н. Н. Быков[1], С. А. Костюкевич[1], В. В. Кунц[2], Е. Л. Жилич[3]

[1] УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: ktmg@bsatu.by
[2] ЗАО «АСБ-Агро Кухтичи»
Минская область, д. Кухтичи, Республика Беларусь
[3]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: belagromeh.by

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ СУХОГО ВЕЩЕСТВА И ВЛАЖНОСТИ КОРМОВОЙ СМЕСИ ПРИ КОРМЛЕНИИ КОРОВ

Аннотация. На потребление сухого вещества корма влияет влажность кормовой смеси. Высокоудойным коровам желательно потреблять сухого вещества в сутки 24–26 кг. Содержание сухого вещества в рационе от 32–35 % является оптимальным для продуктивности коров. На потребление сухого вещества влияет длина резки, которая зависит от влажности. Оптимальная влажность кормовой смеси составляет 55 %. При скармливании переувлажненных кормовых смесей (влажностью около 80 %) деятельность слюнных желез приостанавливается, а время, которое корова тратит на жвачку, сокращается до 2–3 ч в сутки, что способствует развитию ацидоза рубца. При пониженной влажности коровы потребляют меньше корма из-за его сухости и плохой переваримости, возрастают проблемы с пищеварением (запоры).

Ключевые слова: сухое вещество, кормовая смесь, влажность корма, корова, рацион, длина кормовых частиц.

D. F. Kolga[1], N. N. Bykov[1], S. A. Kastsiukevich[1], V. V. Kuntz[2], E. L. Zhilich[3]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University" Minsk, Belarus
E-mail: ktmg@bsatu.by
[2]CJSC "ASB-Agro Kukhtichi"
Minsk region, v. Kukhtichi, Republic of Belarus
[3]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: belagromeh.by

OPTIMIZATION OF DRY MATTER CONSUMPTION AND FEED MIXTURE MOISTURE IN COW FEEDING

Abstract. The consumption of dry matter in feed is affected by the moisture content of the feed mixture. It is advisable for high-yielding cows to consume 24–26 kg of dry matter per day. The most effective productivity of cows is achieved when the dry matter content in the diet is 32–35 %. The length of the cutting, which depends on the moisture content, plays an important role in the consumption of dry matter. The optimal moisture content of the feed mixture is 55 %. When feeding over-moist feed mixtures with a moisture content of about 80 %, the salivary glands stop functioning, and the time spent by the cow on ruminating is reduced to 2–3 hours per day, what contributes to the development of rumen acidosis. When the humidity is low, cows consume less feed due to its dryness and poor digestibility, which can lead to digestive problems (constipation).

Keywords: dry matter, feed mixture, feed moisture, cow, diet, feed particle length.

Введение

Знание оптимального содержания питательных веществ в рационе дойного стада и разработка рациональной системы кормления позволяют не только максимально реализовать их потенциальную продуктивность, но и повысить эффективность использования кормов в животноводстве.

Значительный успех в животноводстве получен благодаря внедрению прогрессивных систем нормирования питания животных и оценки питательности кормов, что позволяет более точно, с учетом физиологических и биохимических особенностей организма животных, организовать их полноценное кормление.

Основой кормления дойного стада коров является содержание в корме питательных и других жизненно важных веществ. Для этого необходимо проводить зоотехнический анализ кормов, определять содержание сухого вещества, обменной энергии и таких групп питательных веществ, как сырые протеин, жир и клетчатка, а также безазотистые экстрактивные вещества и сырая зола. При проведении анализа необходимо определять содержание в корме сухого вещества и воды.

Полноценное кормление животных основано на удовлетворении их потребности в энергии и отдельных элементах питания с учетом их взаимовлияния [1].

Сухое вещество в рационе является носителем энергии и самых разных элементов питания. Недостаточное потребление сухого вещества часто сопряжено с недополучением животными энергии и снижением продуктивности. Обеспечение сухим веществом коров со среднесуточным удоем 20–30 кг должно быть на уровне 28–32 кг.

Соотношение кормов в рационе и их качество приобретают в этом случае особое значение. Продуктивность дойного стада коров зависит не только от количества потребляемого сухого вещества, но и от концентрации в нем энергии, т. е. от содержания энергии в 1 кг сухого вещества. Это говорит о том, что рацион кормления должен быть сбалансирован по питательности. Нельзя допустить существенного избытка одних и недостатка других питательных веществ, в противном случае корма будут использованы неэффективно [2, 3].

Нормированное кормление невозможно без знания о питательности отдельных кормов и рационах. При составлении рационов можно пользоваться справочными данными, но химический состав и питательность травянистых кормов чрезвычайно разнообразны, а данные справочников являются средними и могут существенно отличаться от показателей химического состава конкретного корма, так как в условиях того или иного хозяйства кормовая ценность зеленых кормов может быть совершенно разной. Между справочной и фактической питательностью разница может достичь 20–30 %.

Потребность – это нужда организма в элементах питания. Она выражается в количестве энергии или вещества, необходимого для обеспечения нормальной жизнедеятельности организма, его развития и получения ожидаемой продуктивности. Особое внимание следует обратить на обеспечение необходимым количеством сухого вещества. Потребность в сухом веществе зависит от живой массы, физиологического состояния и продуктивности коров. В связи с этим очень важно знать продуктивность коров, выращенных в конкретном хозяйстве.

Эффективность нормирования во многом обусловлена стабильностью кормления. Резкое изменение состава рациона, перебои в доставке корма, нарушения распорядка кормления приводят к значительному снижению продуктивности. Восстановить в таком случае продуктивность не всегда удается [4].

Эффективное производство молока должно основываться на потреблении достаточного количества травянистых кормов. Их должно быть столько, чтобы животные могли потреблять практически вволю. Соотношение этих кормов (сенаж, силос, сено) может быть разным. Количество зависит от принятого в хозяйстве типа кормления, концентрации энергии в сухом веществе и продуктивности дойного стада [5, 6].

Сухое вещество кормов является носителем энергии и всех элементов питания, необходимых животному. Продуктивность дойного стада находится в прямой зависимости от количества и качества потребляемого сухого вещества. Необходимо, чтобы коровы получали такое количество сухого вещества, которое соответствовало бы их физическому состоянию, живой массе и фактической молочной продуктивности. В период раздоя коровам предлагается рацион с большим, чем требуется количеством сухого вещества и энергии. При свободном доступе к одному корму высокопродуктивные коровы будут страдать из-за недостатка сухого вещества. Если дать больше, чем необходимо, то у животных пропадает аппетит, часть корма остается на кормовом столе. Недостаток сухого вещества приводит к расстройству пищеварения.

При увеличении надоев количество потребляемого сухого вещества существенно увеличивается. Сколько сухого вещества коровы потребляют при кормлении хорошо сбалансированным рационом можно определить по справочным данным. В каждом конкретном случае животные могут потреблять несколько больше или меньше сухого вещества. На потребление его оказывают влияние температура воздуха, влажность смеси корма, длина резки грубых кормов, содержание сухого вещества в кормах, вид корма, его вкусовые качества, кратность раздачи корма. На потребление сухого вещества сильно влияет стресс животных (неблагоприятные погодные условия, заболевания, шум в помещении, плохая экология, вентиляция, освещение и др.) [7, 8].

Очень важно знать влажность кормовой смеси. Необходимо ежедневно проводить контроль количества получаемого молока и потребление сухого вещества. Влажность кормовой смеси должна находиться в пределах 50–55 %. Это оптимальная влажность кормовой смеси для максимального потребления сухого вещества. Если влажность составляет более 55 %, то корм быстро преет и поедаемость уменьшается. При сухом рационе корм животными подвергается сортировке и потребление сухого вещества уменьшается. При сортировке корма корова его раздвигает в поиске комбикорма, она затрачивает при этом в два раза больше времени на потребления такого же количества корма, в результате удой молока сокращается до 10–15 % [9, 10].

Одно из условий составления рациона для дойного стада – исследование качества кормов в конкретном хозяйстве, а не использование средних данных по району. Необходимо контролировать фактическое потребление сухого вещества в хозяйстве. При расчете потребления сухого вещества важно знать влажность кормовой смеси и определять ее одним и тем же прибором и методикой. В журнале нужно отмечать ежедневно поедаемость сухого вещества и продуктивность коров. Не рекомендуется перекармливать животных концентрированными кормами, а также изменять содержание в структуре рациона основных и концентрированных кормов. Необходим свежий корм после дойки коров, кормовые смеси рациона не рекомендуется резко изменять. Должен быть обеспечен свободный доступ коров к воде хорошего качества. Существенно влияет на потребление сухого вещества и суточный удой температура и влажность воздуха в коровнике.

Потребление сухого вещества – это фундамент, на основе которого рассчитывается рацион для дойного стада коров. Рацион должен содержать такое количество питательных веществ, которые необходимы для высокого уровня производства молока при более низких затратах. Понимание факторов, оказывающих влияние на потребления сухого вещества, – основной компонент в реализации программы кормления. Расчетные и приготовленные в виде кормовой смеси рационы редко соответствуют по физическим характеристикам, если не подвергаются определенному контролю [10].

Разработано большое количество аналитических зависимостей расчета потребления сухого вещества. Например:

$$СВ = 0{,}0185 \times \frac{ЖМ}{100} + 0{,}138 \times У, \text{ кг},$$

где СВ – сухое вещество в рационе, кг; ЖМ – живая масса коровы, кг; У – планируемый средний суточный удой на одну корову в пересчете на 4 % молоко, кг.

По данному уравнению регрессии невозможно определить потребление сухого вещества. Так в таблице 3.1 [11], автор указывает, что при среднесуточном удое 14 кг молока потребность в сухом веществе составляет 15,5 кг при массе животного 500 кг. Подставляя эти данные в уравнение, получаем другие значения (2,02 кг молока), что не соответствует табличным данным. Следовательно, такой формулой пользоваться затруднительно, она не достоверна.

Потребление сухого вещества можно рассчитать по содержанию НДК в кормовой смеси по следующей формуле:

$$СВ = 120 : НДК \times ЖМ : 100, \text{ кг},$$

где СВ – потребление сухого вещества животным в день, кг; НДК – нейтрально-детергентная клетчатка, кг; ЖМ – живая масса коровы, кг.

Авторы Леонард Дурст и Маргит Виттман в учебнике «Кормление основных видов сельскохозяйственных животных» приводят следующее уравнение, определяющее потребления сухого вещества в рационе [12]:

$$СВ = ЖМ \times 0{,}011 + 0{,}3 \times У + 4, кг,$$

где СВ – потребление сухого вещества рациона, кг; ЖМ – живая масса коровы, кг; У – планируемый среднесуточный удой молока на корову, кг.

Сравнивая эти уравнения, можно удостовериться, что они не дают определения точного потребления сухого вещества коровами, так как не учитывают основные факторы, влияющие на поедаемость.

Основная часть

Цель наших исследований – определить потребление сухого вещества коровами с учетом следующих факторов: влажности кормовой смеси, длины резки кормовых частиц, молочной продуктивности коров.

Исследования по определению влажности кормовой смеси, получаемой коровами, проводили в филиале «Минский» ОАО «Агрокомбинат Дзержинский».

В 2024 г. при заготовке силоса из кукурузы была очень сухая погода. Силос получился слишком сухой и при составлении рациона влажность кормовой смеси была менее 40 %, что отрицательно сказывается на поедаемости кормов и продуктивности дойного стада.

Влажность определяли прибором Wile-26 (определение влажности фуража).

Чтобы определить содержания сухого вещества в силосуемой массе, берем 100 г измельченной массы на тарелке (учитываем вес тарелки). Массу равномерно распределяем по тарелке и ставим ее в микроволновую печь. Нагреваем при высокой температуре 4 мин. Затем взвешиваем, вычитаем массу тарелки и записываем результат. Повторяем опыт в течение 1 мин, и до тех пор, пока масса не перестанет изменяться. Это и есть содержание сухого вещества в силосуемой культуре в граммах.

Важнейшим показателем физического фактора является величина частиц корма. Для определения длины частиц корма используют Пенсильванскую сортирующую систему кормовых частиц, которая позволяет определить в рационе правильное соотношение длины частиц, необходимых для того, чтобы удовлетворить ряд пищеварительных потребностей дойных коров.

Потребление сухого вещества во многом зависит от длины резки грубых кормов. Грубые корма должны измельчаться до определенной величины в зависимости от влажности. При кормлении полноценной кормовой смесью с длинно нарезанными частицами силоса коровы усваивали ежедневно по 25,69 кг сухого вещества. После замены в кормовой смеси силоса с коротко нарезанными частицами усвояемость увеличилась на 0,4 кг, т. е. до 26,1 кг на корову (рисунок 1).

Уменьшение размера частиц грубого корма, как правило, снижает время переваримости и увеличивает потребление сухого вещества, по сравнению с более длинными кормовыми частицами.

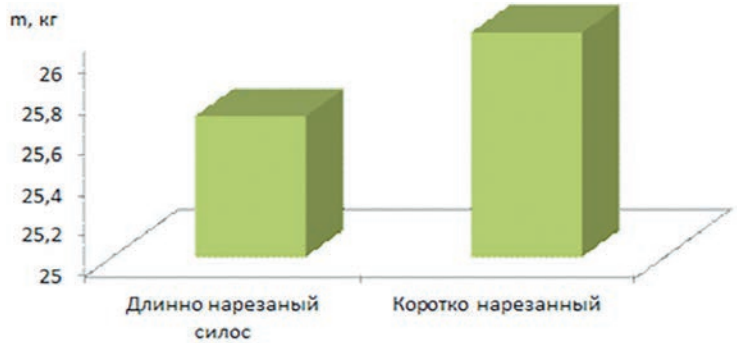


Рисунок 1 – Влияние длины измельчения частиц силоса на усваиваемость сухого вещества



Рисунок 2 – Влияние длины измельчения частиц силоса на количество потребляемой клетчатки в день

Длина кормовых частиц, как показано на рисунке 2, главным образом сказывается на скорости перехода и времени нахождения кормовых масс в преджелудках коровы, и соответственно, на количество потребляемого корма.

Из анализа литературных источников можно сделать вывод: чем больше сухих веществ в массе корма, тем короче должны быть измельчены грубые корма. Следовательно, при каждом конкретном содержании сухих веществ должна быть оптимальная длина резки кормовых частиц.

На рисунке 3 видим, что мелко нарезанные грубые корма снижают время переваримости и увеличивают потребление сухого вещества по сравнению с более длинными кормовыми частицами.

Длина кормовых частиц главным образом влияет на скорость перехода и время нахождения кормовых масс в преджелудках, а соответственно, и на потребляемость корма.

Чем больше сухих веществ в массе, тем короче должны быть измельченные грубые корма. Следовательно, при каждом конкретном содержании сухих веществ должна быть оптимальная длина резки кормовых частиц.

Если засуха наступает намного раньше уборки, то степень измельчения подсохшей кукурузы, содержащей до 40 % сухого вещества, должна составлять не менее 8 мм.

С увеличением влажности кормосмеси (более 60 %) возрастает риск обратной ферментации кормов непосредственно на кормовом столе. В результате кормосмесь согревается, выделяет резкий запах, что воздействует на животных отпугивающе. По этой причине нужно планировать однократное, двух- или трехкратное кормление скота. При достаточном содержании сухих веществ (более 40 %) кормовую смесь предпочтительно раздавать два раза в сутки.

При влажности кормовой смеси менее 45 % происходит расслоение кормовой смеси, концентрированные корма просыпаются на кормовой стол, а грубые корма остаются сверху. Коровы перебирают корм и на кормовом столе образуются так называемые бугры. При этом корова



Рисунок 3 – Влияние длины измельчения частиц силоса на время пережевывания

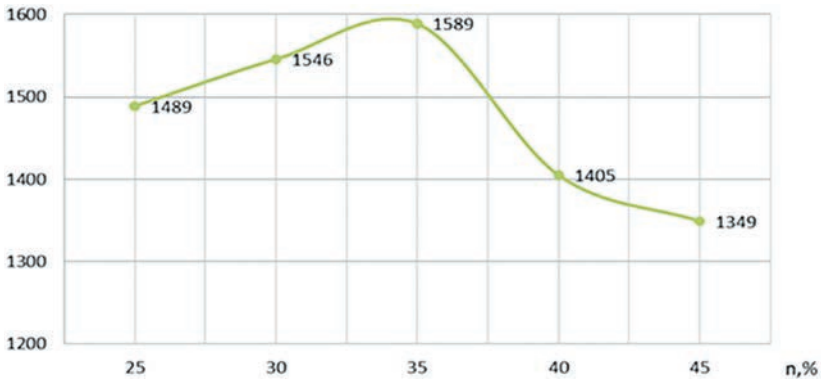


Рисунок 4 – Влияние содержания сухого вещества на выход молока

на одно и то же потребление сухого вещества затрачивает больше времени и продуктивность падает примерно на 10–15 %.

Наиболее оптимальная влажность кормовой смеси составляет 50–55 %. Для достижения такой влажности необходимо было добавлять определенное количество воды. Количество воды, которое необходимо добавить в кормовую смесь, определяли по формуле

$$K_{H_2O}\frac{G(W_{тр}-W_{см})}{100-W_{тр}},$$

где G – количество корма, которое необходимо раздать животным, кг; $W_{тр}$ – требуемая влажность кормовой смеси, %; $W_{см}$ – действительная влажность кормовой смеси, %.

Анализируя кормовую смесь по влажности и процентное соотношение по массе каждого корма, определяем влажность. Например, силос влажностью 65 %, сенаж – 40 %, сено – 20 %, концентрированные корма – 14 %. Их количество в рационе брали в соответствии с данными хозяйства. Средняя влажность кормовой смеси составила 40–42 %.

При такой влажности кормовой смеси необходимо добавлять воды примерно 33 %, т. е. на 1 т смеси 330 кг воды. Необходимо строго соблюдать порядок загрузки кормов: сено, сенаж, силос перемешивать с добавлением воды. Затем в полученную кормосмесь добавлять концентрированные корма.

Количество молока, получаемого от одной коровы при потреблении кукурузного силоса с различным содержанием сухого вещества в тоннах, показано на рисунке 4.

Анализ графика позволяет сделать вывод, что наибольшая продуктивность животного – при потреблении силоса с содержанием 35 % сухого вещества. Молочная продуктивность коров увеличивается за счет улучшения питательных и качественных характеристик силосуемой массы.

Увеличение поедаемости сухого вещества приводит к повышению молочной продуктивности коров, валовому производству молока и, следовательно, к снижению удельных затрат на его производство.

Заключение

Высокоудойные коровы должны потреблять сухого вещества в сутки 28–32 кг. Оптимальная влажность кормовой смеси находится в пределах 55 %, чтобы достичь такой влажности необходимо добавлять воду, количество которой определяется в зависимости от влажности смеси непосредственно в хозяйстве.

На потребление сухого вещества существенно влияет длина резки кормовых компонентов, которая зависит от влажности корма.

Наиболее эффективная продуктивность коров достигается при содержании сухого вещества в рационе 32–35 %.

Список использованных источников

1. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных : справочное пособие / А. П. Калашников, В. И. Фисинин, В. В. Щеглов, Н. И. Клейменов. – М. : Урожай, 2003. – 196 с.

2. Пути повышения рентабельности производства молока / Н. С. Яковчик, Н. П. Разумовский, Д. Т. Соболев // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК : материалы III междунар. науч.-практ. конф., Минск, 7 июня 2023 г. ; Бел. гос. агр. техн. ун-т. – Мн. : БГАТУ, 2023. – С. 55–64.

3. Организационно-технологические требования при производстве молока на молочных комплексах промышленного типа: республиканский регламент. – Мн. : РУИП «Белорусское сельское хозяйство», 2014. – 105 с.

4. Оптимизация рационов коров по принципу адресного кормления / Н. С. Яковчик, Н. П. Разумовский, О. Ф. Ганущенко, Л. А. Возмитель // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК : материалы III междунар. науч.-практ. конф., Минск, 7 июня 2023 г. ; Бел. гос. агр. техн. ун-т. – Мн. : БГАТУ, 2023. – С. 196–201.

5. Попков, Н. А. Промышленная технология производства молока : монография / Н. А. Попков, В. Н. Тимошенко, А. А. Музыка. – РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству». – Жодино, 2018. – 228 с.

6. Казакевич, П. П. Технологическая концепция «умная» молочная ферма : монография // П. П. Казакевич, Н. В. Тимошенко, А. А. Музыка. – РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству». – Жодино, 2021. – 244 с.

7. Кердяшов, Н. Н. Особенности кормления высокопродуктивных животных : учеб. пособие / Н. Н. Кердяшов. – Пенза : РИО ПГСХА, 2015. – 190 с.

8. Лопотко, А. М. Тайны молочных рек : учеб.-метод. пособие: в 2 ч. / А. М. Лопотко. – Орел, 2019. – 487 с.

9. Измельчение кукурузы: резать кукурузу длинно или коротко? / А. В. Федоренко, П. С. Борисов // Современная сельхозтехника и оборудование. – 2017. – № 1. – С. 108–111.

10. О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 1 февр. 2021 г. № 59 : Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100059 (дата обращения: 06.10.2025).

11. Эффективность балансирования рационов высокопродуктивных коров по принципу адресного кормления / Н. С. Яковчик, Н. П. Разумовский, О. Ф. Ганущенко // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК : сб. науч. ст. II междунар. науч.-практ. конф., Минск, 9–10 июня 2022 г. / Бел. гос. агр. техн. ун-т. – Мн. : БГАТУ, 2022. – С. 36–40.

12. Кормление сельскохозяйственных животных / под ред. Л. Дурст, М. Виттман. – Винница : Новая книга, 2003. – 384 с.

УДК 631.3

Поступила в редакцию 12.01.2026
Received 12.01.2026

В. А. Бурдейко[1], В. Б. Ловкис[2], Э. В. Дыба[3]

[1]УО «Барановичский государственный университет»
г. Барановичи, Республика Беларусь
E-mail: V_A_Victor@mail.ru
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dekanat.amf@bsatu.by
[3]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧЕСЫВАНИЯ ОСОБЕЙ КОЛОРАДСКОГО ЖУКА КОНИЧЕСКОЙ ЩЕТКОЙ МАШИНЫ

Аннотация. В статье рассмотрены теоретические предпосылки исследования процесса очесывания колорадского жука с ботвы картофеля конической щеткой. Приводятся формулы силового расчета, расчета параметров и прогиба ворса.

Ключевые слова: колорадский жук, щетка, ворс, сила, прогиб ворсины.

V. A. Burdeyko[1], V. B. Lovkis[2], E. V. Dyba[3]

[1] UO "Baranavichy State University"
Baranovichi, Republic of Belarus
e-mail: V_A_Victor@mail.ru
[2] UO "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dekanat_amf@bsatu
[3]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru

THEORETICAL BACKGROUND FOR THE STUDY OF THE PROCESS OF CLEANING OF COLORADO POTATO BEETLE INDIVIDUALS WITH A CONICAL BRUSH OF A MACHINE

Abstract. The article develops theoretical prerequisites for studying the process of brushing the Colorado potato beetle from potato tops with a conical brush. Formulas for calculating the force, calculating the parameters and deflection of the pile are given.

Keywords: colorado potato beetle, brush, pile, force, deflection of the pile.

Введение

Зеленая экономика уже давно стала центральной темой в глобальной повестке дня производства сельскохозяйственных продуктов. Беларусь не отстает от мирового тренда. 9 ноября 2018 г. Президент подписал Закон Республики Беларусь № 144-З «О производстве и обращении органической продукции». В главе 1 «Общие положения» (статья 4) говорится, что «объектами отношений в области производства и обращения органической продукции являются семена, процессы производства и обращение органической продукции» [1].

Сегодня можем говорить о том, что выращивание экологически чистого картофеля подтверждается Законом Республики Беларусь «О производстве и обращении органической продукции».

Метод механического сбора колорадского жука, одного из главных вредителей урожая картофеля, является актуальным и перспективным для небольших объемов производства.

Основными рабочими органами устройства для сбора колорадского жука являются коническая щетка, лоток и два эластичных копира.

В процессе проведенных исследований авторами опубликованы сведения о машине для сбора особей колорадского жука, ее рабочих органах, расчеты параметров машины, математическое моделирование процесса удаления колорадского жука с ботвы [2–7].

Исследованием технологической операции сбора и утилизации колорадского жука занимались ученые П. П. Казакевич, В. К. Пестис, Э. В. Заяц, П. В. Заяц, С. Н. Ладутько и др.

Основная часть

При проектировании машины для сбора колорадского жука необходимо рационально выполнить компоновку ее составных частей. Правильная установка рабочих органов влияет одновременно на производительность и качество работы машины. Наиболее эффективными рабочими органами являются конические и прямолинейные щетки, гофрированные боковины и отбойник. Коническая щетка имеет более сложную конструкцию по сравнению с другими рабочими органами [8].

Анализ известных конструкций машин для сбора колорадского жука и их рабочих органов позволяет сделать вывод о том, что данные машины малопроизводительны, имеют высокую металлоемкость и энергопотребление, а также низкое качество работы – 30–45 % особей колорадского жука остается на картофельном поле. Приблизительно половина вредителей остается на ботве, а остальная часть ссыпается на поверхность гребня вокруг стеблей картофеля. Чтобы устранить вышеуказанные недостатки, разработана конструкция машины для сбора колорадского жука с рабочими органами нового типа.

Наиболее перспективными являются комбинированные счесывающе-вибрационные или счесывающе-ударные рабочие органы на основе применения эластичных материалов для снижения травмирования ботвы. Для повышения полноты сбора целесообразно применять горизонтальные, вертикальные и комбинированные щетки с регулировкой углов наклона в различных направлениях в зависимости от сорта картофеля и периода его роста [8].

Рабочими органами в машине для сбора колорадского жука служат конические щетки, гофрированные боковины и рифленые пруты-ударники. Каждая конусообразная щетка выполнена в форме перевернутого усеченного конуса и закреплена на вертикальной оси с возможностью свободного вращения. Диаметр большего основания конуса – в пределах от 0,35 до 0,60 м, меньшего – 0,05–0,15 м. Непосредственное воздействие на листву картофеля оказывают эластичные прутки, изготовленные из капроновой нити диаметром 1–2 мм [9].

Воздействие ворса на листья ботвы зависит от линейной и угловой скоростей щеток. В момент касания ворса щетки о листья ботвы происходит удаление особей колорадского жука путем очесывания. Это точки *C* и *D* (рисунок 1).

Абсолютная скорость ворсинок $\vartheta_{аб}$ в точке *B* позиционирования щетки (позиция I) может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\vartheta_{аб} = \sqrt{\omega^2 \left(L_в + \frac{d_б}{2} \right)^2 + \left(\frac{L_с}{t_с} \right)^2}, \text{ м/с},$$

где ω^2 – угловая скорость, $с^{-1}$; $L_в$ – длина ворсинки, м; $d_б$ – диаметр барабана щетки, м; $L_с$ – линейное перемещение ворсинки, м, за время $t_с$; $t_с$ – время рабочего периода ворсинки, с.

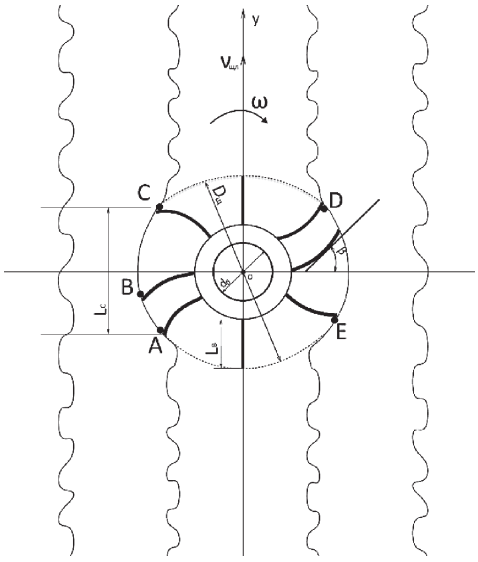


Рисунок 1 – Схема взаимодействия щетки с ботвой и особями колорадского жука

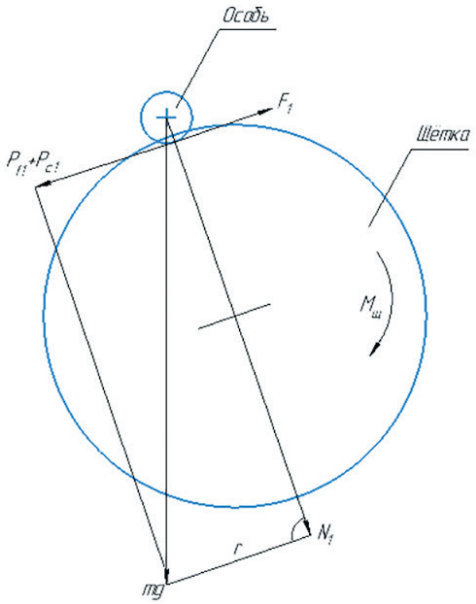


Рисунок 2 – Динамика особи

При очесывании ботвы наиболее тяжело удаляются неразвитые, прилипшие к листьям ботвы особи колорадского жука. При этом действие ворсинок на ботву сопровождается их ударами, травмированием и отбрасыванием ворсинками вредителей. Полное окружное усилие P на ворсе щетки складывается из силы P_1 на удар и силы P_2 на волочение и отбрасывание особей колорадского жука, т. е.

$$P = P_1 + P_2, H.$$

Силу удара P_1 можно определить из условия равенства импульса силы P_1 изменению количества движения особей колорадского жука, т. е.

$$P_1 \Delta t = m_ж \left(\vartheta_2 - \vartheta_1 \right),$$

где Δt – продолжительность времени удара, с; $m_ж$ – масса особей, по которым наносятся удары, кг; ϑ_2 – скорость массы особей в конце удара, м/с; ϑ_1 – скорость движения массы в начале удара, м/с.

Для рассмотрения процесса очесывания единичной особи ворсиной щетки возьмем поперечное сечение щетки и особи (рисунок 2). На особь действует сила тяжести *mg*, сила трения *F* щетки об особь, вращающий момент $M_щ$.

Для очистки особей щеткой необходимо, чтобы выполнялся ряд условий, наиболее полно рассмотренных А. В. Дервишем, С. А. Найдановым: линейные скорости особи и щетки в точке контакта должны быть различные, ворсины щетки должны быть упруго деформированными и очесывать особи, расположенные на нижней поверхности листьев ботвы, и должны выполняться следующие неравенства (для нашего случая):

$$F_1 = N_1 f_1 \geq P_{c1} + P_{f1}, \quad (1)$$

где f_1 – коэффициент трения скольжения щетки о особь колорадского жука; P_{c1} – соответственно сила сопротивления особи колорадского жука; P_{f1} – сила трения щетки об особь; N_1 – нормальная сила между щеткой и особью.

После проведения соответствующих преобразований условия осуществления процесса очесывания примут следующий вид:

$$N_1 \geq \frac{\pi r_{пр} \tau_{сд} \left(\dfrac{\theta_n}{C F_{пр} \sin\alpha_1} - r_{пр} \operatorname{tg}\alpha_1 \right)}{f_1}, \quad (2)$$

где $r_{пр}$ – радиус ворсины, м; $\tau_{сд}$ – удельное сопротивление особи сдвигу ее по поверхности листа ботвы, Па; θ_n – сопротивление особи ворсине, Н; С – объемный коэффициент смятия ворсины, $Па^{-1}$; $F_{пр}$ – площадь сечения ворсины, $м^2$; α_1 – угол при вершине деформированной ворсины, град.

В исследуемом устройстве для очесывания особей колорадского жука ворсины щетки закреплены параллельно горизонтальной плоскости.

В представленной конструкции выполняются все ограничения и допущения, чтобы взаимодействие ворсины щетки и особи, лежащей на нижней поверхности листа ботвы, можно было рассматривать как динамический удар: в ворсине возникают напряжения, не превосходящие предела пропорциональности, и закон Гука при ударе сохраняет свою силу; лист ботвы является жестким телом и не деформируется; удар является неупругим.

В результате со стороны ворсины на лист будет действовать сила динамического удара $P_д$:

$$P_д = P_{ст} K_д; \tag{3}$$

где $P_{ст}$ – статическая сила; $K_д$ – динамический коэффициент удара.

Динамический коэффициент удара определяем по общеизвестной формуле

$$K_д = 1 + \sqrt{\frac{\nu^2}{g\delta_{ст}}}; \tag{4}$$

где $\delta_{ст}$ – статическая деформация прутка от силы $P_{ст}$; ν – линейная скорость конца прутка.

Для определения $P_д$: необходимо найти значение статической силы $P_{ст}$, действующей на ворс со стороны листа, и деформации ворса щетки от действия этой силы.

Рассмотрим схему, описывающую характер нагружения ворсины (рисунок 3). Чтобы найти значение силы $P_{ст}$, необходимо силу нормального давления N спроецировать на прямую, соединяющую центр тяжести листа с точкой соприкосновения особи и ворсины.

$$P_{ст} = N\cos\varphi, \tag{5}$$

где φ – угол между направлениями действия сил N и $P_{ст}$.

Статическую силу разложим на две составляющие

$$\begin{cases} P_в = P_{ст}\cos\varphi; \\ P_г = P_{ст}\sin\varphi. \end{cases}$$

Или, подставив в (8) значение силы $P_{ст}$ из (7), определим следующее:

$$\begin{cases} P_в = N\cos^2\varphi; \\ P_г = \dfrac{1}{2} N\sin^2\varphi. \end{cases} \tag{7}$$



Рисунок 3 – Действие силы, проходящей через фиксированную точку *A*

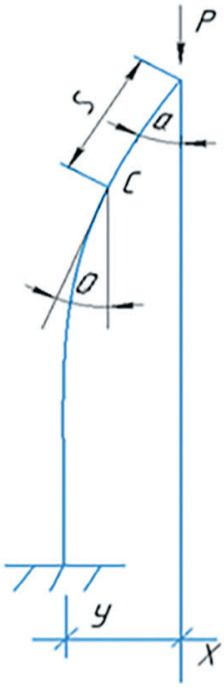


Рисунок 4 – Расчетная схема ворса при действии вертикальной нагрузки

Подобный случай приложения поперечной силы рассмотрен С. П. Тимошенко, который пришел к выводу, что влияние горизонтальной силы для сплошных стержней практически не имеет значения. Таким образом, приходим к расчетной схеме ворсины (рисунок 4).

Точное дифференциальное уравнение упругой линии ворсины в этом случае будет иметь следующий вид:

$$Er\frac{d\theta}{ds} = -PY; \tag{8}$$

где S – криволинейная координата текущей точки C; θ – угол между касательной к линии ворсины и осью OX; $\frac{d\theta}{ds}$ – точное значение кривизны осевой линии ворсины в точке.

Решая это уравнение, С. А. Найданов определил прогибы конца стержня в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Горизонтальное перемещение

$$Y = \frac{2Zl_{\text{пр}}}{K(Z^2)}, \tag{9}$$

где $Z = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$; α – угол между касательной к линии прутка и осью OX; $K(Z^2)$ – полный эллиптический интеграл в нормальной форме Лежандра (первого порядка).

Вертикальное перемещение

$$X = 2l_{\text{пр}}\left[1 - \frac{E(Z^2)}{K(Z^2)}\right], \tag{10}$$

где $E(Z^2)$ – полный эллиптический интеграл в нормальной форме Лежандра (второго порядка).

Таким образом, подставляя в выражение (3) значения статической нагрузки $P_{\text{ст}} = P_{\text{в}}$, определив по формулам (9) и (10) значения прогиба ворсины щетки от нагрузки $P_{\text{ст}}$, можно найти силу динамического удара и необходимую длину ворсины $L_{\text{в}}$ щетки по формуле

$$P_{\text{д}} = K_{\text{д}} N\cos^2\varphi. \tag{11}$$

Для нормальной работы устройства для очесывания особей необходимо, чтобы они не перебрасывались через желоб.

Заключение

Теоретически обоснована динамическая сила, действующая на листья картофельной ботвы в процессе очесывания с них особей колорадского жука. По вышеприведенным формулам можно произвести силовой расчет воздействия ворса на листья ботвы и особи колорадского жука, а также расчет параметров ворса и расчет его прогиба.

Таким образом, математическая модель работы щетки для удаления колорадского жука может быть полезным инструментом для оптимизации процессов очесывания вредителей картофеля, уменьшения травмирования листьев картофельной ботвы и повышения технической готовности устройства для борьбы с колорадским жуком.

Список использованных источников

1. О производстве и обращении органической продукции : Закон Респ. Беларусь от 9 ноября 2018 г. № 144-З : принят Палатой представителей 2 октября 2018 г. ; одобр. Советом Респ. 24 окт. 2018 г. / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Мн., 2026. – URL: https://etalonline.by/document/?regnum=H11800144 (дата обращения: 10.11.2025).

2. Бурдейко, В. А. Расчет щеток машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». – 2021. – Вып. 9. – С. 53–58.

3. Бурдейко, В. А. Результаты предварительных испытаний новых рабочих органов машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 20 дек. 2018 г., Барановичи ; редкол. В. В. Климук [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2018. – С. 136–137.

4. Бурдейко, В. А. Машина для удаления колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. М. Дыдышко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч ст. 6-й Междунар. науч-практ. конф., 2 ноября 2022 г., Гомель. – Гомель : Гомсельмаш, 2022. – С. 233–237.

5. Бурдейко, В. А. Техническая характеристика ворсинок щетки для счесывания колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч-практ. конф., 24–25 ноября 2022 г. Минск. – Мн. : БГАТУ, 2023. – С. 219–222.

6. Бурдейко, В. А. Расчет параметров лотка и копиров машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис, Э. В. Дыба // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / НАН Беларуси ; РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2024. – Вып. 57. – С. 225–228.

7. Бурдейко, В. А. Моделирование удаления колорадского жука применением устройства с очесывающей конической щеткой / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию образования БГАТУ, Минск, 16–17 окт. 2024 г. – Мн. : БГАТУ, 2024. – Ч. 1. – С. 130–132.

8. Бурдейко, В. А. Перспективные рабочие органы машин для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 18 дек. 2015 г., г. Барановичи. – Барановичи : БарГУ, 2015. – С. 7–8.

9. Бурдейко, В. А. Машина и рабочие органы для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». – 2018. – Вып. 6. – С. 87–91.

УДК 631.372

Поступила в редакцию 09.10.2025
Received 09.10.2025

А. Р. Горгодзе

Комитет промышленной кооперации, науки и образования
Союз промышленников «Прогресс»
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: gorgodze@souzprogress.com

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОБНОВЛЕНИЮ ТРАКТОРНОГО ПАРКА В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация. В статье представлены предложения по надлежащему планированию обновления парка сельскохозяйственных тракторов.

Ключевые слова: парк сельскохозяйственных тракторов, показатели назначения, система машин и технологий, типаж, тяговый класс, обновление, технико-технологические требования, научное обоснование.

A. R. Gorgodze

Committee for Industrial cooperation, science and education
Union of Industrialists "Progress"
Moscow, Russian Federation
E-mail: gorgodze@souzprogress.com

PROPOSALS FOR UPGRADING THE TRACTOR FLEET IN THE RUSSIAN FEDERATION'S AGRICULTURAL-INDUSTRIAL COMPLEX BASED ON STATISTICAL DATA

Abstract. The article presents proposals for proper planning of the renewal of the agricultural tractor fleet.

Keywords: agricultural tractor fleet, purpose indicators, machine and technology system, type, traction class, renewal, technical and technological requirements, scientific justification.

Основная часть

На сегодняшний день парк сельскохозяйственных тракторов в агропромышленном комплексе Российской Федерации составляет свыше 421 тысячи единиц машин различных классов.

Следует отметить, что обновление парка в разные годы постсоветского периода происходило нестабильно. Тракторы некоторых классов, в первую очередь колесные, третьего класса (мощностью 180–220 л. с., весом 7800–8700 кг) и гусеничные с таким же тяговым усилием (мощностью 90–170 л. с., весом 7500–8500 кг) в настоящее время производятся мелкими сериями и активно замещаются иностранными машинами, не в полной мере отвечающими требованиям, установленным действующим законодательством к показателям назначения (функциональным характеристикам).

Это результат повсеместного отказа от государственного регулирования и планирования машинно-тракторного парка в агропромышленном комплексе страны.

В недавнем прошлом планирование опиралось на научно обоснованную систему машин и технологий – комплексный развернутый справочник и нормативный документ одновременно.

Как одной из основ того документа было принято использование понятия «типаж» – как совокупность научно обоснованных параметров к составляющим машинно-тракторных комплексов. Таким образом «типаж» предполагал возможность множества моделей и марок техники, но объединенных общими показателями назначения.

В виде примера продемонстрируем рисунок из известного учебника – структуру тракторного парка по тяговым классам и назначению, в соответствии ГОСТ 27021-86 (рисунок 1) [1, 2].

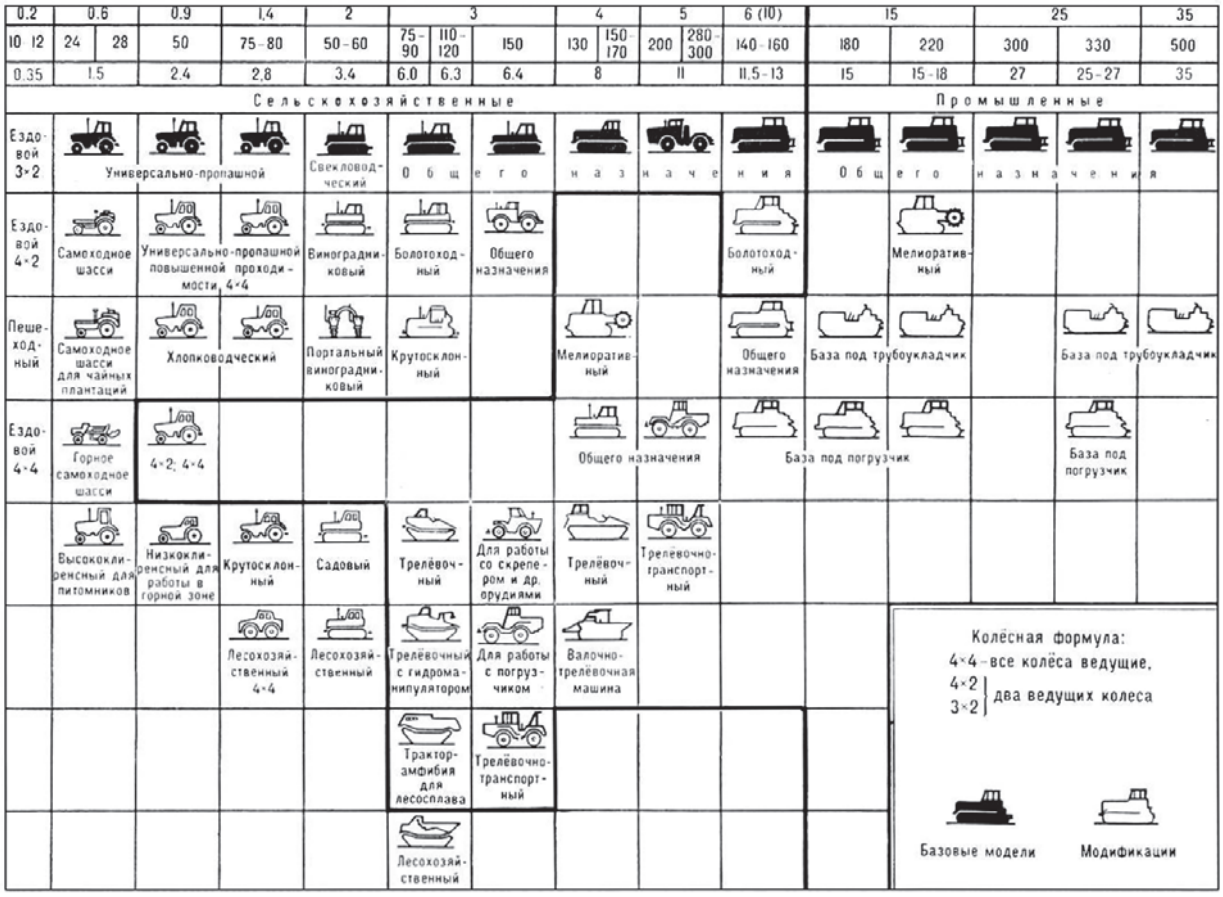


Рисунок 1 – Типаж тракторов на 1971–1980 гг.: *P* – тяговое усилие, mc;
N – эффективная мощность двигателя трактора, л. с.; *G* – масса трактора, т

Исторически необходимость описания типажей машин и систематизации в единый документ сложилась на рубеже 1940–1950-х гг. Интенсивному развитию потребления был необходим расширяющийся ассортимент предлагаемых продуктов, что требовало создания и освоения интенсивных технологий в агропромышленном комплексе страны.

Для принятия решений по государственной поддержке тех или иных направлений требуется наличие научно обоснованных технико-технологических требований, которым должны соответствовать показатели назначения этих машин, орудий и агрегатов.

В качестве примера научного обоснования приведем иллюстрацию данных, полученных опытным путем на квалификационных испытаниях тракторов, для подтверждения соответствия стандартам, принятым еще в середине 1980-х гг.

Эти стандарты остаются актуальной основой для действующих и обновляемых нормативных документов (рисунок 2) [2]. Данный пример был представлен в докладе Северо-Кавказской машиноиспытательной станции (ФГБУ «Северо-Кавказская МИС») 20 июня 2024 г. в рамках деловой программы Всероссийского Дня поля в г. Минеральные Воды Ставропольского края.

Опираясь на такие обоснования при планировании обновления парка сельскохозяйственных тракторов в Российской Федерации, становится возможным принятие протекционистских ограничений для машин, не соответствующих приведенным характеристикам при выходе на рынок.

Такие меры нормативно-технического регулирования жизненно необходимы при сохранении традиционных, собственных агротехнологий, основывающихся на отечественных машинно-тракторных комплексах, адаптированных ко всем почвенно-климатическим условиям большой страны, а также при создании и освоении новых методов.

Тяговый класс (по ГОСТ 27021)	Номинальное тяговое усилие, кН (по ГОСТ 27021)	Колёсные тракторы 4х4	
		Эксплуатационная масса, кг	Эксплуатационная мощность, кВт*
0,2	От 1,8 до 5,4	$1000\pm^{350}_{200}$	$18\pm^{5,0}_{4,5}$
0,6	Св.5,4 до 8,1	$1850\pm^{350}_{250}$	$32\pm^{5,6}_{4,6}$
0,9	8,1...12,6	$3000\pm^{400}_{300}$	$52\pm^{6,0}_{5,2}$
1,4	12,6...18,0	$4250\pm^{400}_{350}$	$73\pm^{7,0}_{6,3}$
2	18,0...27,0	$6100\pm^{600}_{500}$	$104\pm^{10,5}_{8,2}$
3	27,0...36,0	$8700\pm^{800}_{700}$	$149\pm^{15}_{12}$
4	36,0...45,0	$11000\pm^{900}_{700}$	$188\pm^{16}_{12}$
5	45,0...54,0	$13500\pm^{1600}_{1000}$	$231\pm^{27}_{17}$
6	54,0...72,0	$17300\pm^{2000}_{1200}$	$296\pm^{34}_{21}$
8	72,0...108	$24500\pm^{3000}_{2500}$	$419\pm^{51}_{43}$

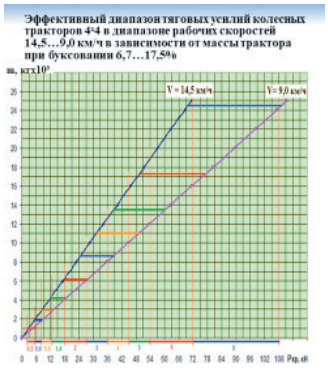


Рисунок 2 – Данные, полученные опытным путем на квалификационных испытаниях тракторов, для подтверждения соответствия стандартам, принятым в середине 1980-х гг.

Из открытых статистических данных по тракторам, зарегистрированным в эксплуатирующих организациях Российской Федерации органами технадзора, следует привести важные показатели:

– из общего количества тракторов (более 421 тыс. ед.) тракторы отечественного производства и поставленные из постсоветских государств составляют более 370 тыс. ед. или более 88 %, что демонстрирует общее сохранение традиционных агротехнологий;

– отечественных тракторов классов 5,0–6,0–8,0 (мощностью свыше 300 л. с. и весом свыше 13 000 кг), российских производителей (ОАО «Ростсельмаш» и АО «Петербургский тракторный завод») насчитывается более 60 000 единиц и эти заводы способны стабильно покрывать спрос как российского рынка, так и доминировать в постсоветских государствах;

– тракторы классов 0,6–0,9–1,4–2,0 (мощностью от 30 до 155 л. с.), производимые предприятиями Союзного государства (ОАО «Минский тракторный завод», Республика Беларусь) с преимущественным использованием сырья и материалов российского происхождения, составляют более 241 тыс. машин в существующем парке АПК РФ, а производственно-технологический потенциал удовлетворяет текущим потребностям обновления парка;

– тракторы классов 3,0–4,0 (мощностью 180–260 л. с., весом 7500–8800 и 9000–12500 кг), в том числе гусеничные, составляют свыше 70 000 единиц (из них более 37 000 – гусеничные), как традиционно применяемые в наиболее распространенных агротехнологиях. И тут важно отметить объективные сложности с обновлением парка, так как это наиболее развивающийся и массовый сегмент, включающий в себя машины различной компоновки, адаптированные к различным современным технологиям, в первую очередь в растениеводстве.

Детально проанализируем ситуацию и предложим вариант решения сложившихся проблем с обновлением парка таких машин.

Субъективная составляющая:

– основу парка машин тягового класса 3,0 составляли гусеничные машины и колесные тракторы шарнирно-сочлененной компоновки, что ограничивало их использование как пропашных машин (сложности работы в междурядьях);

– в это же время в зарубежных странах по обстоятельствам, отличающимся от ситуации на постсоветском пространстве (сложности использования дорог общего пользования, увеличение скоростей в обработке междурядий, отсутствие научного потенциала в развитии скоростной гусеничной техники с регулируемой колеей и клиренсом), развитие получили колесные тракторы классической компоновки;

– в СССР в связи с наличием отработанных технологий и скоростных энергонасыщенных гусеничных тракторов тягового класса 3,0 (ХТЗ Т-150, ВгТЗ ДТ-175 «Волгарь»), а также разработки новых машин класса 2,0, традиционных для пропашных работ (ЛТЗ-155 (РТМ-160), МТЗ-145 (-1221)), такие машины остались в планах на 1990-е гг., что с развалом Союза привело к искривлению спроса;

– в связи с общемировой ситуацией и тенденциями на разрыв производственно-кооперационных связей производство в России таких машин с использованием зарубежных компонентов невозможно.

Объективная составляющая:

– любое освоение производства новых машин потребует проведение НИОКР и мероприятий по отработке серийных технологий в течение 4–6 лет. В случае обратного инжиниринга и/или приобретения лицензий – не менее 3–4 лет;

– иные варианты освоения упираются в отсутствии необходимых компетенций у дружественных стран: Китай, Индия и Турция имеют мелкотоварное аграрное производство и не обладают технологиями производства сельскохозяйственных тракторов мощностью свыше 150 л. с.;

– отсутствует опыт адаптации таких машин к почвенно-климатическим условиям большинства регионов Российской Федерации;

– тракторы, анонсируемые как традиционными производителями (ПТЗ, МТЗ, РСМ), так и вновь организованными сборочными предприятиями, в том числе в рамках специнвестконтрактов (СПИК), находятся в одинаковых временных условиях, что обусловлено сроками мероприятий по серийному освоению, испытаниям и адаптации к агротехнологиям и имеющемуся парку сельскохозяйственных орудий.

Предложения:

– необходимо принятие государственной программы по созданию и освоению ряда машин, определяемых стандартами как тракторы класса 3,0 и 4,0 в классической компоновке и гусеничных моделей;

– необходимо принятие государственной программы оценки и анализа основных агротехнологий и соответствующему им набору сельскохозяйственных орудий;

– требуется создание и освоение новых орудий, соответствующих требованиям назначения агротехнологий, освоенных в период 2000–2020 гг., с преимущественным применением шлейфа орудий иностранного производства;

– необходимо возобновление работы по актуализации и принятию всеобъемлющей системы машин и технологий как научно обоснованного нормативно-информационного документа;

– также необходимо возобновление работы по актуализации и принятию всеобъемлющей системы государственных стандартов (ГОСТ), определяющих требования к показателям назначения всех сельскохозяйственных машин, допускаемых к эксплуатации в агропромышленном комплексе Российской Федерации, в том числе как нормативных документов для целей государственной поддержки и протекционизма.

Заключение

Опираясь на изложенное, подчеркнем, что актуальный для первоочередной разработки трактор должен соответствовать технико-технологическим характеристикам современных тракторов 3,0 и 4,0 тяговых классов (мощностью 180–220 л/с, весом 7500–8800, мощностью 220–280 л/с и весом 9000–12500 кг), в том числе гусеничным моделям.

Также количественным основанием этого предложения является значительная часть парка сельскохозяйственных тракторов с высоким износом (более 70 тыс. тракторов, с учетом гусеничных – свыше 37 тыс.), традиционно применяемых в машинно-тракторных комплексах для наиболее распространенных агротехнологий и на текущий момент не освоенных в отечественном серийном производстве.

Список использованных источников

1. Конструкция, основы теории и расчет тракторов : учебник / И. Б. Барский, Д. Ф. Брюховец, В. В. Иванов [и др.]. – М. : Высш. школа, 1971. – 431 с.

2. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы: ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628–85) ; введ. 01.07.1987. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 8 с.

УДК 628.32

Поступила в редакцию 14.10.2025
Received 14.10.2025

Н. Ф. Капустин[1], В. О. Китиков[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npcter@yandex.ru
[2]Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: kitsikau@mail.ru

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ТЕХНОЛОГИИ АНАЭРОБНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Аннотация. Эколого-экономическая оценка очистки сточных вод на основе предотвращенного экологического ущерба позволяет выбрать для этой цели наиболее эффективную технологию. В статье приведена методика и пример расчета предотвращенного экологического эффекта на очистных сооружениях ОАО «Слонимский водоканал».

Ключевые слова: сточные воды, анаэробная технология, предотвращенный экологический ущерб.

N. F. Kapustin[1], V. O. Kitikov[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npcter@yandex.ru
[2]Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: kitsikau@mail.ru

ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFECT OF ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGY AT TREATMENT FACILITIES

Abstract. This Environmental and Economic Assessment of Wastewater Treatment Based on Environmental Impact Prevention allows for the most accurate selection of objectives. The article presents a methodology and an example of environmental impact prevention at the treatment facilities of OJSC "Slonim Vodokanal".

Keywords: wastewater, anaerobic technology, prevented environmental damage.

Введение

Основную нагрузку на окружающую среду при работе очистных сооружений оказывают сточные воды. Они содержат значительное количество органических соединений, которые обуславливают высокие уровни ХПК и БПК. Сбросы сточных вод характеризуются высокой суточной и сезонной неравномерностью как по химсоставу, так и по своему объему. Эта проблема частично нивелируется использованием уравнительных бассейнов или емкостей, что не снимает остроты проблемы, вызванной высоким содержанием загрязняющих веществ. Без правильно организованной очистки сточные воды при поступлении в окружающую среду могут вызвать серьезные экологические проблемы [1].

В аэробных условиях достаточно сложно добиться высокой эффективности очистки сточных вод жилищно-коммунального сектора. Их эффективная очистка требует использования методов, обеспечивающих удаление или предварительную трансформацию присутствующих в них органических веществ.

В мировой практике для очистки сточных вод жилищно-коммунального сектора нашли применение высокоинтенсивные анаэробные технологии, которые имеют неоспоримые преимуще-

ства перед традиционными методами. А именно: низкие энергетические затраты, высокая производительность биореакторов, компактность очистных сооружений, возможность получения метаносодержащего энергоносителя – биогаза, высокий уровень экологической чистоты сооружений [2].

Однако любая разработанная биотехнология очистки сточных вод требует оценки экологической эффективности от внедрения, для чего должны быть проведены расчеты предотвратимого экологического ущерба.

Основная часть

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения окружающей среды представляет собой оценку в денежной форме возможных отрицательных последствий загрязнения природной среды, которых удалось избежать в результате осуществления природоохранных мероприятий. Оценка величины предотвращенного ущерба от загрязнений водной среды проводилась на основе показателей удельного ущерба, представляющих собой удельные стоимостные оценки ущерба на единицу (1 усл. т) приведенной массы загрязняющих веществ, а также показателя относительной опасности загрязнения водоема [3].

Общая величина ущерба от загрязнения водоема определяется в соответствии с выражением

$$У = \sum_{1}^{n} \gamma_i \sigma_k M_i, \quad (1)$$

где У – ущерб, наносимый окружающей среде сбросами в водоемы вредных веществ, руб/год; γ_i – удельный ущерб, причиняемый народному хозяйству сбросом в водоемы одной условной тонны *i*-го загрязняющего вещества, руб./усл. т; σ_k – показатель относительной опасности загрязнения водоема, отн. ед.; M_i – приведенная масса сбрасываемого в водоемы *i*-го загрязняющего вещества в течение года (усл. т/год); *n* – количество загрязняющих веществ.

Приведенная годовая масса загрязняющих веществ может быть рассчитана по формуле

$$M_i = A_i m_i, \quad (2)$$

где A_i – показатель относительной опасности сброса в водоем *i*-го вещества, усл. т/год; m_i – масса годового сброса в водоем *i*-го вещества, т/год.

Значение A_i связано с величиной ПДК$_i$ соотношением

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_i}, \quad (3)$$

где ПДК$_i$ – предельно-допустимая концентрация *i*-го загрязнителя в воде рыбохозяйственных объектов, мг/л [4, 5].

Количество поступающего в водохозяйственный объект *i*-го загрязнителя зависит от объема годового сброса сточных вод источниками загрязнения и от концентрации *i*-го загрязнителя в источниках загрязнения

$$m_i = C_i V, \quad (4)$$

где C_i – концентрация *i*-го загрязнителя в сточных водах, г/м^3; *V* – годовой сброс сточных вод, м^3/год.

В данной статье мы проводим оценку экономической эффективности внедрения разработанной технологии анаэробной очистки сточных вод на очистных сооружениях, действующих в ОАО «Слонимский водоканал».

Исходные данные для расчета эколого-экономического эффекта при использовании анаэробного метода очистки сточных вод представлены в таблице 1.

На основании формул (1–4) были рассчитаны показатели относительной опасности, массы годового сброса сточных вод в канализацию, приведенной массы годового сброса и величины ущерба для каждого *i*-го источника загрязнения до и после их биологической очистки. Результаты расчетов представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 1 – **Исходные данные для расчета эколого-экономического эффекта анаэробного метода очистки сточных вод**

Компоненты сточных вод	Концентрация в сточных водах, г/м^3		
	до очистки, C_i	после очистки, C_i	ПДК$_i$
Взвешенные вещества	277,0	10,3	30
ХПК	607,3	58,4	120
БПК	252	6,8	25
Ионы аммония [NH_4^+]	46,9	8,2	10
Азот общий	54,8	13,1	20
АСПАВ	0,89	0,056	0,1

Таблица 2 – **Ущерб от годового сброса сточных вод до и после их биологической очистки**

Компоненты сточных вод	Показатель относительной опасности сброса, A_i усл. т/год	Масса годового сброса в канализацию, m_i т/год		Приведенная масса годового сброса данного загрязняющего вещества, M_i усл. т/год		Ущерб от загрязнения		
						удельный γ, руб/усл. т	на приведенную массу годового сброса, руб/год	
		до очистки	после очистки	до очистки	после очистки		до очистки У$_1$	после очистки У$_2$
Взвешенные вещества	0,03	1 207	45	36,2	1,35	205	7421	276,0
ХПК	0,008	2 647	255	21,2	2,0	800	16 960	1 600,0
БПК	0,04	1 098	30	43,9	1,2	820	36 000	984,0
[NH_4^+]	0,1	204	36	20,4	3,6	700	14 280	2 520
Азот общий	0,05	239	57	12	2,85	750	9 000	2 137
АСПАВ	10,0	3,9	0,2	39	2	3400	132 600	6 800
						Итого:	216 261	11 457

Таблица 3 – **Результаты расчета предотвращенного экологического ущерба**

Параметр У, руб./год		Предотвращенный экологический ущер У$_1$–У$_2$, руб/год
до мероприятия У$_1$, руб/ год	после мероприятия У$_2$, руб/год	
216 261	11 457	204 804

Заключение

Биотехнологии анаэробной ферментации органического сырья применяются при очистке сточных вод как на перерабатывающих предприятиях агропромышленного комплекса, так и на очистных сооружениях жилищно-коммунального хозяйства.

При этом эффективность их применения оценивается по предотвращенному экологическому эффекту. В частности, на основании исходных данных ОАО «Слонимский водоканал» по загрязняющим веществам в сточных водах был рассчитан в денежном выражении годовой предотвращенный экологический ущерб за счет их очистки на основе технологии анаэробной биоферментации, который составил 204 804 руб.

Список использованных источников

1. Zhao, K. Biological treatment of dairy wastewater : A minireview / K. Zhao, У. W. Wu., S. Young, X. J. Chen // Environ. Informatics Lett. – 2020. – Vol. 4. – P. 23–31.

2. Биотехнология и биоэнергетика в решении вопросов экологии / П. Е. Баланов, Н. В. Смотраева, О. В. Иванченко, Р. Э. Хабибулин // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 5. – Т. 18. – С. 229–232.

3. Рекус, И. Г. Основы экологии и рационального природопользования : учеб. пособие / И. Г. Рекус, О. С. Шорина. – М. : МГУП, 2006. – 146 с.

4. О некоторых вопросах нормирования сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26.05.2017 г. № 16 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141 (дата обращения: 10.10.2025).

5. Баранчик, В. П. Экономика природопользования : учеб. пособие / В. П. Баранчик, И. П. Деревяго, С. А. Касперович. – Мн. : РИВШ, 2023. – 332с.

УДК 621.432, 631.3

Поступила в редакцию 20.12.2025
Received 20.12.2025

В. Е. Тарасенко[1], А. А. Жешко[2], П. А. Гаврукович[1]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: trs9@yandex.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com

АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Изложены результаты анализа этапов развития и функциональных возможностей средств диагностирования автотракторных двигателей различных поколений, описаны современные портативные сканеры (OBD2), микропроцессорные мотор-тестеры и универсальные диагностические комплексы широкого функционала, позволяющие выполнять оценку состояния двигателя по основным его параметрам, осуществлять регистрацию и расчет показателей индикаторной диаграммы в функции угла поворота коленчатого вала. Приведены результаты разработки многоканальной цифровой системы диагностирования с гибкой структурой, отличающейся повышенной помехоустойчивостью каналов связи.

Ключевые слова: диагностирование, двигатель, сканер, мотор-тестер, сигнал, датчик, комплекс.

V. E. Tarasenka[1], A. A. Zheshka[2], P. A. Gavrukovich[1]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: trs9@yandex.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com

ANALYSIS OF CONTROL TOOLS FOR THE MAIN PARAMETERS OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR ENGINES

Abstract. This article presents the results of an analysis of the development stages and functional capabilities of diagnostic tools for automotive and tractor engines of various generations. It describes modern portable scanners (OBD2), microprocessor-based engine testers, and universal diagnostic systems with a wide range of functions that enable the assessment of engine condition based on its main parameters, as well as the recording and calculation of indicator diagram readings as a function of crankshaft rotation angle. The article also presents the results of the development of a multi-channel digital diagnostic system with a flexible structure, characterized by increased noise immunity of communication channels.

Keywords: diagnostics, engine, scanner, motor tester, signal, sensor, complex.

В настоящее время значимую информацию об основных параметрах работы мобильной машины и ее ключевой составляющей – двигателя – можно получить через диагностический разъем с помощью специального оборудования (сканера), которое можно назвать основным диагностическим оборудованием, предусмотренным производителем машины. Сканер актуален при диагностировании тех неисправностей, которые обнаруживает система самодиагностики (OBD2). Так, диагностические работы на кафедре ТиОТС БГАТУ выполняются с помощью современного портативного сканера AUTEL MaxiCOM MK808BT Pro (рисунок 1). Основными функциями данного сканера являются: EPB (обслуживание для поддержания безопасности и эффективности электронной тормозной системы); BMS (сервис оценки состояния заряда батареи, контроля тока замыкания, регистрация замены батареи); DPF (сервис для дизельной системы сажевого фильтра



Рисунок 1 – Сканер AUTEL MaxiCOM MK808BT Pro

с регенерацией); DPF (замена компонентов DPF после замены блока управления двигателем); SAS (сервис помогает очистить ошибку о датчике угла поворота и осуществить калибровку датчика угла поворота руля); TPMS (сервис для отображения идентификаторов датчиков TPMS из ECU, а так же прописка новых датчиков TPMS); IMMO (сервис для чтения кода IMMO); ABS (сервис для прокачки тормозной системы) и др.

В современной мобильной машине самодиагностика по математической модели контролирует взаимосвязанность показаний всех датчиков, и в случае их выхода за рамки модели генерируется код неисправности [1]. Зачастую неисправность не может быть обнаружена системой самодиагностики или же самодиагностика не может определить причину возникновения неисправности. В этом случае можно прибегнуть к анализу сигналов в проводке мобильной машины для получения дополнительной, углубленной информации о характере протекающих процессов. Такой анализ выполняется при помощи дополнительного диагностического оборудования. Ярким и наиболее распространенным вариантом такого оборудования выступает осциллограф. В большей же степени наиболее полное диагностирование можно осуществить с помощью специальных измерительных комплексов, которые значительно превосходят по возможностям осциллограф и позволяют выполнять анализ рабочих процессов ДВС.

Далее в настоящей работе представлен анализ функциональных возможностей средств диагностирования автотракторных двигателей (АТД), в том числе электронных средств контроля начального поколения.

Совершенствование технологий и средств технического обслуживания современных АТД требует разработки достоверных методов их комплексного диагностирования, создания современного оборудования. При диагностировании АТД широко распространены методы, основанные на измерении целого ряда физических величин, характеризующих быстропеременные рабочие процессы, в ряде случаев – состояние моторного масла. Высокоинформативными из них являются давление в камере сгорания (в целом параметры индицирования) и в топливопроводе (рампе) высокого давления, ход иглы форсунки, спектральный анализ моторного масла. Важным является давление во впускных и выпускных коллекторах, в картере двигателя, положение впускных и выпускных клапанов и др. Необходим одновременный и параллельный анализ работы одного или нескольких цилиндров. В силу цикличного характера работы двигателя измерения проводят в единичных последовательных циклах с синхронизацией, как правило, по углу поворота его коленчатого вала (КВ) [2, 3].

Решение поставленных задач возможно при создании автоматизированных средств анализа рабочих процессов и процессов в наиболее ответственных сопряжениях АТД – электронных диагностических приборов и систем на основе достижений измерительной и вычислительной техники, обеспечивающих наиболее эффективное получение информации и представление ее в удобном виде.

Периодом активной разработки автоматизированных электронных средств контроля следует считать 1970–1980-е гг. Так, результатом масштабных работ по созданию электронных средств диагностирования в то время явились электронные диагностические средства ЭМДП-2 и ЭМДП-М,



Рисунок 2 – Диагностическая измерительно-прогнозирующая система (ДИПС) КИ-13940-ГОСНИТИ на основе электронного измерительного комплекса К-736 Ленинградского института ВНИИЭП (разработка выполнена ВНИИЭП совместно с ГОСНИТИ, ЛСХИ, УкрГОСНИТИ и Киевским СКБ им. Ястребова)

разработанные в ЛСХИ. В 1980-е гг. с участием лаборатории № 24 ГОСНИТИ, Ленинградского института ВНИИЭП Минприбора были созданы серии электронных диагностических комплексов К-736, К-738, К-748, а Тартуским филиалом ЦОКТБ-ГОСНИТИ – установки ДИПС (КИ-13940-ГОСНИТИ на базе комплекса К-736). На рисунке 2 представлен внешний вид диагностической измерительно-прогнозирующей системы (ДИПС) КИ-13940-ГОСНИТИ на основе электронного измерительного комплекса К-736. Установка контролирует 185 параметров, измеряемых и регистрируемых с центрального пульта, и 99 – с выносного пульта [3, 4].

Киевское производственное объединение (ПО) «Точэлектроприбор» (в начале 2000-х гг. – ПАО «Компания Росток») изготовило для АПК 178 комплексов К-736 и более десятка комплексов К-738 и К-748 для других отраслей. С 1983 г. Киевским ПО «Точэлектроприбор» совместно с лабораторией № 24 ГОСНИТИ велись разработки «Комплекса агрегатных средств измерительно-вычислительного для диагностики К-539» (в коллектив разработчиков входили А. Г. Скорик, В. А. Макаров, В. В. Закраснянный, В. И. Фурс, А. Н. Тюпа и др.). Впоследствии Тартуский филиал ЦОКТБ ГОСНИТИ наладил выпуск автоматизированного машинно-тестера (АМТ) КИ-13950-ГОСНИТИ. Было изготовлено 25 серийных, макетный и опытный образцы комплекса К-539 и 25 АМТ КИ-13950-ГОСНИТИ. Внешний вид комплекса К-539 приведен на рисунке 3.

Следует отметить некоторые прогрессивные особенности комплекса К-539. А именно: в нем реализовано измерение напряжения постоянного и переменного тока, частоты вращения, угла



Рисунок 3 – Внешний вид комплекса К-539 СКБ Киевского ПО «Точэлектроприбор» (слева направо): блок связи К-539/БС, контроллер К-539/КТ и терминал К-539/ТМ

поворота КВ, расхода топлива, активного электросопротивления, коэффициента вариации вибросигнала с применением (впервые) приемов искусственного интеллекта для обеспечения стабильности опорного вибросигнала для развертки углов поворота КВ. Все электрические сигналы преобразуются в конкретные диагностические показатели. Развертка сигналов проводится по времени, углу поворота КВ, по скорости его вращения в широких пределах. Программы измерения легко корректируются и составляются заново под любой объект контроля. Комплекс не чувствителен к вариации уровня электропитания и температуры окружающей среды.

Прогрессивные решения несла в себе конструкция портативного средства диагностирования автотракторных дизелей, микропроцессорного тестера МП-5001 (КИ-5888-ГОСНИТИ), технические характеристики которого представлены в таблице.

Достаточно оригинальным и при этом более простым, но с меньшими измерительными возможностями явился электронный индикатор параметров автотракторных дизелей КИ-13966-ГОСНИТИ. Его отличительная особенность заключалась в использовании встроенных в диагностируемую машину преобразователей частоты вращения, давления и температуры, накладных датчиков и стробоскопического фонаря, не требующих встраивания в дизель, а также использование методов контроля на переходных и нестационарных режимах работы дизеля.

Техническая характеристика микропроцессорного тестера КИ-5888-ГОСНИТИ

№	Показатели	Единицы измерения	Значения
1	Измеряемые параметры:		
	– дымность отработавших газов с помощью измерительного преобразователя дымомера МЕТА-01	%	3–100
	– давление, разрежение газов датчиками ИПД-2	МПа	– 0,06...+1,00
	– давление жидкостей датчиками ИПД-2	МПа	0–40,0
	– расход дизельного топлива с помощью тахометрических преобразователей ТПР-3 и ТПР-5	л/ч	3,0–90,0
	– расход картерных газов через индикатор КИ-13 671.01-ГОСНИТИ с потенциометром ПТП-21К	л/мин	10–360
	– частота вращения валов с помощью индуктивного отметчика вращения ОВИ-1	мин$^{-1}$	120–2400
	– температура жидкостей и газов	°С	10–150
	– напряжение постоянного тока	В	0–50
2	Основная приведенная погрешность измерений	%	2–5
3	Напряжение питания, в том числе от трактора, машины	В	12/24
4	Потребляемая мощность	Вт	50
5	Габаритные размеры приборного блока	мм	400 × 350 × 200
6	Масса в контейнере вместе с принадлежностями	кг	10,5

На протяжении многих лет Сибирским физико-технический институтом аграрных проблем (СибФТИ СФНЦА РАН, Новосибирск) велись разработки технических средств диагностирования тракторных двигателей по параметрам рабочих процессов. В 1975 г. институтом (совместно с НПО «Звезда») одним из первых был разработан комплекс анализа рабочих процессов (КАРП), нацеленный на обработку индикаторных диаграмм двигателей. Опыт применения разработанных в то время приборов показал их низкую эффективность, поэтому требовалось создания технических средств, измеряющих и регистрирующих рабочие процессы АТД в комплексе [2]. Позднее был разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) «ЦИКЛ» с цифровым ядром, который характеризовался широкими функциональными возможностями по анализу сигналов с целью определения технического состояния АТД.

Для работы с дизельными двигателями создавалась измерительная система Diesel Master 1 000, которая предназначена для непрерывного контроля нагрузки дизеля и параметрической диагностики рабочего процесса в его цилиндрах, для использования на дизелях при частотах вращения коленчатого вала от 30 до 3 000 мин$^{-1}$ [5]. В состав системы входят: персональный

компьютер, блок аппаратного интерфейса, датчики частоты вращения, давления газа, впрыска топлива и положения рейки топливного насоса.

Известен разработанный ЗАО «ЦИКЛОН» для диагностики технических средств, работа которых связана с вибрациями, стенд виброакустической диагностики «Дельфин-1М» [6]. Полученная от узлов и механизмов информация обрабатывается компьютером по специально разработанным программам, позволяющим оператору принимать решения о техническом состоянии диагностируемых объектов. Стенд имеет суммарно 8 каналов сбора информации, из них 2 ультразвуковых канала, 2 канала вибрационных характеристик, 1 потенциальный канал, есть также 1 канал регистрации давления и 2 служебных канала. При этом частота опроса каналов составляет 70 кГц, полоса пропускания рабочих частот ультразвуковых каналов – 70–90 кГц, а полоса пропускания рабочих частот канала высокочастотных вибрационных характеристик – 5–10000 Гц.

Приборостроительное предприятие «Висом» (г. Смоленск) разрабатывает и производит оборудование для проведения вибрационных испытаний, системы регистрации данных, измерительные приборы. Примером многофункциональной продукции данного предприятия является универсальный регистратор-анализатор спектра ВС-311, который предназначен для измерения, регистрации и анализа данных вибрации и других физических величин, определяемых с помощью подключенных к прибору датчиков. Весомым преимуществом является то, что приборы серии ВС-311 можно объединить (до восьми) для синхронного сбора данных по 64 каналам.

Заслуживает внимания эффективный инструмент диагностики бензиновых и дизельных двигателей, разработанный в нашей республике (ООО «Тироид», г. Минск), – мотор-тестер М 3-2, который представляет собой микропроцессорный прибор с комплектом датчиков и соединительных устройств [7]. Конструктивно мотор-тестер размещается в корпусе системного блока персонального компьютера (рисунок 4). На передней панели размещены встроенный жидкокристаллический дисплей, окно приемника дистанционного управления и основные органы управления. На задней панели размещены разъемы для подключения шнура питания от сети 230 В (50 Гц) кабелей с датчиками, устанавливаемыми на контролируемом двигателе, и кабелей для возможного подключения принтера и компьютера, которые помогают выполнить документирование полученных результатов измерения.

Мотор-тестер М 3-2 позволяет проводить тестирование дизельного двигателя на режимах холостого хода и повышенных оборотов, измерять параметры системы пуска (в результате замера формируются осциллограммы напряжения и тока), определять мощность двигателя (реализуется цикл «разгон-выбег»), осуществлять работу в режиме осциллографа и сканера кодов.

Достаточно функциональным является универсальный диагностический комплекс DTS–25 холдинга ДИАМАКС [8, 9], предназначенный для использования на специализированных (дилер-



а *б*

Рисунок 4 – Внешний вид системного блока мотора-тестера М 3-2: *а* – вид спереди, *б* – вид сзади

ских) центрах, универсальных автоцентрах и СТО, а также непосредственно на постах диагностики системы управления двигателем и на участках приемки машин в ремонт. Комплекс DTS–25 предназначен для работы с бензиновыми и дизельными двигателями, включает диагностический сканер, мотор-тестер, газоанализатор «Инфракар М1.01» и стойку «Скат-2РГ». Сканер осуществляет идентификацию, чтение и стирание кодов ошибок, отображение текущих данных, активацию исполнительных механизмов, адаптацию, кодирование (программирование) блоков управления, регулировку СО, сброс сервисных интервалов. Мотор-тестер способен выполнять построение осциллограмм сигналов в первичных и вторичных цепях, одновременное отображение «холостой» и «рабочей» искры, статистическую оценку ВВТ. Возможна работа в режиме 4-канального осциллографа с ручной и автоматической настройкой на измеряемые сигналы (чувствительность, развертка, синхронизация и т. п.), измерение относительной компрессии и мощностного баланса цилиндров (EAD-225), а также оценка эффективной мощности двигателя (EAD-225), доступна библиотека стандартных сигналов, система помощи и подсказок. Газоанализатор в составе комплекса DTS–25 выполняет измерение CO, CH, CO_2, O_2, λ, статический и динамический газоанализ.

Современным инструментом диагностирования является универсальный программно-аппаратный комплекс MT Pro 4.1 (рисунок 5), сочетающий в себе возможности осциллографа и мотора-тестера [10]. MT Pro 4.1 представляет собой универсальный измерительный прибор, не привязанный к какой-либо конкретной марке или модели машины. Прибор обеспечивает возможность непосредственного подключения датчиков и щупов к соответствующим электрическим цепям машины без необходимости использования дополнительных адаптеров, делителей и т. д.

MT Pro 4.1 может использоваться как для непосредственной диагностики электрических систем машины, так и для диагностики разнообразной электроники (сигнализаций и др.). Позволяет эффективно выявлять неисправности в системах зажигания (определение состояния свечей и свечных проводов, режимов работы и неисправностей катушки зажигания, определение углов опережения зажигания); в системе топливоподачи (электрическая проверка топливных форсунок, проверка работы датчиков температуры, положения дроссельной заслонки, датчика кислорода, датчика массового расхода воздуха и т. д., проверку работы исполнительных механизмов); в системе газораспределения (оценка относительной компрессии по цилиндрам в режиме стартерной прокрутки, измерение компрессии в динамике (на работающем двигателе) и в режиме прокрутки, определение правильности установки ремня ГРМ, контроль работы клапанов).

Последние десятилетия ведутся разработки средств дистанционного контроля как показателей в целом автотракторной техники, так и показателей АТД. Известны разработки устройств дистанционного онлайн-мониторинга показателей автотракторной техники, позволяющие осуществлять обработку и сбор информации о техническом состоянии машины в период ее эксплуатации [11, 12]. Доступны сегодня также портативные диагностические комплексы высокой эффективности, в качестве примера можно указать диагностический набор от Akrit Engineering [13], который объединяет беспроводной индикатор давления в двигателе (ELPI) и измеритель раскепов (EDD) в одном устройстве.

Современные АТД могут работать при более высоких пиковых значениях давления в камере сгорания, стандартные процессы сгорания могут быть реализованы для режимов работы



Рисунок 5 – Внешний вид программно-аппаратного комплекса MT Pro 4.1

с большими нагрузками, а на протяжении всего срока эксплуатации двигателя можно достичь стабильного контроля над вредными выбросами [14]. В настоящее время осуществима регистрация процесса индицирования двигателя в режиме реального времени, в конструкции двигателей применяется достаточно новый метод контроля давлений в цилиндрах с помощью свечей накаливания с датчиками давления [1, 15]. Примером могут служить высокотехнологичные свечи BERU 0103010907, серийно устанавливаемые на легковые автомобили. Их применение позволяет с наибольшей достоверностью определять среднее индикаторное давление и индикаторную мощность двигателя, оценивать особенности отдельных рабочих процессов, механические потери на трение, показатели политроп сжатия и расширения, жесткость работы двигателя и иные закономерности [15].

Широким функционалом обладает мобильный диагностический комплекс (МДК), который разработан специалистами МАДИ для анализа работы различных систем мобильных машин, при этом вопросы анализа работы и диагностирования ДВС проработаны наиболее полно [1]. Данный комплекс востребован при диагностировании сложных неисправностей, позволяет осуществлять сбор и обработку большого объема экспериментальных данных. Возможность анализа работы двигателя не только в функции времени, но и в функции угла поворота коленчатого вала принципиально отличают возможности МДК от осциллографа. Для анализа работы ДВС предусмотрена возможность использования датчиков давления в цилиндре двигателя (датчики давления совмещают со свечами накаливания или свечами зажигания) и регистрации параметров, влияющих на протекание рабочего процесса, прежде всего, управляющих импульсов катушек зажигания и топливных форсунок.

Интересными являются мероприятия по повышению функциональных возможностей рассматриваемого МДК [1], для чего осциллограммы линий моторного жгута и информацию от электронного блока управления (ЭБУ), получаемую через диагностический разъем, предполагается регистрировать синхронно под управлением программного обеспечения данного комплекса.

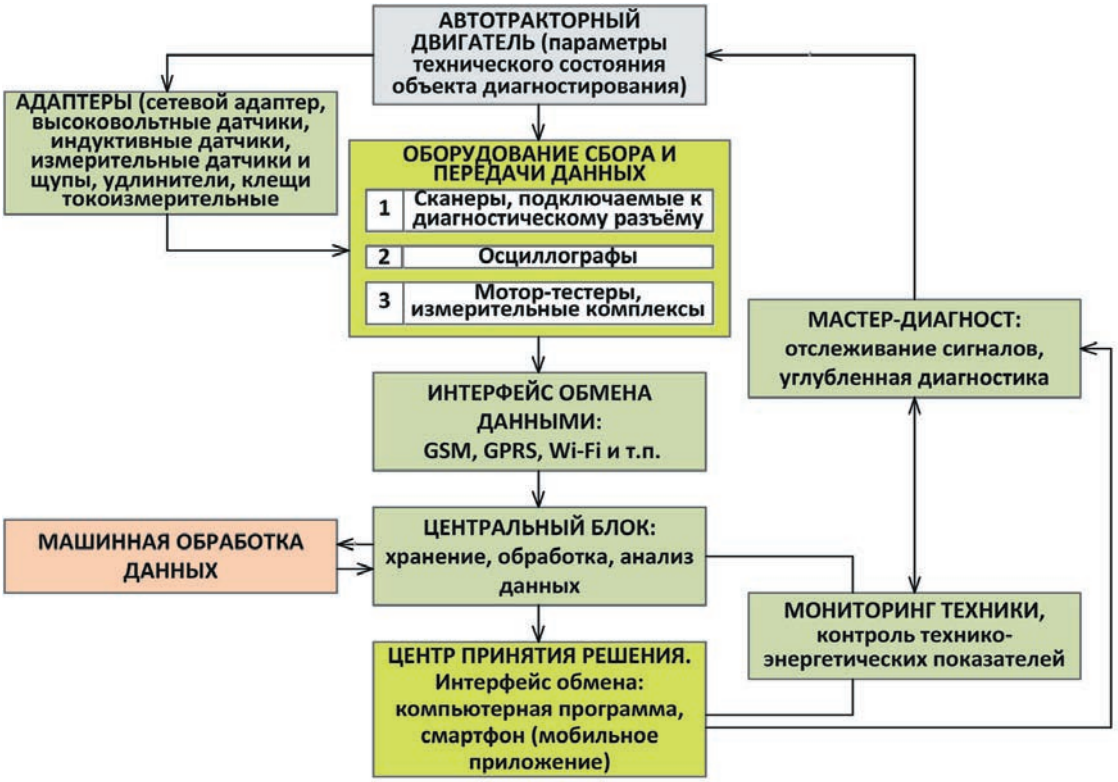


Рисунок 6 – Структурированная схема интеллектуальной системы диагностирования автотракторных двигателей

С учетом перечисленных выше особенностей в БГАТУ разработана многоканальная система диагностирования с гибкой структурой [16], которая объединяет до восьми универсальных модулей данных, состоящих из виброакустических и тепловых датчиков. Система полностью цифровая, с управляемой частотой тактирования ядра микроконтроллера до 216 МГц, повышенной помехоустойчивостью каналов связи, оптимальным соотношением стоимости к вычислительной способности. Система позволяет диагностировать неисправности АТД в масштабе реального времени, параллельно отображая на дисплее динамику изменения сигналов (спектрограммы и/или скейлограммы), обрабатывая пользовательские запросы и формируя протокол изменения картины состояния АТД на SD-карте или внешних USB-носителях информации. Система дополнена программным многоканальным драйвером цифровых датчиков вибрации, благодаря чему создана возможность считывания и записи данных одновременно с трех датчиков вибрации [17].

Учитывая опыт формирования современных систем диагностирования автотракторной техники [18, 19], авторами предлагается модель интеллектуальной системы диагностирования параметров технического состояния автотракторных двигателей, структурированная схема которой представлена на рисунке 6.

Таким образом, при оценке состояния систем и механизмов АТД наиболее результативным и достоверным является комплексный подход, когда возможности автоматизированных средств диагностики позволяют задавать различные диапазоны контроля величин сигнала, его длительности, расположения по времени процесса диагностирования и в разных режимах работы объекта контроля, осуществлять измерения сигналов вибрации в узком частотном диапазоне.

Список использованных источников

1. Мобильный комплекс для анализа работы ДВС : сайт компании Madi-AUTO. – М., 2005–2026. – URL: https://www.madi-auto.ru/company/articles3/20/ (дата обращения: 17.05.2025).

2. Развитие технических средств диагностирования тракторных ДВС по параметрам рабочих процессов / О. Ф. Савченко, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский [и др.] // Труды ГОСНИТИ / Россельхозакадемия, ГОСНИТИ. – М., 2015. – Т. 118. – С. 108–111.

3. Тарасенко, В. Е. Автоматизированные средства контроля основных параметров автотракторных двигателей / В. Е. Тарасенко, П. А. Гаврукович, А. Б. Азизов // Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения и технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию образования ф-та «Технический сервис в АПК», Минск, 4–5 июня 2025 г. ; редкол.: Л. М. Акулович [и др.]. – Мн. : БГАТУ, 2025. – С. 72–77.

4. Электронная диагностика : электр. с.-х. библиотека знаний. – URL: http://www.cnshb.ru/AKDiL/0024/base/R3/000386.shtm (дата обращения: 17.05.2025).

5. Пахомов, Ю. А. Основы научных исследований и испытаний тепловых двигателей : учебник / Ю. А. Пахомов. – М. : Транслит, 2014. – 432 с.

6. Коновалов, А. И. Диагностируем на «Дельфине» : метод. пособие / А. И. Коновалов, О. Н. Лукьяненко. – Луганск, 2006. – 100 с.

7. Мотор-тестер М 3-2. Руководство по эксплуатации. КСЮА. 461263.001 РЭ. – 97 с.

8. Мусаелянц, Г. Г. Диагностический комплекс для выявления неисправностей ДВС современных автомобилей / Г. Г. Мусаелянц, Е. А. Павленко, Д. К. Сысоев // Вестник СибАДИ. – 2017. – Вып. 1 (53). – С. 72–77.

9. FiS Система выбора товаров и услуг: сайт ООО «ДИАМАКС». – М., 2005–2026. – URL: https://diamax.fis.ru/product/7778921-universalnyj-diagnosticheskij-kompleks-dts-25 (дата обращения: 17.05.2025).

10. Диагностическое оборудование. Мотор-тестер MT Pro 4.1 : сайт AUTODIAG.BY. – Мн., 2010. – 2026. – URL: http://www.autodiag.by/motor-testery/motor-tester-mt-pro-4.0.html. (дата обращения: 17.05.2025).

11. Дорохов, А. С. Сбор информации о надежности сельскохозяйственных машин с использованием систем мониторинга с помощью контроля параметров технического состояния / А. С. Дорохов, М. Н. Костомахин, А. Н. Воронов // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2018. – № 8. – С. 20–28.

12. Костомахин, М. Н. Устройство дистанционного мониторинга параметров надежности сельскохозяйственной техники / М. Н. Костомахин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2021. – № 1. – URL: https://panor.ru/magazines/selskokhozyaystvennaya-tekhnika-obsluzhivanie-i-remont/numbers/3688.html# (дата обращения: 20.06.2025).

13. Портативный диагностический комплекс (ELPI + EDD) : сайт Akrit Engineering. – 2010–2026. – URL: https://akritengineering.com/ru/pds.html (дата обращения: 20.06.2025).

14. Свеча накаливания с датчиком давления для VW AG от BERU : эл. ресурс. – URL: https://www.tehparts.com/about/articles/69/ (дата обращения: 15.05.2025).

15. Тарасенко, В. Е. Эффективные методы и средства диагностирования автотракторных двигателей / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2025. – Вып. 58. – С. 268–273.

16. Ролич, О. Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5 (135). – С. 42–45.

17. Тарасенко, В. Е. Программный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования / В. Е. Тарасенко, О. Ч. Ролич, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2025. – Вып. 58. – С. 305–312.

18. Ерохин, М. Н. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники / М. Н. Ерохин, А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев // Агроинженерия. – 2021. – № 2 (102). – С. 45–50.

19. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий / Ю. В. Катаев, М. Г. Загоруйко, И. А. Тишанинов, Е. А. Градов // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 79–82.

УДК 629.3.014

Поступила в редакцию 20.12.2025
Received 20.12.2025

В. Е. Тарасенко[1], А. А. Жешко[2], В. Д. Буслаев[1]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: trs9@yandex.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МАСЛА АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Аннотация. Представлены результаты анализа этапов развития и функциональных возможностей систем встроенного контроля износа пар трения автотракторных двигателей, в основе которых лежит мониторинг наличия ферромагнитных и диамагнитных частиц посредством индуктивной катушки. Приведены результаты углубленного лабораторного анализа моторного масла тракторного дизеля с использованием оптико-эмиссионного спектрометра.

Ключевые слова: двигатель, масло, износ, система контроля, мониторинг феррочастиц, датчик, индуктивная катушка.

V. E. Tarasenka[1], A. A. Zheshka[2], V. D. Buslaev[1]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: trs9@yandex.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com

MONITORING THE OIL CONDITION OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR ENGINES AT THE PRESENT STAGE

Abstract. The article presents the results of an analysis of the development stages and functional capabilities of integrated wear monitoring systems for friction pairs in automotive and tractor engines. These systems are based on monitoring the presence of ferromagnetic and diamagnetic particles using an inductive coil. The results of an in-depth laboratory analysis of tractor diesel engine oil using an optical emission spectrometer are also presented.

Keywords: engine, oil, wear, control system, ferroparticle monitoring, sensor, inductive coil.

Введение

Рабочие показатели масел являются комплексными диагностическими признаками технического состояния агрегатов машин и оборудования для выявления причин повышенной интенсивности их изнашивания [1]. А смазочное действие – один из способов управления надежностью машин и оборудования [1, 2]. В связи с этим важным является совершенствование методов контроля масел и обоснование нормативов их состояния.

Работа поршневых колец и гильз цилиндров происходит в условиях высоких удельных давлений и температур при ограниченной смазке трущихся поверхностей [3, 4]. При этом температуры верхнего поршневого кольца находятся в пределах 250–420 °С и 200–260 °С – гильзы цилиндра в районе верхней мертвой точки (ВМТ), удельные давления поршневых колец на гильзу (цилиндровую втулку) составляют 2,5–3,5 МПа [3, 5]. В таких условиях микрочастицы износа трущихся поверхностей прирабатываемых деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) постоянно

взаимодействуют с моторным маслом, играющим роль смазки и притирочной среды. При движении поршня вниз в подпоршневой области цилиндра бóльшая часть смазочного масла с частицами износа деталей ЦПГ удаляется со стенок цилиндра в картер [3].

Основным материалом компрессионных колец является серый чугун. С помощью различных способов литья, легирования и термической обработки чугуна добиваются необходимых свойств поршневых колец. Для форсированных дизельных двигателей применяются поршневые кольца из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, а также стальные хромированные компрессионные кольца и дорогостоящие марки аустенитного чугуна и нержавеющей стали (типа Х12М) [6].

Большинство моделей дизельных двигателей имеют компрессионные поршневые кольца, изготовленные из высокопрочного чугуна с пределом прочности 1300–1700 МПа, с износостойким покрытием. На 63 % моделей в качестве износостойкого покрытия используют хром, на 32 % – молибден и на 5 % – плазменное напыление [7].

Основная часть

Производителями мобильной техники и автотракторных двигателей (АТД) сформированы программы фирменного технического сервиса. Для анализа технических жидкостей рекомендован и регулярно осуществляется плановый отбор проб моторного масла, анализ результатов которого определяет интервалы его замены на основе браковочных норм и тенденций изменения состояния, установленных для конкретного двигателя. Также предусматривается проверка масла на наличие загрязнений для последующего анализа состояния двигателя, выявления недостатков в его техническом обслуживании и первых признаков чрезмерного износа. Так как условия эксплуатации АТД могут серьезно влиять на тип и степень загрязнения масла, то интервалы отбора проб зависят от двигателя и условий его эксплуатации, а оценка проб масла включает анализ продуктов износа, определение состояния масла. Анализ продуктов износа позволяет отслеживать скорость износа деталей путем обнаружения и измерения концентрации продуктов износа, содержащихся в масле. Исходя из известных данных о нормальной концентрации, устанавливаются предельно допустимые концентрации продуктов износа. После трехкратного отбора проб масла можно построить графики изменения содержания различных продуктов износа для конкретного АТД. Отклонение этих графиков от установленных нормальных значений позволяет выявлять приближающиеся неисправности.

Достаточно эффективным индикатором наличия продуктов износа в масле выступает индуктивная катушка, которая физически «видит» металлические частицы и разделяет их на два класса: ферромагнитные (сталь, чугун) и проводящие неферромагнитные (медь, алюминий, аустенит). Ферромагнитные частицы, попадая в зону поля катушки, повышают локальную магнитную проницаемость, из-за чего меняется индуктивная составляющая сигнала (катушка регистрирует импульс как изменение индуктивности). Неферромагнитные проводящие частицы, попадая в зону поля катушки, не изменяют магнитную проницаемость, однако они также возбуждают вихревые токи, которые увеличивают потери энергии магнитного поля катушки (катушка регистрирует импульс как рост потерь энергии).

Известна малогабаритная система встроенного контроля «АИДА» [8] для определения степени износа кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и ЦПГ АТД в режиме реального времени и прогнозирования их остаточного ресурса. Диагностическими признаками в данном случае являются концентрация, размер и материал продуктов износа. Они позволяют определить возможные места и стадии износа, а изменение концентрации показывает интенсивность развития неисправностей. При этом происходит осаждение из масла продуктов износа (Fe, Pb, Sn) в рабочий объем датчика с определением их состава и массы электронным блоком. Данная система имеет высокую чувствительность (около 0,0001 г массы частиц износа в рабочем объеме датчика), большой диапазон регистрации металлов и сплавов и высокую надежность.

Известно устройство для контроля износа пар трения [9], включающее стакан из немагнитного материала с охватывающей его индуктивной катушкой, регистрирующий прибор и термо-

датчик, установленный в стакан из немагнитного материала. Для определения ферромагнитных и диамагнитных частиц металла катушка выполнена в виде колебательного контура, частота которого обратно пропорциональна индуктивности катушки, емкости параллельно включенного конденсатора и напряжению питания самого контура. Термодатчик используется для измерения температуры внутри маслопровода с целью программной коррекции результатов измерений.

Данное устройство позволяет повысить чувствительность и точность контроля износа пар трения, изготовленных из ферромагнитных и цветных металлов, исключить влияние температуры смазочного материала и может быть использовано как для трибодиагностики АТД, так и для диагностики иных агрегатов, турбин, редукторов, компрессоров, гидравлических систем, а также отдельных деталей и узлов машин. Это позволит: своевременно получить информацию о возникновении износных отказов и предупреждать аварийные ситуации; максимально использовать ресурс работы, заложенный в машину, увеличить межремонтные сроки и контролировать качество проведения ремонта, что в конечном счете, приводит к сокращению затрат времени и труда, а также к уменьшению расхода запасных частей; научно-обоснованно назначать сроки замены масла в системе смазки машин, подобрать оптимальный смазочный материал для конкретных пар трения; повысить качество и культуру обслуживания.

Описываемое устройство позволяет фиксировать изнашивание сопряжений АТД, но какого-либо управляющего воздействия на работу АТД не оказывает. Недостатком его также является нерациональное расположение датчика контроля износа пар трения.

Авторы патента, связанного с анализом ферромагнитных частиц в масле, отмечают: «Имеются технические решения, напрямую использующие для анализа частиц их ферромагнитные свойства. Последние влияют на индуктивность охватывающей объем масла электрической катушки, являющейся составной частью колебательного контура» [10].

В патенте, связанном с обнаружением частиц металла в системе смазки и определения его вида, описывается способ обнаружения неферромагнитных частиц так: «Прохождение немагнитной частицы металла с высокой электропроводностью (медь, латунь, бронза) в плоскости чувствительного элемента связано с возникновением вихревых токов в объеме частицы металла, которые создадут вторичное электромагнитное поле (ЭМП), противодействующее ЭМП чувствительного элемента от тока. В идеальном случае поле частицы металла полностью компенсирует первичное поле в области поверхности чувствительного элемента, покрываемой частицей металла. В результате магнитный поток чувствительного элемента уменьшится на некоторую величину» [11].

В опубликованных исследованиях описываются методы определения размера частиц металла в масле [11]. Так, например, в ранее цитированном исследовании отмечается: «С измерительной цепи выходной сигнал поступает в блок обработки данных, в котором формируется информация о числе и типе частиц металла, а также *на основе вероятностного подхода* относят обнаруженную частицу металла к одной из размерных групп».

Несколько углубившись в изучение данного направления контроля, следует отметить, что прообразом системного мониторинга феррочастиц в масле можно считать *магнитные пробки*, используемые в редукторах и картерах, начиная с 1930-х гг. При этом магниты на сливных пробках в нижних точках картера собирают стружку, которую мастер-диагност оценивает при очередном ТО. Позже добавили самоуплотняющиеся адаптеры для извлечения без слива масла [12–14].

Более поздним прообразом (с конца 1960-х гг.) явились *магнитные ловушки* (магнитные стержни, вставки) в возвратных линиях и корпусах фильтров. Такие ловушки собирали ферромагнитные частицы до попадания в фильтрующую среду или на ее поверхности. По регламенту мастер-диагност извлекал стержень/кассету и визуально оценивал количество и характер частиц (иногда одновременно контролируя перепад давления на фильтре) [15].

В авиации, начиная с 1970-х гг., известно применение *магнитных чип-детекторов* (пробок с магнитом и электрической цепью индикации). Их устанавливают в потоке масла на «обратке». Принцип работы: пробка-датчик с постоянными магнитами и двумя электродами образует небольшой зазор между электродами. Датчик включен в электрическую цепь индикации. Маг-

ниты притягивают ферромагнитные частицы из масла. Накопление продолжается, пока частицы не замкнут цепь, образовав проводящий мостик в зазоре, – тогда срабатывает индикация на панели. Факт замыкания цепи рассматривается как ранний индикатор износа шестерен и подшипников [16–18].

На примере патента [19] можно изучить комбинированную схему, принципы которой применяются и сегодня: классическое улавливание частиц *постоянным магнитом* сочетается с *индуктивной катушкой*, намотанной вокруг магнита. Магнит удерживает ферромагнитные частицы, а катушка измеряет изменение индуктивности среды с учетом того, что частицы находятся не во взвешенном, а сконцентрированном состоянии в зоне поля. Такой подход, за счет концентрации частиц в области измерения, снижает требуемую чувствительность датчика.

Для измерения размеров и концентрации металлических частиц был предложен вихретоковый преобразователь (ВТП), состоящий из нескольких катушек. Возбуждающая катушка создает переменное магнитное поле, а пары измерительных – регистрируют его изменение при пролете частиц [20]. По сравнению с одиночной катушкой, симметричное размещение нескольких измерительных катушек относительно канала делает анализ более устойчивым. Устройство работает в двух режимах: первый режим – ориентировочного определения счетной концентрации частиц в жидкости и подключения к усилителю оптимального числа измерительных катушек (в зависимости от концентрации); второй – режим раздельного определения размеров и счетной концентрации металлических частиц [20].

Следует отметить еще одну конструкцию *индуктивной катушки,* выполненную в виде *сетчатого экрана* в потоке, который совмещает две функции – первичное физическое улавливание частиц и последующую индуктивную диагностику с помощью токопроводящей части экрана [21].

Постепенное усложнение средств привело к тому, что современные индуктивные системы существенно развились в отличие от ранних решений: помимо катушек, они используют успокоители потока, встроенные датчики температуры/давления и реализуются как сквозные или байпасные узлы с нормированными присоединениями и цифровыми интерфейсами. Такая конструкция обеспечивает более точный счет частиц, разделение Fe/NFe и размерные категории, однако требует места и стабильного потока.

В настоящее время наибольшее распространение исследуемые системы получили в крупных двигателях, трансмиссиях и промышленных установках: двигатели морских судов; газотурбинные двигатели и маслосистемы ТЭС/ГПУ; редукторы и коробки передач ветроэнергетических установок; трансмиссии карьерных самосвалов и буровых установок горнодобывающей отрасли; гидротрансформаторы и редукторы крупной строительной техники. Производители исследуемых систем технически допускают их установку на АТД и трансмиссии более легкой техники, однако на практике такие решения встречаются главным образом в виде точечных внедрений (испытательные стенды, опытные парки).

Современные системы можно разделить на два варианта исполнения. Первый – с несколькими катушками (чаще одна измерительная и две возбуждающие), позволяющими регистрировать возмущение магнитного поля при прохождении частиц через чувствительную зону. Второй – с катушкой в сочетании с постоянным магнитом, который сначала концентрирует ферромагнитные частицы на своей поверхности, после чего катушка оценивает изменение индуктивности, пропорциональное накопленному материалу.

Среди датчиков первого исполнения известны интегрируемые в обходной вспомогательный контур DM4500 (Poseidon Systems) и MWDS (Parker Kittiwake), а также интегрируемый в основной контур MS4000 (Gastops). Работают по схожему принципу: одновременно анализируют Fe/NFe, выдают распределение по размеру и общий счет – и именно этот принцип обеспечивает ключевое преимущество по информативности перед накопительными решениями [22–26].

Среди датчиков второго исполнения, получивших наибольшее распространение, выделяется OPCom FerroS (ARGO-HYTOS). Он работает по описанному ранее принципу, однако дополнительно стоит отметить функцию автоматической очистки: посредством компенсации поля постоянного магнита (размагничивания) частицы отделяются от торца и уносятся потоком масла, что поддерживает непрерывность измерений. Как указывает производитель, по временным ин-

тервалам между циклами очистки можно оценивать степень износа. Чувствительность таких датчиков выражается не в микрометрах, а в суммарном количестве ферромагнитного материала на магните, обычно как процент заполнения или в условных единицах [27, 28].

Выбор между поточными и накопительными решениями определяется задачами контроля: поточные обеспечивают большую информативность, а накопительные дают простую и чаще более экономичную оценку по ферромагнитному материалу (занятость, интервалы между самоочистками) при более мягких требованиях к точке установки и условиям среды.

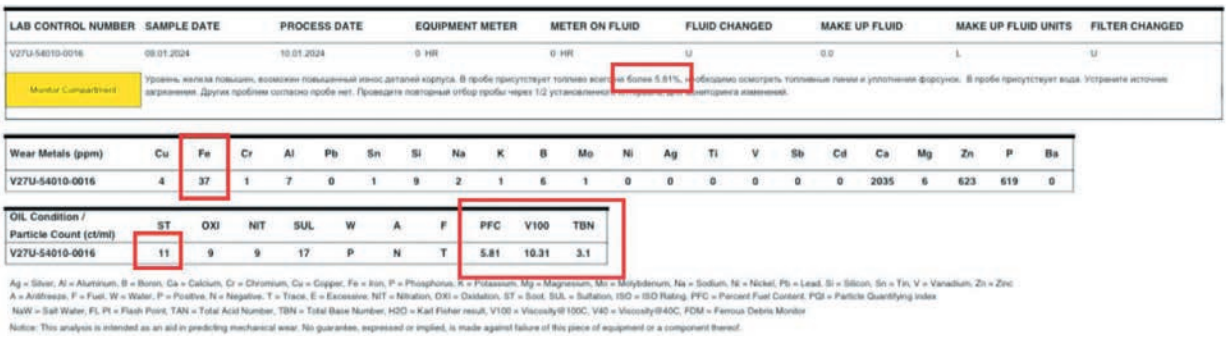
Решение задачи снижения габаритов диагностической системы возможно посредством разработки и внедрения более рациональных схем намотки катушки индуктивности. Это демонстрируется в относительно новом российском патенте [29], в рамках которого предложено фиксировать наличие металлических частиц в трансмиссионном масле с использованием планарной катушки Тесла.

Комплексные исследования образцов свежих и отработанных масел позволили разработать интеллектуальные алгоритмы оценки состояния масла (ОСА), которые способны определять его состояние на основе параметров, непосредственно измеряемых в масле (динамическая вязкость, плотность, диэлектрическая проницаемость, проводимость, уровень масла, температура). При этом используются новые комбинированные пьезоэлектрические датчики (на основе монокристаллического кварца), основным элементом которых является камертон, так называемые *камертонные датчики* [30]. Электродами со всех сторон поверхности вызывают периодическую и упругую деформацию материала корпуса под воздействием электрического переменного напряжения. Эта вибрация создает электрический переменный ток, который течет через электроды. Электрический импеданс, рассматриваемый как соотношение между возбуждающим переменным напряжением и результирующим переменным током, является функцией, зависящей от стимулирующей частоты, свойств упругого материала, гидродинамических свойств поверхности датчика и свойств окружающей среды. Для измерения механического демпфирования и массовой нагрузки камертона, колеблющегося в масле, этот резонатор работает в диапазоне его резонансной частоты. Благодаря выбранной конструкции эта частота у рассматриваемого датчика расположена в нижнем диапазоне (кГц). Несмотря на объемные колебания камертона, амплитуда которого составляет около 100 нм, он устойчив к внешним возмущениям, таким как механические вибрации, удары по креплению датчика или акустический шум, благодаря особой сбалансированной конструкции.

Для анализа изменения резонансной кривой используется электромеханическая модель. Комплексный импеданс изгибных резонаторов (например, датчика камертона) можно смоделировать с помощью эквивалентной электрической схемы [30]. Формулы модели содержат переменные: динамическая вязкость η, удельная плотность ρ, диэлектрическая проницаемость ε и электрическая проводимость σ окружающей среды. С помощью алгоритма нелинейной оптимизации эти параметры вычисляются и дают прямую информацию о параметрах физического состояния.

В отличие от общепринятых концепций и алгоритмов оценки состояния масла (к маслу предъявляют несколько очень важных, сложных в контроле требований и показателей, не поддающихся инструментальному контролю) благодаря последним разработкам стало возможным за счет интеграции всей системы аппаратного и программного обеспечения управления состоянием масла мобильных машин более конкретно и точно адаптировать интервалы технического обслуживания и замены масла к двигателю машины и режиму его эксплуатации.

Существенным преимуществом рассмотренного алгоритма определения состояния масла с использованием пьезоэлектрических датчиков является многомерный анализ его параметров [31], при котором они нелинейно комбинируются для прогнозирования состояния масла. Таким образом, можно определить важные свойства масла, такие как содержание сажи, воды или разбавление дизельного топлива. Однако данные алгоритмы и технические средства не позволяют определять места и стадии активного изнашивания деталей двигателя, так как в масле не ведется учет продуктов износа (железо, алюминий, хром, медь, свинец, олово, кремний, никель, молибден, титан, калий, магний, кальций и др.) с определением их состава и массы электронными средствами. Не осуществляется контроль интенсивности развития неисправностей.



LAB CONTROL NUMBER	SAMPLE DATE	PROCESS DATE	EQUIPMENT METER	METER ON FLUID	FLUID CHANGED	MAKE UP FLUID	MAKE UP FLUID UNITS	FILTER CHANGED
V27U-54010-0016	09.01.2024	10.01.2024	0 HR	0 HR	U	0.0	L	U

Monitor Compartment

Уровень железа повышен, возможен повышенный износ деталей корпуса. В пробе присутствует топливо всего на более 5.81%, необходимо осмотреть топливные линии и уплотнения форсунок. В пробе присутствует вода. Устраните источник загрязнения. Других проблем согласно пробе нет. Проведите повторный отбор пробы через 1/2 установленного [illegible] мониторинга изменений.

Wear Metals (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	B	Mo	Ni	Ag	Ti	V	Sb	Cd	Ca	Mg	Zn	P	Ba
V27U-54010-0016	4	37	1	7	0	1	9	2	1	6	1	0	0	0	0	0	0	2035	6	623	619	0

OIL Condition / Particle Count (ct/ml)	ST	OXI	NIT	SUL	W	A	F	PFC	V100	TBN
V27U-54010-0016	11	9	9	17	P	N	T	5.81	10.31	3.1

Ag = Silver, Al = Aluminum, B = Boron, Ca = Calcium, Cr = Chromium, Cu = Copper, Fe = Iron, P = Phosphorus, K = Potassium, Mg = Magnesium, Mo = Molybdenum, Na = Sodium, Ni = Nickel, Pb = Lead, Si = Silicon, Sn = Tin, V = Vanadium, Zn = Zinc
A = Antifreeze, F = Fuel, W = Water, P = Positive, N = Negative, T = Trace, E = Excessive, NIT = Nitration, OXI = Oxidation, ST = Soot, SUL = Sulfation, ISO = ISO Rating, PFC = Percent Fuel Content, PQI = Particle Quantifying Index
NaW = Salt Water, Fl, Pt = Flash Point, TAN = Total Acid Number, TBN = Total Base Number, H2O = Karl Fisher result, V100 = Viscosity@100C, V40 = Viscosity@40C, FDM = Ferrous Debris Monitor
Notice: This analysis is intended as an aid in predicting mechanical wear. No guarantee, expressed or implied, is made against failure of this piece of equipment or a component thereof.

Результаты лабораторного анализа моторного масла (итоговый протокол)

Одним из важнейших критериев оценки качества масла считают интенсивность изнашивания подшипников коленчатого вала, цилиндров и поршневых колец. Для оценки износа в цилиндрах применяют датчики с различными чувствительными элементами. Для оценки задиров поршня используют датчик, состоящий из двух термопар. Для контроля зазора между цилиндром и рабочей поверхностью применяют индуктивный датчик, позволяющий выявить поломку или залипание колец.

Таким образом, существует необходимость в определении методов прогнозирования технического состояния сопряжений АТД, которые бы использовали гибкий инструментарий, способный периодически самообучаться на протяжении всего периода эксплуатации и тем самым учитывать комплексное влияние факторов, определяющих скорость изнашивания сопряжений.

Современным и наиболее достоверным методом выступает анализ масел с использованием оптико-эмиссионного спектрометра, в котором происходит сгорание предварительно пробы масла при большой температуре (700 °С) и последующее позиционирование пламени на детекторе с передачей данных измерения на компьютер. Данный метод показывает поэлементно как продукты присадок, так и частицы металла (22 элемента). С целью ознакомления с возможностями описанного метода выполнен анализ моторного масла М-10$Г_2$ дизеля Д-260.1 (наработка масла составила порядка 125 ч) трактора «Беларус-1523» в специализированной лаборатории. Результаты анализа представлены на рисунке.

Заключение

Как следует из итогового протокола (рисунок), в пробе масла наблюдается повышенное накопление частиц железа. Исходя из значений нагрузки на двигатели данного диапазона мощности в составе трактора, это обстоятельство можно считать нормой. Присутствуют элементы сигнализации возможного попадания (передозирования) топлива или ухудшения подачи чистого воздуха – повышенное содержание сажи 11 ед. (30 ед. – предельно, сажа провоцирует повышенный износ деталей). Содержание топлива в масле – 5,81 %, выше рекомендованного предела (4 %). Падение вязкости моторного масла – 10,31, допустимо снижение не более трех единиц от базового (обычно составляет 14 ед.). Кислотное число (TBN) по данным анализа составило 3,1, что граничит с пределом снижения по допуску. В соответствии с нормативами не рекомендуется снижение ниже 50 % от базового, у Caterpillar было 14 единиц. По данным итогового протокола следует сделать вывод, что по двум последним случаям целесообразна замена моторного масла.

Однако следует отметить, что описанный выше метод углубленного анализа является дорогостоящим, его можно реализовать лишь в хорошо оснащенной лаборатории.

Задачей при выборе и разработке средств контроля состояния моторных масел является повышение чувствительности и точности контроля износа деталей основных узлов, механизмов и систем АТД, изготовленных как из ферромагнитных, так и цветных металлов; своевременное получение информации о возникновении износных отказов и предупреждение аварийных ситуаций, осуществление контроля интенсивности развития неисправностей и достижение максимально полного использования ресурса работы АТД, увеличение межремонтных сроков,

уменьшение расхода запасных частей при обоснованных сроках замены масла в системе смазки двигателя.

Совокупность указанных существенных признаков позволит обеспечить работу АТД при различных нагрузочных режимах и условиях окружающей среды, повысить чувствительность и точность контроля износа деталей основных узлов, механизмов и систем двигателя, изготовленных как из ферромагнитных, так и цветных металлов; своевременно получать информацию о возникновении износных отказов и предупреждать аварийные ситуации, осуществлять контроль интенсивности развития неисправностей и обеспечить достижение максимально полного использования ресурса работы АТД при обоснованных сроках замены масла в системе его смазки.

Список использованных источников

1. Дунаев, А. В. Исследование диагностических параметров, разработка методов и средств их контроля для совершенствования диагностирования и технического обслуживания МТП АПК / А. В. Дунаев, А. С. Соловьев – М. : ГОСНИТИ, 2014. – 359 с.

2. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В. П. Миклуш [и др.] ; Минсельхозпрод Респ. Беларусь, УО «БГАТУ». – Мн. : БГАТУ, 2019. – 392 с.

3. Нечаев, Е. П. Безразборный контроль интенсивности изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы дизелей / Е. П. Нечаев // Вестник МГТУ. – 2013. – № 4. – Т. 16. – С. 771–776.

4. Венцель, С. В. Спонтанные процессы, протекающие на смазанных поверхностях трения / С. В. Венцель, Е. А. Миронов // Трение и износ. – 1982. – № 1. – Т. 3. – С. 100–107.

5. Перч, В. Д. Мгновенная сила трения поршневого уплотнительного кольца / В. Д. Перч, Р. М. Петриченко, А. В. Шабанов // Двигателестроение. – 1984. – № 3. – С. 7–9.

6. Григорьев, М. А. Обеспечение надежности двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. – М. : Издательство стандартов, 1977. – 324 с.

7. Афинеевский, С. А. Особенности конструкций поршневых колец современных автомобильных двигателей. Обзорная информация / С. А. Афинеевский, Ю. А. Коган, М. Н. Сильницкая // Автомобильные двигатели. – М. : НИИТавтопром, 1984. – 32 с.

8. Матвеевский, Б. Р. Метод контроля износа узлов трения / Б. Р. Матвеевский, В. Р. Матвеевский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 1. – С. 14–16.

9. Патент РФ МПК (2006.01) G01N 3/56. Устройство для контроля износа пар трения : № 77 438 U1 : заявлено 30.04.2008 : опубл. 20.10.2008 / Матвеевский Б. Р., Матвеевский В. Р.

10. Патент РФ, МПК (2006.01) G01N 27/72. Способ анализа ферромагнитных частиц в масле : № RU2390012C1 : заявлено 16.03.2009 : опубл. 20.05.2010 / Сергеев С. М., Лозовой Л. Н.

11. Патент РФ МПК G01B7/14 F16N29/04. Способ обнаружения с повышенной чувствительностью, определения вида и оценки размера частиц металла в процессе изнашивания подшипников в проточных системах смазки силовых установок : RU2814854C1 : заявлено 03.03.2023 : опубл. 03.05.2024 / Белопухов В. Н. и др. ; заявитель ФГБУН Самарский Федеральный Исследовательский Центр РАН.

12. Патент США № US6111492. Magnetic drain plug (Магнитная сливная пробка) / Fink R.

13. How to Analyze Contaminants on Magnetic Drain and Fill Plugs/ Meritor, Inc. – URL: https://graphicvillage.org/meritor/TP0838.pdf (date of access: 16.09.2025).

14. Патент США № US5782141A. Engine having a non-intrusive self-closing valve for magnetic chip detectors (Двигатель с неинвазивным самозапирающимся клапаном для датчиков магнитной стружки) / R. J. Schoolcraft.

15. Патент США № US3800914A. Magnetic filter for lubricants (Магнитный фильтр для смазочных материалов) / S. Miyata.

16. Патент США № US4598280A. Electric chip detector (Электрический чип-детектор) / M. P. Bradford.

17. Патент США № US3432750A. Chip detector for magnetic and non-magnetic conductive particles (Детектор стружки ферромагнитных и неферромагнитных проводящих частиц) / D. W. Botstiber.

18. Патент СССР МПК: F16N 29/04. Сигнализатор наличия магнитной стружки в масле : № SU1247617A1 : заявлено 11.02.1985 : опубл. 30.07.1986 / Блувштейн Е. С. и др. ; заявитель Воронежский политехнический институт.

19. Патент США № US4731578A. Electrical sensing system for measuring ferrous particles within a fluid (Электрическая сенсорная система для измерения ферромагнитных частиц в технической жидкости) / E. Tsaprazis.

20. Патент СССР G 01 N 27/74. Вихретоковое устройство для измерения размеров и концентрации металлических частиц в жидкости: № SU1522085A1 : заявлено 23.09.1987 : опубл. 15.11.1989 / Быховский Ю. С. и др. ; заявитель Куйбышевский авиационный институт имени С. П. Королева.

21. Патент США № US5118410A. Debris collecting and measuring device with induction coil screen (Устройство для сбора и анализа частиц с индукционной экранирующей катушкой) / W. E. Rumberger.

22. Poseidon Systems. Trident DM4500/ Wear Debris Monitor. – URL: https://servintel.com/wp-content/uploads/2023/12/Poseidon-Systems-Trident-DM4500.pdf (date of access: 23.09.2025).

23. Metallic Wear Debris Sensor. Real time indication of condition / Parker Kittiwake. – URL: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Hydraulic-Filter-Division-Europe/Websphere-Literature/MAK19755PA_MWDS_ISS3.pdf (date of access: 23.09.2025).

24. Metallic Wear Debris Sensor. Software Protocol Manual / Parker Kittiwake. – URL: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Hydraulic-Filter-Division-Europe/Websphere-Literature/MWDS-Manual-MA-K19555-KW.pdf (date of access: 23.09.2025).

25. Metalscan MS4000 Online Oil Debris Monitoring System / Gastops. – URL: https://www.gastops.com/wp-content/uploads/MS4000-Product-Overview.pdf (date of access: 23.09.2025).

26. MetalSCAN MS4000. On-Line Oil Debris Monitor / Gastops. – URL: https://vbr-turbinepartners.com/wp-content/uploads/2017/12/MS4000-Specification-Sheet.pdf (date of access: 23.09.2025).

27. OPCom FerroS. Continuous Oil Condition Monitoring /ARGO-HYTOS. – URL: https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Datasheet_OPCom_FerroS_10055_EN_US.pdf (date of access: 24.09.2025).

28. OPCom FerroS. SPCO 500-1000 / ARGO-HYTOS. – URL: https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Manual_OPCom_Ferros_V1.05.16_EN.pdf (date of access: 24.09.2025).

29. Патент РФ МПК G01N 27/00, G01N 38/28, G01N 33/30, F01N 11/10. Способ оперативного контроля качества трансмиссионного масла: № RU2758746 : заявлено 11.03.2021 : опубл. 01.11.2021 / Филатов И. С. и др. ; заявитель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

30. Dobrinski, H. Micro-sensors for automotive liquid properties monitoring (D5.4) / Heiko Dobrinski, Torsten Eggers, Jörg Stürmann [and others] // SENSOR + TEST Conferences. – 2011, SENSOR Proceedings. – pp. 612–617.

31. Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия : ГОСТ 8581–2021. – Взамен ГОСТ 8581-78 ; введ. 2022.07.01 – М. : Российский институт стандартизации, 2022.

УДК 621.43.032

Поступила в редакцию 18.07.2025
Received 18.07.2025

В. Е. Тарасенко[1], А. А. Жешко[2], А. Л. Барташевич[3]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: trs9@yandex.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com
[3]РО «Белагросервис»
Минская область, г. Фаниполь
Республика Беларусь

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОТКАЗАМИ ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ДИЗЕЛЕЙ

Аннотация. Выполнены этапы математической обработки данных наблюдений за отказами топливных насосов гарантийных дизелей Д-245, определены числовые характеристики случайной величины с целью идентификации закона распределения. Определены данные для расчета теоретической кривой нормального закона распределения.

Ключевые слова: отказ, двигатель, насос, закон, интервал, частота, величина.

V. E. Tarasenka[1], A. A. Zheshka[2], A. L. Bartashevich[3]

[1]UI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: trs9@yandex.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com
[3]RA "Belagroservice Republican Association"
Minsk region, Fanipol
Republic of Belarus

MATHEMATICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA ON FAILURES OF DIESEL FUEL PUMPS

Abstract. The stages of mathematical processing of data on observations of failures of fuel pumps of warranty diesel engines D-245 have been performed, numerical characteristics of a random variable have been determined in order to identify the distribution law. The data for calculating the theoretical curve of the normal distribution law are determined.

Keywords: failure, motor, pump, law, interval, frequency, magnitude.

Введение

Известно, что средний массовый результат множества случайных явлений оказывается практически неслучайным, предсказуемым. Это является базой для практического применения вероятностных (статистических) методов исследования [1]. Одной из главных задач статистической обработки данных является выбор того или иного закона распределения для исследования случайной величины. Существует несколько критериев, по которым можно осуществить предварительный выбор закона распределения случайной величины:

– на основании данных о механизме образования случайной величины;

– путем анализа гистограммы и полигона частот: если гистограмма колоколообразная, то в первом приближении можно говорить о нормальном законе распределения случайной величины;

– по величине коэффициента вариации (таблица 1).

Таблица 1 – **Соотношение коэффициента вариации и закона распределения**

Коэффициент вариации v	Вид закона распределения
0,08–0,40	нормальный закон
0,40–0,85	закон Вейбулла
0,35–0,80	логарифмический закон
0,60–1,30	экспоненциальный закон

Примечание: составлено на основе [1].

В практических задачах наряду с представленными законами распределения случайных величин достаточно широкое распространение получили законы: логарифмически-нормальный, Рэлея, гамма-распределение, «χ-квадрат» и др. Для решения реже встречающихся практических задач могут быть использованы еще свыше двадцати законов распределения [1, 2]. Большинство из них математически взаимосвязаны, и практически любой с помощью справочных зависимостей может быть трансформирован в более известный закон.

Законы распределения имеют большое значение для теории и практики с точки зрения оценки и обеспечения показателей надежности объекта. Они позволяют осуществлять контроль уровня надежности в эксплуатационных условиях, оценивать возможности дальнейшего увеличения ресурса, определять необходимость выполнения работ по совершенствованию мобильных машин и по повышению уровней их показателей надежности [2, 3].

Основная часть

Согласно статистической информации службы сервиса ОАО «МТЗ» в разрезе трех лет, в течение которых осуществлялись статистические наблюдения (2021–2023 гг.), порядка 30 % отказов касается системы питания топливом, свыше 20 % отказов приходится на топливные насосы (таблица 2). По данным источников [4, 5, 6] на долю топливной аппаратуры приходится 40–50 % (45–60 %) всех отказов автотракторных двигателей. Среди основных отказов двигателей энергонасыщенных тракторов порядка 37 % приходится на топливные насосы высокого давления (ТНВД) [7]. По данным ученых, занимающихся вопросами надежности автотракторной техники, существенная доля отказов дизеля (20–30 %) приходится на топливную аппаратуру, а при эксплуатации в тяжелых условиях она достигает 50 % [8].

Таблица 2 – **Статистические данные по свершившимся отказам составляющих компонентов двигателей Д-245 в гарантийный период за 2021–2023 гг. по регионам Беларуси (информация службы сервиса ОАО «МТЗ»)**

Повторяющиеся выходы из строя, свершившиеся отказы составляющих компонентов двигателей Д-245	2021	2022	2023
Генератор	59	43	49
Стартер	19	24	12
Свечи накала	7	11	7
Насос топливный	85	53	47
Пневмокомпрессор	9	10	11
Картер	45	31	12
Кронштейн крепления генератора	20	13	13
Термостат	10	9	14
Форсунки	26	13	13
Насос шестеренный	13	8	20
Насос водяной	8	7	16
Всего	301	222	214

При сопоставлении статистических данных по отказам составляющих компонентов двигателей Д-245 и Д-260 в гарантийный период эксплуатации (2021–2023 гг.) следует отметить, что численность свершившихся отказов компонентов топливной аппаратуры дизелей Д-260 существенно ниже (таблица 3). Так, число отказов топливных насосов (насосы РР6М10Р1F-3492, РР6М10Р1Т-3395) по дизелям Д-260 (во многих случаях дизеля Д-260.2S2-478) не превышает 12 % от общей численности зафиксированных отказов.

Таблица 3 – **Статистические данные по свершившимся отказам составляющих компонентов двигателей Д-245 и Д-260 в гарантийный период за 2021–2023 гг. по регионам Республики Беларусь (информация службы сервиса ОАО «МТЗ»)**

Повторяющиеся выходы из строя, свершившиеся отказы составляющих компонентов двигателей Д-245 и Д-260	2021		2022		2023	
	Д-245	Д-260	Д-245	Д-260	Д-245	Д-260
Генератор	59	62	43	52	49	42
Стартер	19	15	24	35	12	32
Свечи накала	7	39	11	39	7	29
Насос топливный	85	29	53	26	47	19
Пневмокомпрессор	9	27	10	25	11	21
Картер	45	0	31	0	12	2
Кронштейн крепления генератора	20	0	13	10	13	6
Термостат	10	14	9	7	14	8
Форсунки	26	26	13	9	13	10
Насос шестеренный	13	5	8	8	20	10
Насос водяной	8	9	7	8	16	9
Всего	301	226	222	219	214	188

Целью математической обработки данных наблюдений за отказами топливных насосов является определение числовых характеристик случайной величины с целью идентификации закона распределения. Фрагмент массива данных по отказам топливных насосов (насосы 4УТНИ-1111007-420.1 АО «НЗТА», г. Ногинск, Россия, насосы РР4М10Р1i-3701 «MOTORPAL a.s.», Чехия) тракторных дизелей Д-245 (Д-243) по регионам Республики Беларусь за 2023 г. представлен в таблице 4. Общая выборка данных состоит из 36 зафиксированных отказов.

Первые этапы математической обработки данных наблюдений – формирование первичной статистической совокупности (таблица 5) и упорядоченной статистической совокупности (таблица 6).

При этом наибольшим и наименьшим значениями исходных данных являются следующие величины:

$$x_{min} = 3\,750;\ x_{max} = 4\,733.$$

Размах варьирования выборки определяли как разницу между наибольшим и наименьшим значениями исходных данных

$$R = x_{max} - x_{min}.$$
$$R = 4\,733 - 3\,750 = 983.$$

Количество интервалов группирования определяли по зависимости (1)

$$K = 1 + 3{,}3\lg n. \quad (1)$$
$$K = 1 + 3{,}3\lg 36 = 6{,}135.$$

Принимаем $K = 6$.

Величину интервала группирования определяли по зависимости (2)

$$H = R/K. \quad (2)$$
$$H = 983/6 = 163{,}84.$$

Принимаем $H = 164$.

Таблица 4 – **Фрагмент массива данных по отказам топливных насосов тракторных дизелей Д-245 и Д-243 по регионам Республики Беларусь за 2023 г.**

Конструкторский элемент	Категория	Способ устранения	Техцентр	Область техцентра	Район владельца	Владелец	Модель трактора	Винкод продукции	Наработка
515 458 # Дизель Д-245S2-3541, ТУ РБ 101 326 441.140-2004	2	Ремонт	Филиал ОАО «МТЗ» «Торговый Дом BELARUS» Отделение по Гродненской области	Гродненская	Вороновский	КСУП «Мисевичи»	1025.3	Y4R102 502M1 100 099	4417
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Дрогичинский	ОАО «Осиповичи»	82.1	Y4R900Z01M1 105 142	3970
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	Филиал «АгроэнергоЗеленевичи» РУП «Брестэнерго»	82.1	Y4R900Z01M1 106 803	4570
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	ОАО «Ровбицкое»	82.1	Y4R900Z01M1 106 746	3794
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Жабинковский	ОАО «Ракитница»	82.1	Y4R900Z01M1 105 744	4050
243S2-0 000 100 # Дизель Д-243S2	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	ОАО «Ровбицкое»	82.1	Y4R900Z01M1 106 746	4020
240-0 000 100-92 # Дизель Д-243	1	Ремонт	ОАО «Заднепровский межрайагросервис»	Могилевская	Костюковичский	КСУП «Демидовичский»	82.1	Y4R900Z01M1 109 046	3750
514 745 # Дизель Д-243S2-1581, ТУ РБ 05 786 459.111-2000	2	Замена	ОАО «Витебский завод тракторных запасных частей»	Витебская	Толочинский	ОАО «Обольцы»	82.1	Y4R900Z01M1 108 851	4036
514 747 # Дизель Д-243S2-1583, ТУ РБ 05 786 459.111-2000	2	Замена	ОАО «Кобринский завод агропромышленного машиностроения»	Брестская	Пружанский	Филиал «Агроэнерго Зеленевичи» РУП «Брестэнерго»	82.1	Y4R900Z01M1 106 803	4183

Таблица 5 – **Первичная статистическая совокупность**

№ события	Наработка до отказа, ч	№ события	Наработка до отказа, ч	№ события	Наработка до отказа, ч	№ события	Наработка до отказа, ч
1	4 417	10	4 183	19	3 955	28	3 750
2	3 970	11	4 326	20	4 304	29	4 142
3	4 570	12	3 849	21	4 237	30	3 755
4	3 794	13	3 875	22	4 104	31	4 565
5	4 185	14	4 161	23	4 132	32	4 383
6	4 050	15	4 020	24	4 103	33	4 328
7	4 020	16	4 545	25	4 399	34	4 539
8	3 750	17	4 073	26	4 250	35	4 733
9	4 036	18	4 722	27	3 760	36	4 125

Таблица 6 – **Упорядоченная статистическая совокупность**

Порядковый номер	Наработка до отказа, ч	Порядковый номер	Наработка до отказа, ч	Порядковый номер	Наработка до отказа, ч	Порядковый номер	Наработка до отказа, ч
1	3 750	10	4 020	19	4 142	28	4 383
2	3 750	11	4 020	20	4 161	29	4 399
3	3 755	12	4 036	21	4 183	30	4 417
4	3 760	13	4 050	22	4 185	31	4 539
5	3 794	14	4 073	23	4 237	32	4 545
6	3 849	15	4 103	24	4 250	33	4 565
7	3 875	16	4 104	25	4 304	34	4 570
8	3 955	17	4 125	26	4 326	35	4 722
9	3 970	18	4 132	27	4 328	36	4 733

Центр распределения выборки находили из отношения (3):

$$D = (x_{\max} + x_{\min}) / 2. \quad (3)$$

$$D = (4\,733 + 3\,750) / 2 = 4\,241{,}5.$$

Далее производили расчет частот, частостей, накопленных частот, накопленных частостей, плотности распределения частот и частостей. Результаты заносили в сводную таблицу 7.

Таблица 7 – **Упорядоченная статистическая совокупность**

№	Границы интервалов	Середины интервалов x	Частоты n_i	Частости $P_i = n_i/n$	Накопленные частоты H_i	Накопленные частости $P_H = H_i/n$	Плотность частот $F = n_i/h$	Плотность частостей $F_n = P_i/h$
1	3750–3914	3 832	7	0,19 444 444	7	0,19 444 444	0,04 268 293	0,0 011 856
2	3914–4078	3 996	7	0,19 444 444	14	0,38 888 889	0,04 268 293	0,0 011 856
3	4078–4242	4 160	9	0,25	23	0,63 888 889	0,05 487 805	0,0 015 244
4	4242–4406	4 324	6	0,16 666 667	29	0,80 555 556	0,03 658 537	0,0 010 163
5	4406–4570	4 488	5	0,13 888 889	34	0,94 444 444	0,0 304 878	0,0 008 469
6	4570–4734	4 652	2	0,05 555 556	36	1	0,01 219 512	0,0 003 388
			$\sum = 36$	$\sum = 1$				

На основании полученных выше данных выполнили построение гистограммы (рисунок 1), ломаной кумуляты (рисунок 2), полигона (рисунок 3) и ступенчатой кумуляты (рисунок 4).

Определяли числовые характеристики эмпирического распределения. Определение математического ожидания

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \quad (4)$$

где $\overline{X}$ – математическое ожидание; n – объем выборки; x_i – случайная величина.

$$\overline{X} = 4\,169{,}7222.$$

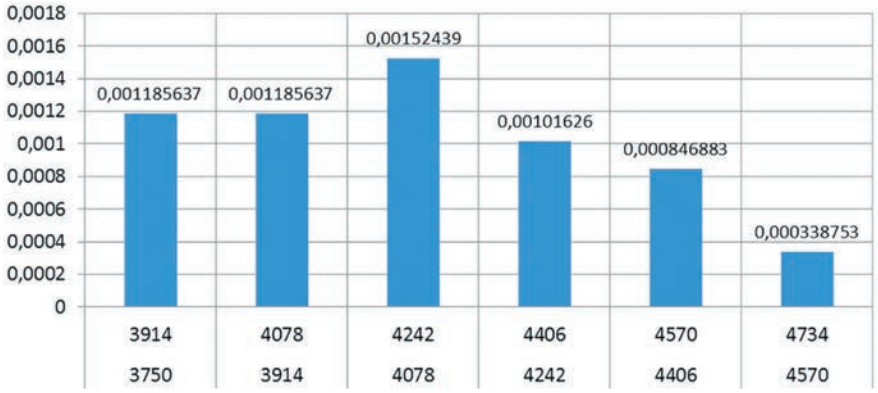


Рисунок 1 – Гистограмма

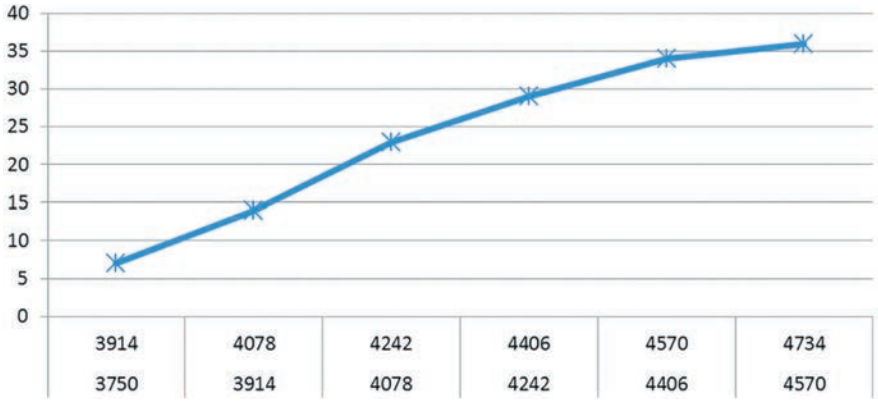


Рисунок 2 – Ломаная кумулята

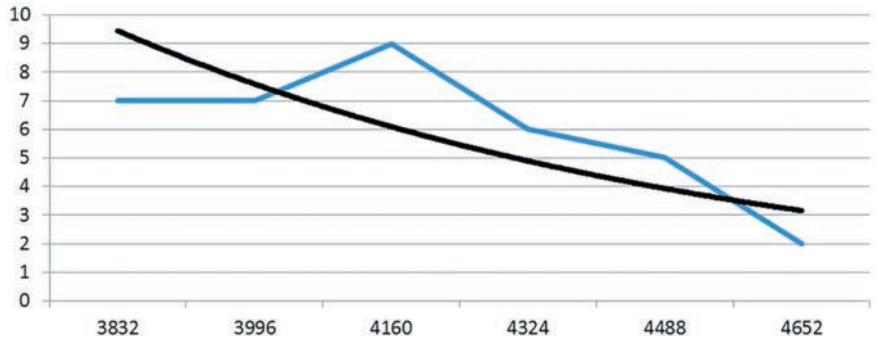


Рисунок 3 – Полигон

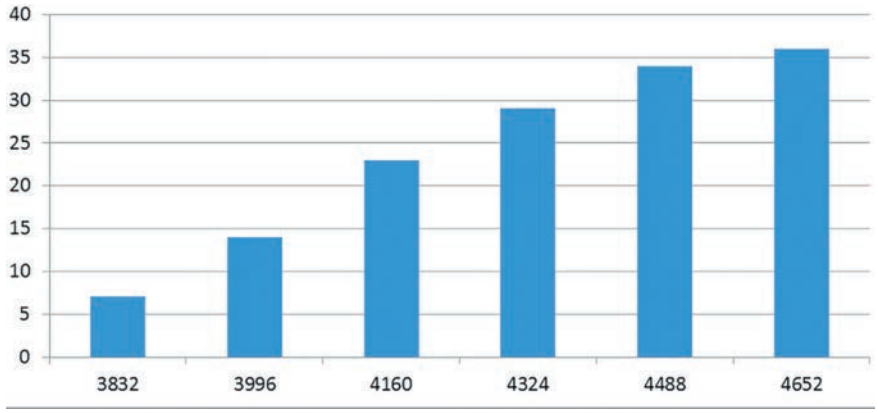


Рисунок 4 – Ступенчатая кумулята

Дисперсия D определяется по зависимости (5)

$$D = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{X}\right)^2. \quad (5)$$

$$D = 76\,073{,}578.$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) определили

$$\sigma = \sqrt{D}.$$

$$\sigma = 275{,}8143901.$$

Коэффициент вариации нашли из соотношения (6)

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}}. \quad (6)$$

$$V = 6{,}614694586.$$

где σ – среднее квадратическое отклонение (СКО); $\bar{X}$ – математическое ожидание.

Определение медианы (аналитическое и графическое). Аналитическое определение медианы. Находим интервал, содержащий медиану, путем использования накопленных частот H_i. Медианному интервалу соответствует первая из накопленных частот, превышающая половину всего объема совокупности.

$$Me = X_{Me(\min)} + \frac{h\left(\frac{n}{2} - H_{i(Me-1)}\right)}{n_{i\,Me}}.$$

где $X_{Me(\min)}$ – нижняя граница медианного интервала; h – ширина интервала; n_{iMe} – частота медианного интервала; $H_{i(Me-1)}$ – накопленная частота интервала, предшествующего медианному; n – объем выборки.

$$Me = 4078 + \frac{164 \cdot \left(\frac{36}{2} - 14\right)}{9} = 4150{,}89.$$

Графическое определение медианы.

Последнюю ординату кумуляты делим пополам. Из полученной точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кумулятой. Абсцисса точки пересечения и дает значение медианы.

Проверка аналитического и графического метода определения медианы

$$Me_{(\text{аналитическая})} \approx Me_{(\text{графическая})}.$$

Определение моды.

Находим модальный интервал, т. е. интервал, содержащий моду, по наибольшей частоте:

$$Mo = X_{Mo(\min)} + \frac{h\left(n_{iMo} - n_{i(Mo-1)}\right)}{\left(n_{iMo} - n_{i(Mo-1)}\right) + \left(n_{iMo} - n_{i(Mo+1)}\right)},$$

где $X_{Mo(\min)}$ – нижняя граница модального интервала; n_{iMo} – частота модального интервала; $n_{i(Mo-1)}$ – частота интервала, предшествующего модальному; $n_{i(Mo+1)}$ – частота интервала, следующего за модальным.

$$Mo = 4078 + \frac{164 \cdot (9-7)}{(9-7) + (9-6)} = 4143{,}6.$$

Определение асимметрии и эксцесса.

Вычисления осуществляем по способу «условного нуля», используя вспомогательные коэффициенты (x_O = 4 160 – середина интервала с максимальной частотой). Полученные результаты заносим в таблицу 8.

Таблица 8 – **Определение асимметрии и эксцесса**

№	Границы интервалов	Середина интервала x_i	Частота n_i	$x_i' = \frac{x_i - x_0}{h}$	$n_i \cdot x_i'$	$n_i \cdot x_i'^2$	$n_i \cdot x_i'^3$	$n_i \cdot x_i'^4$	$x_i' + 1$	$n_i (x_i' + 1)^4$
1	3750–3914	3 832	7	–2	–14	28	–56	112	–1	7
2	3914–4078	3 996	7	–1	–7	7	–7	7	0	0
3	4078–4242	4 160	9	0	0	0	0	0	1	9
4	4242–4406	4 324	6	1	6	6	6	6	2	96
5	4406–4570	4 488	5	2	10	20	40	80	3	405
6	4570–4734	4 652	2	3	6	18	54	162	4	512
			$\sum = 36$		1	79	37	367		1029

Рассчитаем вспомогательные коэффициенты:

$$\gamma_1 = \frac{\sum(6)}{\sum(4)}.\ \gamma_1 = \frac{1}{36} = 0,02777778.$$

$$\gamma_2 = \frac{\sum(7)}{\sum(4)}.\ \gamma_2 = \frac{79}{36} = 2,194444.$$

$$\gamma_3 = \frac{\sum(8)}{\sum(4)}.\ \gamma_3 = \frac{37}{36} = 1,0277778.$$

$$\gamma_4 = \frac{\sum(9)}{\sum(4)}.\ \gamma_4 = \frac{367}{36} = 10,194444.$$

$$\gamma_5 = \frac{\sum(11)}{\sum(4)}.\ \gamma_5 = \frac{1029}{36} = 28,5833333.$$

Проверка:

$$\gamma_5 = 4\gamma_1 + 6\gamma_2 + 4\gamma_3 + \gamma_4 + 1.$$

$$\gamma_5 = 4 \cdot 0,02777778 + 6 \cdot 2,194444 + 4 \cdot 1,0277778 + 10,194444 + 1 = 28,5833333.$$

Найдем:

$$\gamma_1^2 = (0,02777778)^2 = 0,000771605.$$

$$\gamma_1^3 = (0,02777778)^3 = 2,14335E - 05.$$

$$\gamma_1^4 = (0,02777778)^4 = 5,95374E - 07.$$

$$\mu_1 = \gamma_2 - \gamma_1^2.\ \mu_1 = 2,194444 - (0,02777778)^2 = 2,19367284.$$

$$\mu_2 = \gamma_3 - 3\gamma_1\gamma_2 + 2\gamma_1^3.$$

$$\mu_2 = 1,0277778 - 3 \cdot 0,02777778 \cdot 2,194444 + 2 \cdot 0,02777778^3 = 0,84495027.$$

$$\mu_3 = \gamma_4 - 4\gamma_1\gamma_3 + 6\gamma_1^2\gamma_2 - 3\gamma_1^4.$$

$$\mu_3 = 10,194444 - 4 \cdot 0,02777778 \cdot 1,0277778 + 6 \cdot 0,02777778^2 \cdot 2,194444 - 3 \cdot 0,02777778^4 = 10,0904046.$$

Проверка:

$$\gamma_4 = \mu_3 + 4\gamma_1\mu_2 + 6\gamma_1^2\mu_1 + \gamma_1^4.$$

γ_4 = 10,0904046 + 4·0,02777778·0,84495027 + 6·0,02777778^2·2,19367284 + 0,02777778^4 = 10,1944444.

$$\overline{X} = x_0 + h\gamma_1.\ \overline{X} = 4160 + 164\cdot 0{,}02777778 = 4164{,}555556.$$

$$S = h\sqrt{\mu_1}.\ S = 164\sqrt{2{,}19367284} = 242{,}901265.$$

$$A_S = \frac{\mu_2}{\sqrt{\mu_1}^3}.\ A_S = \frac{0{,}84495027}{\sqrt{2{,}19367284}^3} = 0{,}26005988.$$

$$E_x = \frac{\mu_3}{\mu_1^2} - 3.\ E_x = \frac{10{,}0904046}{2{,}19367284^2} - 3 = 0{,}90316207.$$

Так как результат для A_S положительный, то, следовательно, асимметрия правосторонняя (математическое ожидание расположено правее моды).

Так как эксцесс отрицательный, то, следовательно, вершина эмпирической кривой распределения лежит выше вершины теоретической кривой.

Выбор теоретического закона распределения (выбор осуществляем по коэффициенту вариации, а также по виду полигона и гистограммы). В нашем случае коэффициент вариации равен 6,61 %, на основании чего выбираем нормальный закон распределения.

Расчет теоретической кривой нормального закона распределения представлен в таблице 9. Значения функции *f*(*t*) представлены в столбце 7.

Таблица 9 – **Расчет теоретической кривой нормального закона распределения**

№	Границы интервалов	Середины интервалов x_i	Частоты n_i	$x_i - \overline{X}$	Нормированное отклонение $\frac{x_i - \overline{X}}{S}$	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-t^2}{2}}$	Теоретические Частоты $n_t = \frac{hn}{S} f(t)$	
							Вычисл.	Округ.
1	3750–3914	3 832	7	–337,7	–1,39 036 822	0,24 968 738	6,068 944 383	6
2	3914–4078	3 996	7	–173,7	–0,71 519 677	0,35 369 443	8,596 957 745	8
3	4078–4242	4 160	9	–9,722	–0,04 002 532	0,3 989 072	9,695 907 145	9
4	4242–4406	4 324	6	154,28	0,63 514 614	0,35 820 163	8,706 510 423	8
5	4406–4570	4 488	5	318,28	1,31 031 759	0,25 609 155	6,224 605 353	6
6	4570–4734	4 652	2	482,28	1,98 548 904	0,14 577 229	3,543 166 332	3
			$\sum = 36$					

Приведенные в таблице 9 данные используются для расчета и построения теоретической кривой нормального закона распределения.

Заключение

Выполнена математическая обработка данных наблюдений за отказами топливных насосов тракторных дизелей Д-245 и Д-243, определены числовые характеристики случайной величины с целью идентификации закона распределения. На основании полученных данных выполнено построение гистограммы, ломаной кумуляты, полигона и ступенчатой кумуляты, а также аналитическое и графическое определения медианы. Получены данные для расчета теоретической кривой нормального закона распределения.

Список использованных источников

1. Щурин, К. В. Планирование эксперимента : практ. рук. / К. В. Щурин, В. И. Кочурко, В. Н. Основин [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. – Барановичи : БарГУ, 2022. – 260 с.

2. Щурин, К. В. Надежность мобильных машин : учебник для вузов / К. В. Щурин, В. Е. Тарасенко. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 400 с.

3. Щурин, К. В. Надежность мобильных машин / К. В. Щурин ; Оренбургский государственный университет. – Оренбург : ОГУ, 2010. – 585 с.

4. Хабардин, В. Н. Практикум по диагностированию автотракторных двигателей : учеб. пособие / В. Н. Хабардин. – Иркутск : Иркутский ГАУ им. А. А. Ежевского, 2019. – 208 с.

5. Петровский, Д. И. Диагностирование топливной системы высокого давления дизелей по амплитудно-фазовым параметрам топливоподачи : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.20.03 / Петровский Дмитрий Иванович ; МГАУ имени В. П. Горячкина. – М. : 2004. – 20 с.

6. Ткаченко, Н. В. Анализ способов восстановления деталей топливной аппаратуры / Н. В. Ткаченко // Наука без границ. – 2018. – № 6(23). – С. 48–52.

7. Катаев, Ю. В. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий / Ю. В. Катаев, М. Г. Загоруйко, И. А. Тишанинов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 79–82.

8. Марусин, А. В. Совершенствование диагностирования плунжерных пар ТНВД автотракторных дизелей : дис. … канд. техн. наук : 05.20.03 / Марусин Александр Вячеславович ; СГТУ имени Ю. А. Гагарина. – Саратов, 2016. – 133 л.

УДК 663.479.1

Поступила в редакцию 27.01.2026
Received 27.01.2026

Е. Л. Жилич[1], А. М. Мазур[2], А. Б. Торган[2], Е. В. Таразевич[2], Д. Ф. Кольга[2], С. А. Костюкевич[2]

[1]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: npc_mol@mail.ru
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: rektorat@atu.edy.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА КОНЦЕНТРАТА КВАСНОГО СУСЛА И КВАСА ИЗ КАРТОФЕЛЯ

Аннотация. В статье приведены результаты исследования технологических процессов получения концентрата квасного сусла и картофельного кваса из картофеля и доброкачественных отходов картофеля; рассмотрено влияние комплекса гидролитических ферментных препаратов на глубину процесса осахаривания и качество готового продукта.

Ключевые слова: квас, осахаривание крахмала, концентрат квасного сусла, термообработка концентрата.

E. L. Zhilich[1], A. M. Mazur[2], A. B. Torgan[2], E. V. Tarazevich[2], D. F. Kolga[2], S. A. Kostyukevich[2]

[1]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru
[2]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: rektorat@atu.edy.by

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PRODUCTION OF KVA SAUCE CONCENTRATE AND KVA FROM POTATOES

Abstract. The article presents the results of a study of the technological processes of obtaining kvass wort concentrate and potato kvass from potatoes and high-quality waste; the influence of a complex of hydrolytic enzyme preparations on the depth of the saccharification process and the quality of the finished product is considered.

Keywords: kvass, starch saccharification, kvass wort concentrate, heat treatment of the concentrate.

Введение

У всех народностей есть свои излюбленные напитки: у немцев и чехов – это пиво, у болгар – буза, у американцев – кока-кола, а у славян – квас. Возраст кваса – тысяча с лишним лет. Древние народы для приготовления напитков брожения из хлебного сырья дробили зерно, готовили из него тесто, которое нагревали в глиняных сосудах раскаленными камнями, что приводило к частичному осахариванию крахмала. Полученную массу разводили водой и затем оставляли для брожения, которое происходило самопроизвольно. В старину готовили и потребляли хлебные, фруктовые, ягодные, медовые и другие виды кваса. Основное сырье, используемое для производства кваса: рожь, ячмень, пшено, гречиха, фрукты, ягоды, мед, сахар, различные пряности, травы, коренья.

Квас – прохладительный напиток, насыщенный диоксидом углерода, с приятным ароматом ржаного хлеба и кисло-сладким вкусом. Квас относится к безалкогольным напиткам, он утоляет жажду, освежает и поднимает тонус, и кроме всего прочего обладает многими полезными свойствами.

Существенное значение для организма человека имеет микрофлора хлебного кваса, к которой относятся дрожжи-сахаромицеты и молочнокислые бактерии. Эти микроорганизмы обога-

щают хлебный квас витаминами B_1, B_2, PP, D, молочной кислотой, диоксидом углерода и т. д. Комплекс этих органических соединений с углеводами и аминокислотами определяет полезность хлебного кваса.

Несмотря на большое распространение кваса, технология приготовления его была примитивна, а квасоваренные заводы характеризовались небольшой мощностью и преобладающим использованием ручного труда. При переработке хлебного сырья (хлебные сухари, мука, солод и т. д.) в процессе производства кваса терялось до 30 % экстрактивных веществ.

Значительный вклад в совершенствование технологии кваса и интенсификацию отдельных производственных процессов внесли ученые и специалисты отрасли Д. А. Королев, Л. И. Чекан, П. М. Мальцев, В. В. Рудольф, Ф. Ф. Якубович [1–6].

В настоящее время машиностроительные заводы освоили производство высокоэффективного современного оборудования для сбраживания и купажирования кваса, бродильно-купажных аппаратов и высокопроизводительных разливочных машин. Для производства кваса используют чистые культуры дрожжей и молочнокислых бактерий, что позволяет получить значительно улучшенное качество кваса и повысить его пищевую ценность.

В 100 г кваса содержится: 93,4 г воды, 0,2 г белков, 5,0 г углеводов, 0,2 г зольных элементов, 0,3 г органических кислот и 0,6 г спирта. Энергетическая ценность хлебного кваса в пересчете на 1 л составляет 250 ккал (1 050 кДж).

Квас готовят на заводах безалкогольных напитков непосредственно из хлебного сырья либо из концентрата квасного сусла, сахара, лимонной или молочной кислот и различных пищевых добавок.

В связи с выраженной сезонностью потребление кваса (теплый период года) для обеспечения его выпуска в требуемом количестве особое значение приобретает производство концентрата квасного сусла, позволяющего быстро и без больших трудовых затрат обеспечить изготовление требуемого объема.

Квас делят на хлебный квас брожения и газированный, полученный купажированием. Хлебные квасы брожения – хлебный и окрошечный – составляют более 90 % общего количества квасов и напитков, приготовленных на хлебном сырье. Квас получают на основе ржаного и ячменного солода, ржаной и ячменной муки, квасных хлебцев или концентрата квасного сусла. Хлебный квас брожения содержит 5,4–5,8 % сухих веществ. Такой квас имеет коричневый цвет, непрозрачный, с небольшим осадком дрожжей. При купажировании кваса используют сахарный сироп. Для некоторых сортов кваса применяют концентраты яблочного и виноградного сока, ряд вкусовых и ароматических добавок.

Концентрат квасного сусла представляет собой вязкую густую жидкость темно-коричневого цвета, кисло-сладкого вкуса с ароматом ржаного хлеба. Концентрат квасного сусла содержит около 70 % сухих веществ с кислотностью в пределах 16–40 °Т (16–40 мл нормального раствора щелочи на 100 г концентрата).

В отдельные виды кваса добавляют настои трав, чая, цитрусовых, спиртовые настои мяты и полыни. Для создания среды заданной кислотности используют молочную, лимонную или уксусную кислоты. Срок хранения полученного концентрата составляет около 2 лет.

Приготовление напитка типа кваса из полученного концентрата осуществляется уже известными способами, предусматривающими либо непродолжительное сбраживание, либо карбонизацию (насыщение углекислотой).

В основе производства квасов брожения лежат анаэробные процессы незавершенного спиртового и молочнокислого брожения. Брожение идет при 30 °С. При приготовлении хлебного кваса брожения часто проводят замену 50 % концентрата квасного сусла неохмеленным пивным суслом из расчета 64,8 $дм^3$, с содержанием сухих веществ 15 % на 100 дал кваса.

Сбраживание сахара в квасном сусле в количестве 0,8 % не может обеспечить интенсивного брожения, поэтому перед брожением в сусло вводят 25 % сахара от общей массы, расходуемой для приготовления кваса.

Путем проведения купажирования сброженного квасного сусла с сахарным получают хлебный квас брожения. Купажирование кваса и перемешивание среды длится около 6,5 ч, а сбражи-

вание сусла – до 18 ч. Срок хранения кваса брожения – 2 суток. За это время содержание спирта в квасе возрастает до 1,2 %, а содержание сухих веществ снижается до 4,6 г/100 г кваса.

В бывшем Всесоюзном научно-исследовательском институте по производству питания из картофеля, который входил в структуру Научно-производственного объединения по продуктам питания из картофеля Министерства общего машиностроения СССР, сотрудники М. Т. Пашковская, Г. Р. Белко и др. разработали технологию получения концентрата квасного сусла из картофеля и его отходов при производстве других продуктов из картофеля, и технологию получения из концентрата квасного сусла картофельного кваса.

Картофель в нашей республике традиционно является вторым хлебом, а первая линия производства концентрата квасного сусла и картофельного кваса была изготовлена в условиях НПО по продуктам питания из картофеля и смонтирована на Узденском спиртовом заводе.

При производстве продукции на картофелеперерабатывающих предприятиях при варке картофеля образуются отходы, которые не используются и выбрасываются в канализацию, вызывая загрязнение сточных вод и увеличение расходов на строительство очистных сооружений. Эти отходы можно использовать для получения концентрата напитка типа кваса.

Исследование по разработке картофельного кваса началось во Всесоюзном научно-исследовательском институте по производству продуктов питания (г. Минск) в 1995–2000 гг. Способы получения концентрата и производства напитков на основе картофеля защищены авторскими свидетельствами [7, 8].

Цель работы: исследовать технологические процессы получения концентрата квасного сусла и картофельного кваса из картофеля и доброкачественных отходов; определить влияние комплекса гидролитических ферментных препаратов на глубину процесса осахаривания и качество готового продукта.

Основная часть

Технологический процесс производства концентрата квасного сусла из доброкачественных отходов осуществляли следующим образом.

Отходы картофеля направляли в емкости для ферментативной обработки, где происходило превращение крахмала в сахара, а сложных белков – в легкоусвояемые аминокислоты. Ферментативную обработку осуществляли в одну стадию препаратом Амилоризин П10 Х, обладающим амилолитической способностью – 2 000 ед/г, осахаривающей способностью – 1000 ед./г и протеолитической активностью – 30 ед/г, который вводят из расчета 10–15 ед. активности на 100 мл жидких отходов. Обработку проводили при температуре 45–50 °С в течение 35–45 мин. Затем ферментированную массу подвергали термической обработке при температуре 98–100 °С в течение 1–2 мин. для инактивации ферментов. После этого проводили фильтрацию и центрифугирование для осаждения оставшихся твердых частиц. Осветленное сусло подвергали вакуумупариванию в вакуум-аппарате до содержания сухих веществ 60–70 %. В полученное концентрированное сусло вносили вкусовые добавки: сахар, лимонную или молочную кислоты, в соответствии с разработанными рецептурами хлебных квасных напитков.

Концентрат напитков типа кваса, получаемый таким образом из отходов, образуемых при варке картофеля, представляет собой густую вязкую жидкость темно-коричневого цвета с кисло-сладким вкусом и приятным ароматом. Массовая доля сухих веществ в концентрате составляет 60–70 %, кислотность 25–30 °Т. Срок хранения полученного концентрата – 2 года.

Обработка жидких картофельных отходов Амилоризином П10 Х, вводимым из расчета 10–15 ед. активности на 100 мл жидких отходов, обеспечивает оптимальное осахаривание содержащегося в них крахмала наряду с расщеплением белковых веществ и тем самым обусловливает максимальное накопление и сохранение питательных веществ исходного сырья.

Введение ферментного препарата из расчета менее 10 ед. активности на 100 мл жидких отходов приводит к увеличению продолжительности процесса ферментации и к неполному осахариванию крахмала. Введение ферментного препарата более 15 ед. активности на 100 мл жидких отходов нецелесообразно, так как приведет к излишнему расходу ферментного препарата при достижении того же эффекта.

В дальнейших исследованиях при производстве концентрата использовали очищенный и неочищенный картофель; вносили сахар и молочную кислоту на разных стадиях производства концентрата; изменяли продолжительность и температуру термообработки концентрата.

Варку целого картофеля, как очищенного, так и неочищенного, производили в течение 30 минут, затем жидкость сливали, картофель мяли и протирали через сито. В полученное пюре добавляли слитую воду, тщательно перемешивали и при температуре 68–70 °С в виде водной вытяжки вносили раствор амилолитического ферментного препарата Амилоризин П10 Х для разжижения крахмала. При понижении температуры до 58 °С вносили остальное количество фермента. Одновременно очищенный и неочищенный картофель подвергали дроблению на терке. В кашицу добавляли воду из расчета получения в осахаренном сусле 13–15 % сухих веществ, вводили раствор ферментного препарата, нагревали до 68–70 °С при тщательном перемешивании, после чего варили при 0,18 МПа в течение 75 мин. А затем в охлажденную до 75 °С массу вносили остальное количество фермента.

Количество необходимого ферментного препарата определяли из расчета 400 ед. активности на 1 кг картофельного пюре. Качество осахаривания определяли по йодной пробе: обязательно должно быть окрашивание в коричневый цвет. Осахаренное сусло фильтровали через тканевой фильтр, а полученный фильтрат уваривали до содержания сухих веществ 70 %. В концентрат вносили молочную кислоту до получения кислотности 33–37 °Т. Затем образец делили на две части, одну из них подвергали термообработке при 0,06–0,07 МПа в течение 30 мин.

Результаты проведенных опытов показали, что использование неочищенного картофеля при получении концентрата квасного сусла обуславливает в готовом продукте слабый привкус и тон кожуры. Органолептические показатели концентрата, полученного при давлении 0,4–0,5 Мпа в течение 50 мин, мало отличаются по сравнению с концентратом из очищенного картофеля. Таким образом установлено, что при термообработке концентрата значительно улучшается аромат.

С целью улучшения вкуса и аромата получаемого из картофеля концентрата за счет накопления меланоидов изучено влияние внесения сахара и молочной кислоты в фильтрат перед упариванием и в концентрат перед термообработкой. Сахар вносили в количестве 2 и 5 % к содержанию сухих веществ фильтрата, молочную кислоту – из расчета получения в готовом концентрате кислотности 33–38 °Т. Упаривание фильтрата осуществляли до содержания сухих веществ 65–70 %. Установлено следующее:

– в концентрате, полученном из неочищенного картофеля, ощущается тон кожуры;

– введение сахара в фильтрат перед концентрированием в количестве 2 и 5 % и 2 % в концентрат по отношению к сухим веществам существенно не сказалось на органолептических показателях образцов концентрата, полученного из различно подготовленного и сваренного картофеля;

– введение молочной кислоты в фильтрат перед упариванием и в концентрат с последующей термообработкой образцов в обоих случаях практически одинаково улучшило органолептические показатели концентрата;

– термообработка образцов концентрата при температуре 114–116 °С и давлении 0,06–0,07 МПа в течение 30 мин усилила характерный для концентрата хлебный аромат.

Таким образом, при разработке аппаратурно-технологической схемы производства концентрата квасного сусла из картофеля необходимо:

– картофель подвергать очистке;

– разварить картофель в целом виде;

– молочную кислоту вносить в полученный концентрат перед процессом термообработки;

– термообработку концентрата с целью улучшения аромата осуществлять при температуре 110–112 °С (0,04–0,05 МПа) в течение 20–30 мин [9, 10].

Глубина гидролиза крахмала оказывает влияние на дальнейшие процессы при производстве концентрата – фильтрацию осахаренного затора, накопление ароматических веществ в концентрате при тепловой обработке.

Степень гидролиза крахмала и образующиеся при этом продукты могут существенно различаться в зависимости от того, какой ферментный препарат применен для осахаривания.

Промышленностью выпускаются два высокоэффективных препарата Амилосубтилин Г10Х и Амилоризин П10Х [11]. Препараты представляют собой тонкоизмельченные порошки бежевого

или светло-серого цвета влажностью не более 13 %. В состав Амилоризина П10Х входит комплекс ферментов с превалирующим действием α-амилазы. В качестве сопутствующих имеются протеолитические ферменты, мальтаза, α-эндополиглюканаза и др.

Стандартные уровни ферментативной активности промышленного ферментного препарата Амилоризин П10Х составляют, ед./г, не менее: амилолитическая способность – 2 000; осахаривающая способность – 1 000; протеолитическая активность – 30 при pH 4,7–5,4 и температуре 40–45 °С.

Амилосубтилин Г10Х представляет собой очищенный ферментный препарат, образуемый Bac. subtilis. Препарат содержит α-амилазу, α-глюканазу и протеазу. Амилолитическая способность этого препарата – не менее 3 000 ед./г, а протеолитическая активность – не более 2 ед/г. Оптимальные для действия Амилосубтилина Г10Х условия: pH 6,0–6,3; температура – составляет 50–55 °С. Бактериальная α-амилаза по сравнению с грибной обладает более высокой термостабильностью.

Для осахаривания крахмала при производстве концентрата из очищенного картофеля взят ферментный препарат Амилоризин П10 Х, обладающий высокой активностью амилолитических и протеолитических ферментов. Технология осахаривания крахмала картофеля указанным ферментным препаратом сначала была отработана в лабораторных условиях. Для исследования был взят сорт картофеля Скарб, содержание сухих веществ в клубнях составляет 15,5 %, крахмала – 12,5 %, редуцированных сахаров – 0,12 % [12]. Количество ферментного препарата составило 0,2–0,3 % к весу крахмала картофеля. Ферментный препарат вносили в два приема: при температуре 67–68 °С – 10 % для разжижения крахмала и при температуре 52–57 °С – 90 % для осахаривания крахмала. Продолжительность осахаривания составила 40–50 мин. Указанного количества препарата Амилоризин П10 Х оказалось недостаточно, осахаривание разваренного картофеля продолжалось 60–80 мин. Неполное осахаривание ухудшало процесс фильтрации. Для увеличения полноты осахаривания вносили дополнительное количество ферментного препарата (+25 %), что существенно влияет на удорожание этого процесса. Поэтому для повышения эффективности процесса осахаривания крахмала картофеля были взяты два ферментных препарата: Амилоризин П10 Х и мультиэнзимная композиция МЭК ПП-1. В состав последней входят эмилолитические ферменты бактериального и грибного происхождения, а также протеолитические ферменты. Температурный режим и процесс осахаривания проводили по ранее приведенной схеме.

С целью определения наилучшей эффективности использования ферментов для осахаривания картофельного крахмала были проведены следующие опыты по осахариванию картофельной массы:

– Амилоризином П10Х в количестве 0,2–0,45 % стандартной активности к весу крахмала;

– Амилоризином П10Х в комплексе с МЭК ПП-1 в количестве 0,2–0,3 % стандартной активности к весу крахмала;

– МЭК ПП-1 в количестве 0,2–0,3 % стандартной активности к весу крахмала.

При дозировке ферментных препаратов в количестве 0,2 % к весу крахмала на 1 кг картофеля приходилось около 120–180 ед. активности.

Уже в первые 15 мин во всех опытах даже с минимальной дозой ферментных препаратов происходило расщепление крахмала. Период распада декстринов длился значительно дольше, чем распад крахмала до декстринов. При дозе 0,4 % ферментного препарата Амилоризин П10Х хорошее осахаривание достигалось за 30–45 мин. Это же количество Амилоризина П10Х способствовало и более полному извлечению сухих веществ. Замена 30 % Амилоризина П10Х на МЭК ПП-1 способствовало улучшению процесса осахаривания и более полному извлечению веществ осахаренной массы, при этой дозе препаратов извлечение сухих веществ возросло на 58,8 %. Продолжительность процесса осахаривания составила при этом 30–45 мин. Наиболее полно проходил гидролиз сложных сахаров, крахмала и других веществ при использовании мультиэнзимной композиции (МЭК ПП-1). Извлечение сухих веществ при этом было выше на 14 % по сравнению с осахариванием Амилоризином П10Х и на 5 % по сравнению с осахариванием смесью ферментов (Амилоризина П10Х – 80 % и МЭК ПП-1–20 %) и составило 62,6 и 57,4 % соответственно.

Таким образом установлено, что осахаривание разваренной картофельной массы, содержащей 13–15 % сухих веществ, при использовании Амилоризина П10Х в количестве 0,3–0,35 % к крахмалу картофеля происходит в течение 45 мин, при использовании смеси ферментов Амилоризина П10Х и МЭК ПП-1 в соотношении 70–80 % и 20–30 % в количестве 0,3–0,4 % к крахмалу картофеля продолжительность осахаривания составляет 30–45 мин. Использование МЭК ПП-1 в дозе 3 % к крахмалу картофеля производит осахаривание крахмала в течение 30 мин. Применение для осахаривания крахмала мультиэнзимной композиции или в смеси с Амилоризином П10Х позволяет полностью провести гидролиз крахмала, белков и извлечь более 60 % сухих веществ осахаренной картофельной массы. При применении ферментного препарата Амилоризин П10Х извлекается только около 50 %. Применение одной композиции МЭК ПП-1 нецелесообразно, так как достигнутое увеличение извлечения сухих веществ не оправдывает затраты на ферментный препарат из-за его высокой стоимости.

Заключение

При разработке аппаратурно-технологической схемы производства концентрата квасного сусла из картофеля необходимо:

– картофель подвергать очистке, так как использование неочищенного картофеля при получении концентрата квасного сусла обуславливает в готовом продукте слабый привкус и тон кожуры;

– разваривать картофель в целом виде;

– молочную кислоту вносить в полученный концентрат перед процессом термообработки;

– термообработку концентрата с целью улучшения аромата осуществлять при температуре 110–112 °С, давлении 0,04–0,06 МПа в течение 20–30 мин.

Осахаривание разваренной картофельной массы, содержащей 13–15 % сухих веществ, при использовании препарата Амилоризин П10Х в количестве 0,30–0,35 % к крахмалу картофеля происходит в течение 45 мин. При использовании смеси ферментов Амилоризина П10Х и МЭК ПП-1 в соотношении 70–80 % и 20–30 % в количестве 0,3–0,4 % к крахмалу картофеля продолжительность осахаривания составляет 30–45 мин. Использование МЭК ПП-1 в дозе 3 % к крахмалу картофеля производит осахаривание крахмала в течение 30 мин. Применение для осахаривания крахмала мультиэнзимной композиции или в смеси с Амилоризином П10Х позволяет полностью провести гидролиз крахмала, белков и извлечь более 60 % сухих веществ осахаренной картофельной массы. При применении только одного ферментного препарата Амилоризин П10Х извлекается только около 50 %. Применение одной композиции МЭК ПП-1 нецелесообразно, так как достигнутое увеличение извлечения сухих веществ не оправдывает затраты на ферментный препарат из-за его высокой стоимости. Наиболее целесообразно для осахаривания крахмала картофеля при производстве концентрата применять смесь ферментных препаратов Амилоризин П10Х и МЭК ПП-1 (до 30 % последнего в смеси) в дозах 0,30–0,35 % к весу крахмала.

Список использованных источников

1. Королев, Д. А. Русский квас / Д. А. Королев. – М. : Пищепромиздат, 1963. – 54 с.

2. Королев, Д. А. Технология безалкогольных напитков : учеб. пособие / Д. А. Королев, Л. И. Чекан, М. И. Денщиков. – М. : Пищепромиздат, 1962. – 514 с.

3. Мальцев, П. М. Технология безалкогольных и слабоалкогольных напитков : спец. курс / П. М. Мальцев, М. В. Зазирная. – М. : Пищевая промышленность, 1970. – 335 с.

4. Рудольф, В. В. Технология и оборудование производства безалкогольных напитков : учеб. пособие / В. В. Рудольф. – М. : Пищевая промышленность, 1969. – 206 с.

5. Якубович, Ф. Ф. Производство хлебного кваса / Ф. Ф. Якубович. – 2-е изд. – М. : Пищевая промышленность, 1968. – 159 с.

6. Рудольф, В. В. Производство кваса. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 152 с.

7. Авторское свидетельство СССР № 1413939. Б. И. № 9, 1988. Способ производства концентрата квасного сусла из картофеля / Пашкова М. П., Белко Г. Р., Скрипниченко В. И. [и др.].

8. Авторское свидетельство СССР № 1170653. Б. И. № 14, 1989. Способ производства квасного напитка из картофеля / Пашкова М. П., Белко Г. Р., Скрипниченко В. И. [и др.]

9. Мазур, А. М. Элементы автоматизированного проектирования технологических процессов производства продуктов питания из картофеля / А. М. Мазур // Достижения науки и техники АПК. – 1988. – № 8. – С. 41–43.

10. Мазур, А. М. Машины и оборудование для переработки картофеля : монография / А. М. Мазур. – М. : Полимаг, 1999. – 372 с.

11. Машины и аппараты пищевых производств : учебник в 3 т. / С. Т. Антипов [и др.] ; под ред. акад. РАСХН В. Н. Панфилова, проф. В. Я. Груданова. – Мн. : БГАТУ, 2007. – Т. 1. – 420 с.

12. Сорта картофеля белорусской селекции: каталог / подгот. В. Л. Маханько [и др.], науч. ред. В. Л. Маханько. – РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоводству». – Мн., 2021. – 94 с.

УДК 631.3:658.345

Поступила в редакцию 25.07.2025
Received 25.07.2025

Ал-й Л. Мисун[1], В. В. Азаренко[2]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru
[2]Президиум Национальной академии наук Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ АГРЕГИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ АГРОПРОИЗВОДСТВА В ОЦЕНКЕ ЕЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация. Использован метод «главных компонент» для определения частных показателей безопасности производственной среды применительно к обобщающей агрегированной оценке агропроизводства. Предложен алгоритм агрегирования параметров производственной среды, рассмотрена динамика ее состояния в оценке безопасности.

Ключевые слова: безопасность, агропроизводство, агрегированные параметры состояния производственной среды, метод «главных компонент».

Al-i L. Misun[1], V.V. Azarenko[2]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru
[2]Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

TO THE QUESTION OF JUSTIFICATION OF AGGREGATE PARAMETERS AND DYNAMICS OF THE STATE OF THE PRODUCTION ENVIRONMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE ASSESSMENT OF ITS SAFETY

Abstract. The method of "principal components" is used to determine private indicators of the safety of the production environment in relation to the generalized aggregated assessment of agricultural production. An algorithm for aggregating the parameters of the production environment is proposed, the dynamics of its state in the safety assessment is considered.

Keywords: organizational level of agricultural production, production environment, article parameter, laboratory safety, inspection.

Введение

Тенденция к созданию агрегированных (обобщенных, комплексных) оценок безопасности производственной среды при эксплуатации технических средств существует давно [1–4] и объясняется тем, что агрегированные оценки производственной среды достаточно полно и объективно характеризуют степень сложности производственных условий, вследствие чего агропроизводства могут быть ранжированы по уровню производственного риска. При этом, когда измеряется влияние каждого отдельного фактора на агрегированную оценку производственной среды, определяется и вклад каждого из них в ее безопасность, в управление производственными рисками – наиболее значимой составной частью безопасной эксплуатации, например, технических средств. Концепция методологии управления производственными рисками и повышения эффективности и безопасности организации эксплуатации технических средств для АПК Республики Беларусь

должна базироваться на оценке приемлемости и выработке стратегии, повышении социально-экономического развития регионов. Особо при этом следует указать на факторы внешней среды, оказывающие влияние на организационный уровень агропроизводства: факторы правового статуса, законы и нормативные акты в области производственной безопасности, экономические (затраты на механизацию, сырье и материалы, средства защиты), технологические (уровень компьютеризации) и другие факторы.

С учетом взаимосвязей различных факторов агропроизводства, их использование для формирования единой системы показателей оценки производственной безопасности затруднено. В качестве же общего критерия ее оценки можно рассматривать в конкретных условиях организацию работ. Например, у операторов мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ), занятых эксплуатацией более энергоемких технических средств, выше вероятность травмирования. К тому же условия их работы меняются в зависимости от применяемых технологий и агросроков возделывания сельскохозяйственных культур. В этом случае определение агрегированной оценки безопасности производственной среды при эксплуатации МСХТ заключается и в расчете расходов на восстановление работоспособности МСХТ, переподготовку специалистов для ее обслуживания, рабочих кадров и др. Таким образом, для оценки опасности производственной среды агропроизводства необходимо проанализировать влияния состояния организационного уровня агропроизводства на безопасность работ, управление производственными рисками, определить факторы повышения эффективности агропроизводства.

Основная часть

Предугадать сценарий и результат безопасного производства не всегда представляется возможным в силу множества неопределенностей человеческой, организационно-технической, экономической и социальной направленности. Принятие решения и управление безопасностью труда в таких случаях связано с вероятностной определенностью, т. е. с понятием риска, от особенностей которого во многом зависят применяемые методы оценки и управления риском. При этом существование остаточного риска обуславливается невозможностью с точностью до ста процентов прогнозировать будущее. В тоже время риск имеет место только по отношению к будущему и неразрывно связан с прогнозированием и планированием, а значит, и с принятием решений вообще. Кроме того, управление риском подразумевает реализацию последовательных действий, начиная со сбора предварительной информации об объекте исследования и заканчивая повторной оценкой после реализации выработанных корректирующих действий. Для осуществления контроля производственного риска может использоваться пятиуровневый классификатор, шкалы которого рассчитываются с учетом функции желательности Харрингтона.

В процессе трудовой деятельности на работающего воздействуют факторы производственной среды, которые могут оказывать негативное влияние на здоровье [5–7]. При этом, не возникает сомнений в том, что полное исключение из процесса труда формирования неблагоприятных для здоровья факторов не всегда возможно даже в тех производствах, где внедрены передовые технологии, современное оборудование, высокая культура производства и качественное медицинское обслуживание. Для оценки же параметров производственной среды целесообразно использование метода «главных компонент», когда компоненты являются некоторыми новыми переменными F_j, сформированными на базе некоторых комбинаций частных оценок условий q_i. Различаются главные компоненты между собой относительными весами, с которыми каждая из частных оценок входит в ту или иную компоненту [8].

В целях большей наглядности целесообразно допустить, что уровень производственной безопасности агропроизводства характеризуется только двумя оценками – q_1 и q_2. Если теперь рассматривать частные оценки конкретного агропроизводства как координаты точек на плоскости с осями q_1 и q_2, то всей анализируемой совокупности агропроизводств можно поставить в соответствие определенное множество точек, нанесенных на эту плоскость. Число таких точек будет равно числу агропроизводств и, вместе взятые, они будут образовывать некоторую плоскую фигуру, так называемый «эллипс рассеивания» (рисунок 1). В такой интерпретации главные ком-

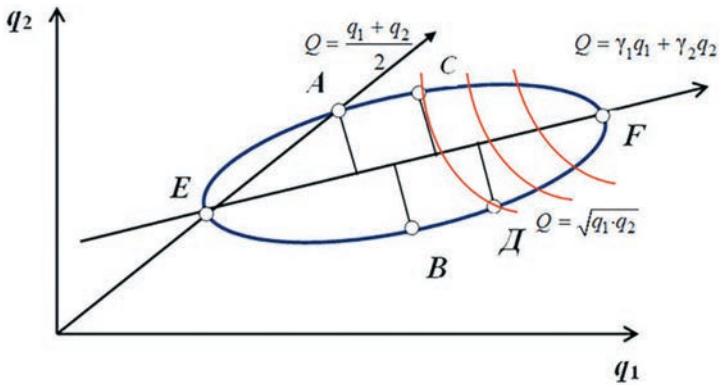


Рисунок 1 – Сравнение безопасности производственной среды методом агрегирования показателей

поненты представляют собой главные оси образованного точками эллипса. Рассмотрим каковы при этом причины рассеивания соответствующих агропроизводствам (N) точек на плоскости в направлении другой оси эллипса, т. е. в направлении существенной главной компоненты. Эта ось, как видно из рисунка 1, направлена из области низких оценок q_1 и q_2 в область высоких их значений: вблизи точки A находятся точки, которые соответствуют агропроизводствам с наиболее неудовлетворительным положением дел в части производственной безопасности. Точки же, соответствующие лучшим в этом смысле агропроизводствам, группируются на указанном рисунке вблизи точки B. Следовательно, существенная главная компонента характеризует собой тенденцию улучшения положения дел на агропредприятии при повышении оценок q_1 и q_2.

Отсюда, если соответствующие конкретным агропроизводствам точки спроектировать на главную компоненту, то на новой оси отсчета – главной компоненте, эти точки, а следовательно, и агропроизводства, оказываются ранжированными по принципу: чем хуже положение дел при выполнении работ, чем опаснее производственные условия, тем больше координата соответствующей точки на новой оси отсчета. Очевиден и смысл весовых характеристик γ_1 и γ_2. Каждая из них в отдельности характеризует смещение точек в направлении существенной главной компоненты – когда одна из оценок меняется, другая остается неизменной, а их вес показывает, в какой мере агрегированная оценка (Q) уровня безопасности производственной среды зависит от роста или снижения уровня одного частного показателя при неизменном уровне другого. Для сравнения методов формирования агрегированной оценки приведена (рисунок 1) геометрическая интерпретация не только предлагаемого, но и часто используемого метода обобщения частных оценок путем их усреднения – представления обобщенных оценок как среднеарифметических либо среднегеометрических величин. Формула для агрегированной оценки производственной среды в натуральном масштабе с учетом выражения (1) [8]:

$$\frac{Q - Q_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{о}}} = \sum_{j=1}^{m} P_j \frac{q_{ji} - q_{j\text{ср}}}{\sigma_{kj}}, \tag{1}$$

где $Q_{\text{ср,}}$ и $q_{j\text{ср}}$ – средние по всей рассматриваемой группе агропроизводств значения соответственно обобщенной и j-й частной оценок производственной среды; $\sigma_{\text{о}}$, σ_{kj} – среднеквадратические отклонения этих оценок; m – общее число параметров; P_i – относительный вес каждой из стандартизированных частных оценок, можно записать в следующем виде:

$$Q_j = \sum_{j=1}^{m} P_j \frac{\sigma Q}{\sigma q_j} q_{ji} - \sum_{j=1}^{m} P_j \frac{\sigma Q}{\sigma q_j} q_{j\text{ср}}, \tag{2}$$

где σQ и σQ_j – среднеквадратическое отклонение соответственно агрегированной оценки и j-го параметра; q_{ji} и $q_{j\text{ср}}$ – значения j-го параметра на i-м объекте агропроизводства соответственно в натуральном масштабе и среднее.

Блок-схема алгоритма агрегирования частных критериев представлена на рисунке 2.

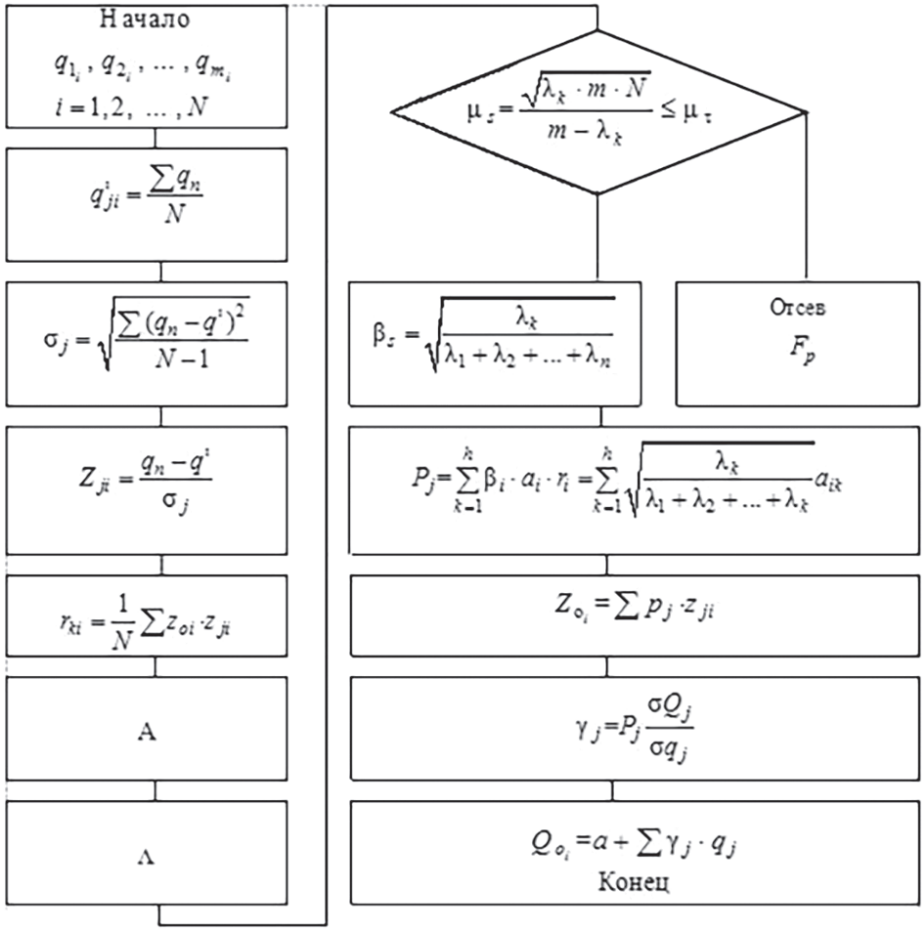


Рисунок 2 – Алгоритм агрегирования параметров производственной среды агропроизводства: q_j^I – среднее значение j-го параметра; A – матрица собственных векторов матрицы коэффициентов корреляции; Λ – матрица собственных значений матрицы коэффициентов корреляции; λ_k – собственное значение соответствующего собственного вектора; μ_s и μ_τ – соответственно расчетное и табличное значения критерия значимости; F_p – расчетный незначимый собственный вектор; h – число значимых собственных векторов (главных компонент); β_s – нагрузка s-го главного вектора (главной компоненты) на агрегированную оценку; a_{js} – j-я координата s-го собственного вектора; Z_{oi} и Q_{oi} – агрегированная оценка параметров производственной среды соответственно в стандартизованном и натуральном масштабах; a – масштабирующая константа

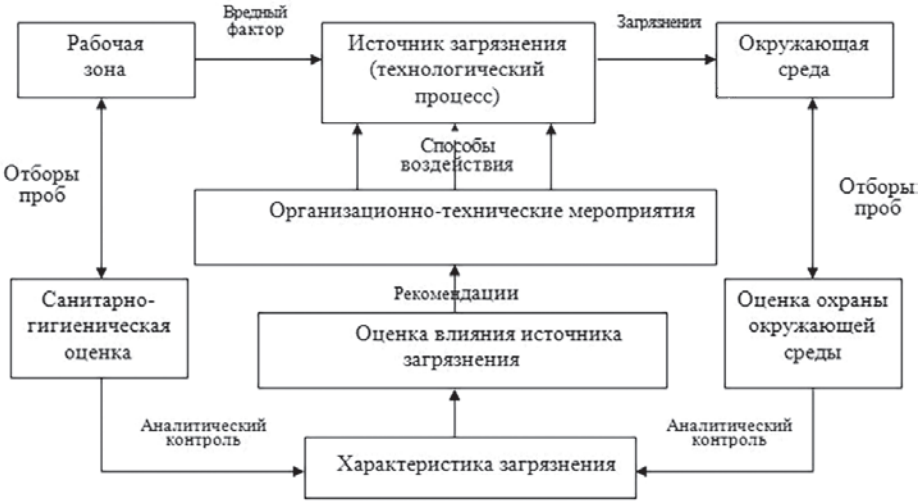


Рисунок 3 – Схема анализа производственного процесса по показателям факторов риска в природно-техногенной среде



Рисунок 4 – Структурная схема выбора варианта защиты от опасных и вредных факторов производственной среды



Рисунок 5 – Взаимосвязь способностей и задатков в деятельности человека

Множественность подходов к оценке рисков и аппроксимации производственных процессов через разнообразные математические модели позволяет в некоторой степени управлять качеством производственной среды на объектах АПК [9–12]. Однако предугадать сценарий и результат безопасного агропроизводства не всегда предоставляется возможным в силу множества неопределенностей человеческой, организационно-технической, экономической и социальной направленностей [13]. Современное агропроизводство необходимо рассматривать как тесную взаимосвязь техники и технологий с биологическими и социально-психологическими факторами жизнедеятельности человека (рисунок 3), а применяемые раздельно понятия – «безопасность труда» и «экологическая безопасность» агропроизводства – могут быть объединены понятием «социальная безопасность агропроизводства», количественно оцениваемым интегральным показателем – уровнем генерируемого производственного риска отдельных технологических процессов и агропредприятий в целом.



Рисунок 6 – Агрегированный показатель производственного риска

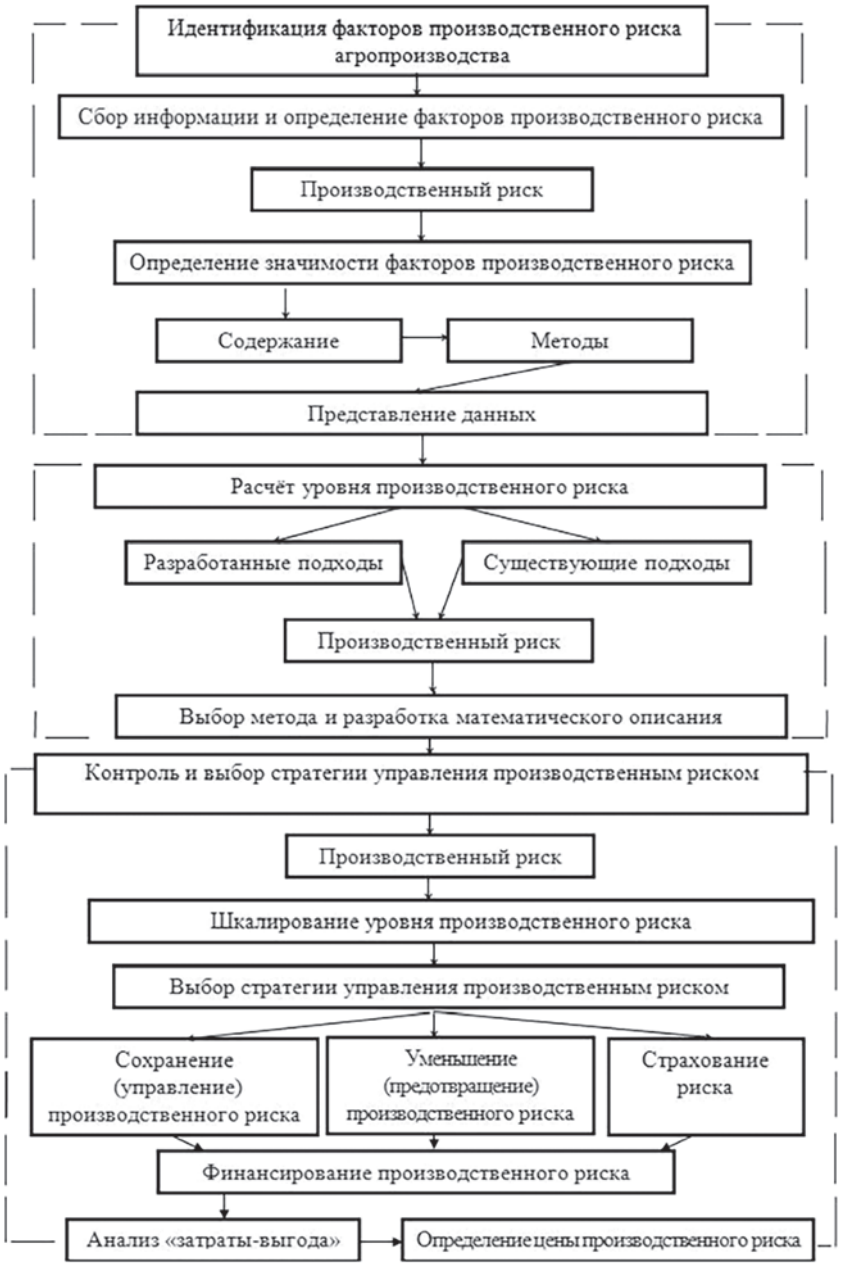


Рисунок 7 – Структурная схема методологии управления производственными рисками агропроизводства

На основе этих принципов решается многостадийная задача по снижению воздействия факторов риска на организм человека в производственной деятельности (рисунок 4).

Место физических качеств человека, его способностей и задатков в производственной деятельности можно предоставить следующим образом (рисунок 5).

Следует также отметить, что производственный риск характеризует потенциальный ущерб (в том числе для здоровья работающих) в результате наступления нежелательного события, связанного с производственной деятельностью предприятия, определяемый с учетом вероятности наступления этого события. Оценка безопасности производственной среды проводится по показателю экономического ущерба от травматизма. Корневым же объектом производственного риска, как объекта управления [14–15], выступает агрегированный показатель сочетания уровня и последствий негативных воздействий технологического процесса на работающих (рисунок 6), а в основу методологии управления (рисунок 7) положен принцип объектно-ориентированного программирования.

Прогнозирование динамики изменения производственной среды агропроизводства предполагает, что степень ее сложности для каждого агропредприятия в *i*-й год оценивается соответствующей обобщающей оценкой Q_j, а оценка производственной среды может быть как стационарным, так и нестационарным показателем. Следует отметить, что для значительной части агропроизводства производственная среда по своей опасности стационарна либо близка к этому [16].

Таким образом, в общем виде оценка производственной среды представляет собой взвешенную сумму частных критериальных показателей травматизма, значимость которых не является постоянным параметром, а тем или иным образом меняется с течением времени как под влиянием внутренней среды агропредприятия (укрепления производственной дисциплины, роста квалификации работников и др.), так и внешней. Возможна и полная потеря какой-либо значимости показателя, например, если его уровень становится единым для всех агропроизводств, и они неразличимы между собой по этому показателю.

Заключение

В результате проведенных исследований научно обоснована методика и предложен алгоритм агрегирования параметров производственной среды агропроизводства. Рассмотрена динамика ее состояния в оценке безопасности.

Список использованных источников

1. Воробьев, М. М. Принципы агрегирования показателей работы предприятий / М. М. Воробьев // Вопросы совершенствования заработной платы, хозрасчета, себестоимости и определения эффективности новой техники : сб. науч. тр. / ЦНИЭИуголь. – М., 1993. – С. 32–37.

2. Воробьев, М. М. О классификации предприятий по степени риска несчастных случаев / М. М. Воробьев, Э. В. Петросянц // Медицина труда и промышленная экология. – 2001. – № 5. – С. 37–41.

3. Левашов, С. П. Профессиональный риск: методология мониторинга и анализа / С. П. Левашов, В. С. Шкрабак ; под общ. ред. В. С. Шкрабака. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 308 с.

4. Мисун, Ал-й Л. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2025. – 388 с.

5. Системы менеджмента. Здоровье и безопасный путь при профессиональной деятельности. Требования и руководство по применению : СТБ ISO 45001 – 2020. – Взамен СТБ 18001-2009 ; введ. 01.05.2020. – Мн. : Госстандарт, 2020. – 32 с.

6. Пиуновский, И. И. Травматизм работников сельхозпредприятий при производстве продукции растениеводства / И. И. Пиуновский, А. В. Молош // Охрана труда. Сельское хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 91–97.

7. Гаранин, М. А. Корреляционное исследование влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма / М. А. Гаранин, А. М. Завьялов, Ю. В. Дементьева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – № 3. – С. 109–120.

8. Воробьев, М. М. Алгоритмизация оценки производственной среды и расчеты страховых взносов предприятий / М. М. Воробьев, С. В. Малютин, Э. В. Петросянц. – М. : ИИЦ «Альфа-композит», 2001. – 94 с.

9. Файнбург, Г. З. Рискориентированный подход к управлению безопасностью и рисками / Г. З. Файнбург // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2016. – № 5. – С. 240–251.

10. Система управления охраной труда. Требования : СТБ 18001-2009. – Мн. : Госстандарт, 2009. – 18 с.

11. Tanaka, K. Production risk management system with demand probability distribution / K. Tanaka, H Akimoto, M. Inoue // Advanced Engineering Informatics. – 2012. – № 26. – С. 46–54.

12. Склеменов, Г. Ж. О процессе управления рисками / Г. Ж. Склеменов, С. А. Солод, В. В. Новиков // Охрана и экономика труда. – 2015. – № 1. – С. 45–48.

13. Соложенцев, Е. Д. Технологии управления риском в структурно- сложных системах / Е. Д. Соложенцев. – СПб. : ГУАП, 2013. – 414 с.

14. Левашов, С. П. Автоматизированная система оценки рисков профессионального травматизма работников сельскохозяйственного производства / С. П. Левашов // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 6. – С. 58–61.

15. Профессиональный риск: методология оценки и управления / С. П. Левашов, Р. В. Шкрабак, Н. К. Смирнова и др. ; под общ. ред. В. С. Шкрабака. – СПб. : Проспект Науки, 2020. – 288 с.

16. Левашов, С. П. Анализ и разработка критериев оценки рисков производственного травматизма на основе кодекса наилучшей практики / С. П. Левашов // Анализ риска для здоровья. – 2017. – № 2. – С. 37–46.

УДК 331.465

Поступила в редакцию 05.01.2026
Received 05.01.2026

В. Г. Андруш[1], Е. В. Шелегова[1], В. И. Володкевич[2], В. А. Быстрова[3]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: v.g.andrush.uot@bsatu.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: info@belagromech.by
[3]УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: veronikabystrova94@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСК-ФАКТОРОВ ТРАВМИРОВАНИЯ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Аннотация. В статье рассматриваются возможности применения методов математического моделирования для определения риск-факторов производственного травматизма в животноводческой отрасли сельского хозяйства с целью воздействия на них и снижения общего количества несчастных случаев со смертельным исходом.

Ключевые слова: животноводческая отрасль, несчастный случай со смертельным исходом, факторы риска, виды происшествий, вероятность травмирования, корреляционно-регрессионный анализ.

V. G. Andrush[1], E. V. Shelegova[1], V. I. Volodkevich[2], V. A. Bystrova[3]

[1]UI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: v.g.andrush.uot@bsatu.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: info@belagromech.by
[3]UI "Belarusian StateUniversity of Informaticsand Radioelectronics"
E-mail: veronikabystrova94@gmail.com

SUBSTANTIATION OF THE MODEL OF INVESTIGATION OF ACCIDENTS IN ANIMAL HUSBANDRY CAUSED BY NATURAL FACTORS

Abstract. This article explores the potential application of mathematical modeling methods to identify risk factors for occupational injuries in the livestock industry of the agricultural sector. The goal is to influence these factors to reduce the overall number of workplace accidents, including fatal incidents.

Keywords: livestock industry, fatal workplace accident, risk factors, types of incidents, injury probability, correlation-regression analysis.

Введение

Условия содержания животных включают контакт с техникой, оборудованием и обслуживающим персоналом, с другими животными, а также воздействие неблагоприятных факторов окружающей среды. Уменьшить травматизм животных и обслуживающего персонала позволяют превентивные мероприятия, направленные на предупреждение аварийных ситуаций – технические, организационные и обучающие меры для работников. Технические меры предполагают модернизацию оборудования, автоматизацию процессов и внедрение эффективных средств индивидуальной защиты. Организационные меры включают разработку новых технологий содержания животных с учетом их физиологических потребностей, стандартов безопасности, контроль

за соблюдением норм охраны труда и создание систем мониторинга рисков. Обучающие мероприятия способствуют повышению квалификации работников, формированию культуры здоровьесбережения работников и животных, осознанию потенциальных угроз.

Понятия производственного травматизма и производственных рисков тесно связаны между собой: травматизм – это следствие реализации рисков на практике. В соответствии с Законом Республики Беларусь «Об охране труда» работодатель обязан обеспечить идентификацию опасностей и оценку профессиональных рисков, определить меры по управлению рисками и провести анализ их результативности по любой из подходящих для данного конкретного предприятия методик.

Из-за неопределенности в нормативных документах методов оценки риска широкое распространение получили экспертные методы благодаря своей малозатратности и простоте в использовании [1]. Данные методы предполагают сбор и изучение оценок, сделанных квалифицированными специалистами на основе своих знаний, опыта и интуиции.

В ходе разработки и сертификации систем управления охраной труда [2] в 90 % случаев организации используют матричный метод оценки риска в системе координат «вероятность события – последствия события». Данный метод является простым в применении, но не полностью объективным.

Одним из распространенных является метод использования в анализе рисков различных диаграмм, которые позволяют визуализировать набор данных. Например, диаграмма Исикавы, преимущества которой – наглядность представления результатов, простота проектирования и понимания. А недостатки – субъективная интерпретация анализа и отсутствие логических правил проверки [3].

Альтернативным методом оценки профессионального риска является финская система Элмери, в которой уровень безопасности условий труда оценивается по индексу безопасности (индексу Элмери), для определения которого эксперты на основании инструкции заполняют анкету по принципу «хорошо» или «плохо». Недостаток – равнозначность всех факторов [4]. Российским институтом безопасности труда система Элмери была усовершенствована и преобразована в индекс ОВР. Недостаток системы ОВР такой же, как и у системы Элмери: расчет индекса не связан с оценкой рисков на конкретном рабочем месте [5].

Авторы в исследованиях [6–8] применяют метод причинно-следственных связей – модель «швейцарского сыра» (SCM); модель выявления, предвидения и предотвращения опасностей (SHIPP). В работах выявляются причины аварий, акцентируется внимание на определенных факторах несчастных случаев, которые следует учесть в будущем, определяется примерный ущерб.

Т. К. Испанбетов при анализе случаев производственного травматизма использует расчетные коэффициенты частоты травматизма и тяжести травматизма; коэффициент общего травматизма; коэффициент, определяющий процент несчастных случаев с выходом на инвалидность и со смертельным исходом [9]. На основе полученных показателей автор делает выводы о динамике травматизма и его параметров.

При анализе рисков распространено применение математического инструментария, позволяющего определить числовые характеристики рисковых событий. Среди наиболее часто встречающихся инструментов математического моделирования при исследовании промышленного риска можно назвать методы корреляционно-регрессионного анализа, эконометрики и имитационного моделирования [10–13]. Например, в работе [11] риск травматизма рассматривается с помощью аддитивной модели, включающей риск аварийности, риск из-за выполнения работ повышенной опасности; риск из-за неблагоприятных условий труда; риск из-за отсутствия или несоответствия средств индивидуальной защиты. Также существуют модели оценки профессиональной пригодности сотрудников как риск-фактора травматизма.

В работе [12] использованы статистические данные травматизма в растениеводческой отрасли АПК для обоснования количественных показателей уровней производственного риска. В исследовании [13] на основе дисперсионного анализа статистических данных разработана математическая модель, устанавливающая показатели безопасности труда в зависимости от оперативности выполнения оператором управленческих воздействий при устранении отказов кормоуборочного комбайна.

Таким образом, современные методы оценки рисков включают сбор и обработку статистических данных о несчастных случаях, моделирование потенциально опасных ситуаций и применение математических методов прогнозирования. При этом важно учитывать, что производственный травматизм в животноводстве затрагивает не только здоровье и безопасность работников, но и напрямую влияет на состояние и сохранность сельскохозяйственных животных.

В качестве яркого примера можно привести случай, произошедший в мае 2025 г. в Гомельской области, где в результате грозы и удара молнии было зафиксировано не только травмирование животновода, но и гибель 71 коровы, которые находились на свободном выпасе. Этот инцидент демонстрирует необходимость учета комплексных производственных рисков, охватывающих как человеческий, так и животный факторы [14].

Таким образом, моделирование рисков и прогнозирование травматизма в животноводстве должно охватывать широкий спектр угроз – от условий труда до факторов, влияющих на безопасность животных, что особенно актуально для обеспечения устойчивости и эффективности всей отрасли.

Основная часть

В вопросе производственного травматизма в аграрном секторе Республики Беларусь с 2010 г. наметилась положительная динамика в связи с модернизацией и сокращением численности работников, но в некоторых отраслях уровень несчастных случаев на производстве остается достаточно высоким.

Данные по травматизму в животноводческой отрасли показали увеличение количества несчастных случаев с 2010 по 2022 гг. (рисунок 1), вызванных различными факторами, такими как рост поголовья скота, изменение уровня квалификации, технологии производства и т. п. Выявление риск-факторов и их анализ позволят сформировать модель зависимости травматизма работников животноводческой отрасли от различных негативных явлений, характерных для данной отрасли.

Основными факторами смертельного травматизма в животноводстве являются (таблица 1): X_1 – воздействие движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов; X_2 – дорожно-транспортные происшествия, наезд транспортным средством; X_3 – падение потерпевшего с высоты, во время передвижения, в ямы, колодцы, траншеи и т. д.; X_4 – падение, обрушение предметов, материала, земли и т. д.; X_5 – воздействие экстремальных температур, пожар, взрыв; X_6 – асфиксия; X_7 – повреждения в результате контакта с животным; X_8 – прочие (отравление газом, разбойное

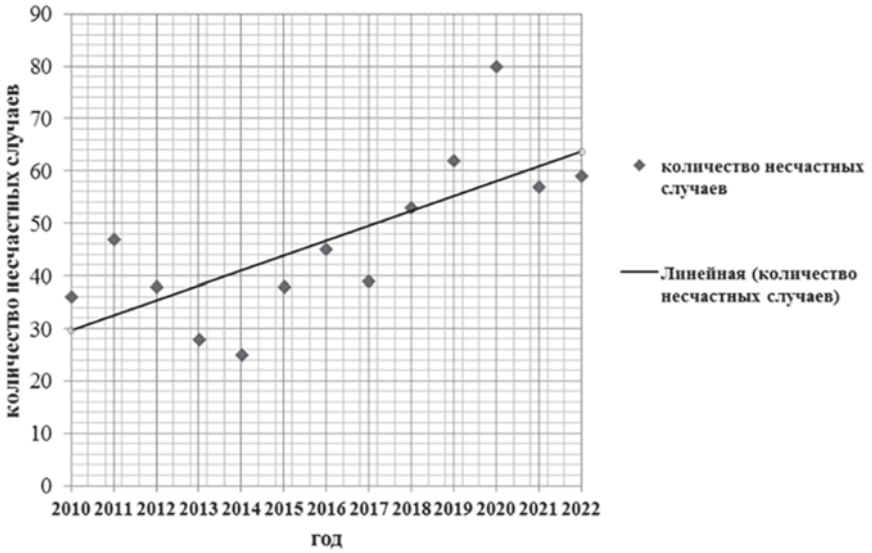


Рисунок 1 – Количество несчастных случаев в животноводстве в 2010–2022 гг.

нападение); X_9 – поражение электрическим током; X_{10} – поражение молнией. Y – всего несчастных случаев (показатель Y может включать кроме вышеперечисленных факторов несчастные случаи со смертельным исходом по иным причинам, которые в данной работе не рассматриваются).

Вероятность реализации факторов смертельного травматизма (1, 2) с целью выявления наиболее и наименее вероятных причин несчастных случаев со смертельным исходом в животноводстве представлена в таблице 2.

Таблица 1 – **Количество несчастных случаев со смертельным исходом в зависимости от вида происшествия (статистическая информация)**

Год	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	Y
2010	3,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	8
2011	1,00	3,00	5,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	11
2012	4,00	2,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	13
2013	0,00	0,00	2,00	1,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	7
2014	2,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	6
2015	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5
2016	2,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	6
2017	2,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	6
2018	3,00	1,00	2,00	1,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	10
2019	2,00	1,00	2,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	10
2020	5,00	2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	4,00	1,00	0,00	0,00	13
2021	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	3,00	0,00	2,00	0,00	9
2022	1,00	3,00	5,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	12
2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	12

Таблица 2 – **Таблица вероятностей реализации случаев травматизма по видам происшествий**

Год	X_1, %	X_2, %	X_3, %	X_4, %	X_5, %	X_6, %	X_7, %	X_8, %	X_9, %	X_{10}, %
2010	37,5	25,0	0,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5
2011	9,1	27,3	45,5	0,0	9,1	0,0	9,1	0,0	0,0	9,1
2012	30,8	15,4	30,8	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	7,7
2013	0,0	0,0	28,6	14,3	0,0	0,0	28,6	0,0	28,6	0,0
2014	33,3	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7
2015	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2016	33,3	16,7	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7
2017	33,3	16,7	33,3	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0
2018	30,0	10,0	20,0	10,0	0,0	10,0	20,0	0,0	0,0	0,0
2019	20,0	10,0	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0
2020	38,5	15,4	0,0	7,7	0,0	0,0	30,8	7,7	0,0	0,0
2021	11,1	11,1	11,1	11,1	0,0	0,0	33,3	0,0	22,2	0,0
2022	8,3	25,0	41,7	0,0	0,0	0,0	8,3	16,7	0,0	0,0
2023	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3	0,0	0,0	8,3
Среднее, %	20,4	13,7	17,7	8,0	1,8	0,7	11,1	2,3	3,6	6,5

$$\rho\left(X_{ij}\right)=\frac{X_{ij}}{Y_i}100\ \%, \tag{1}$$

$$\overline{\rho\left(X\right)}_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}X_{ij}}{n}, \tag{2}$$

где n – количество наблюдений (лет).

Проведем проверку зависимости *Y* от факторов *Xi* (таблица 3), рассчитав для этого коэффициент парной корреляции (3) [15]

$$r_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left(X_{ij} - \overline{X_i}\right)\left(Y_j - \overline{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(X_{ij} - \overline{X_i}\right)^2 \sum\left(Y_j - \overline{Y}\right)^2}}. \quad (3)$$

Таблица 3 – **Значения парной корреляции r_{YXi}**

Переменная	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
r_{yxi}	0,38	0,50	0,43	–0,23	–0,10	0,09	0,36	0,60	–0,17	0,12

Факторы X_4, X_5, X_9 в модели использоваться не будут, так как значение коэффициента парной корреляции для них отрицательное (обратная зависимость), значение фактора X_6 близко к нулю и травматизм является маловероятной ситуацией (таблица 2).

Проведем проверку переменных X_1,…, X_{10} на мультиколлинеарность (таблица 4).

Таблица 4 – **Значения парной корреляции $r_{Xi\text{-}Xj}$**

Пары	X_1	X_2	X_3	X_7	X_8	X_{10}
X_1	1	–	–	–	–	–
X_2	0,34	1	–	–	–	–
X_3	–0,04	0,60	1	–	–	–
X_7	0,21	0,04	–0,09	1	–	–
X_8	0,30	0,61	0,50	0,17	1	–
X_{10}	0,09	–0,03	0,02	–0,62	–0,2504	1

Высокая коррелированность наблюдается между парами X_2 и X_3, X_2 и X_8, X_3 и X_8 (прямая зависимость) X_7 и X_{10} (обратная зависимость).

Таким образом, для построения модели травматизма в животноводческой отрасли будут использоваться следующие случаи смертельного травматизма: X_2, X_3, X_7, X_8, X_{10}.

ВЫВОД ИТОГОВ

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,873105777
R-квадрат	0,792313699
Нормированный R-к	0,61375976
Стандартная ошибка	1,755401128
Наблюдения	14

Дисперсионный анализ

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Значимость F*
Регрессия	5	79,06282074	15,81256415	5,131561687	0,021007156
Остаток	8	24,65146497	3,081433122		
Итого	13	103,7142857			

	Коэффициенты	*тандартная ошиб*	*-статистика*	*P-Значение*	*Нижние 95%*	*ерхние 95%*	*жние 95,0%*	*Верхние 95,0%*
Y-пересечение	4,306938837	1,259534145	3,419469693	0,009095061	1,40244789	7,21143	1,402448	7,211429785
Переменная X 2	0,199212911	0,694714647	0,286755018	0,781586451	-1,402801937	1,801228	-1,4028	1,801227759
Переменная X 3	0,283778119	0,349084578	0,812920812	0,439783593	-0,521212362	1,088769	-0,52121	1,0887686
Переменная X 7	1,583052835	0,493306217	3,20906727	0,012441714	0,445486659	2,720619	0,445487	2,720619012
Переменная X 8	2,384333692	1,083281259	2,201029209	0,058899301	-0,11371737	4,882385	-0,11372	4,882384754
Переменная X 10	3,002902717	0,983562227	3,053088696	0,015746986	0,734804154	5,271001	0,734804	5,271001279

Рисунок 2 – Регрессионный анализ в приложении MS Excel

Для построения регрессионной модели используется приложение MS Excel (рисунок 2).

В полученной модели значимость F = 0,021007156, так как значение меньше 0,05 – модель значима.

Степень точности описания моделью процесса – R-квадрат = 0,792313699, так как значение стремится к диапазону от 0,8 до 0,95, можно говорить об удовлетворительной аппроксимации и модель в целом адекватно описывает зависимость травматизма в животноводческой отрасли от представленных факторов смертельного травматизма.

Коэффициенты:

$a_1 = X_2$= 0,2; Р-значение = 0,78; так как $p > 0,05$ влияние недостоверно;

$a_2 = X_3$ = 0,28; Р-значение = 0,44; так как $p > 0,05$ влияние недостоверно;

$a_3 = X_7$ = 1,58; Р-значение = 0,01; так как $p < 0,05$ влияние достоверно;

$a_4 = X_8$ = 2,38; Р-значение = 0,06; так как $p > 0,05$ влияние недостоверно;

$a_6 = X_{10}$ = 3,80; Р-значение = 0,02; так как $p < 0,05$ влияние достоверно.

Таким образом, выражение зависимости уровня травматизма в животноводческой отрасли от причин травматизма будет выглядеть следующим образом (4):

$$Y = 4,3 + 1,58X_7 + 3,0X_{10}. \quad (4)$$

Для выполнения анализа чувствительности дважды рассчитано значение выходного параметра: при номинальном значении входного параметра и при увеличенном (уменьшенном) значении на 5 или 10 % [16].

В исследуемом диапазоне возможно значение $X_7 = 5$. Подставив это значение в уравнение (4), получим значение $Y(X_7) = 15,2$. Затем произведем расчет выходной переменной для увеличенного на 5 % значения входной переменной $X_7(1,05X_7) = 5,25$; $Y(1,05X_7) = 15,6$, выходная переменная при этом изменится на 2,6 %.

Аналогичным образом рассчитаем значение выходной переменной при $X_{10} = 5$; $Y(X_{10}) = 20,8$. Для увеличенного на 5 % значения входной переменной $X_{10}(1,05X_{10}) = 5,25$; $Y(1,05X_{10}) = 21,6$. Выходная переменная при этом изменится на 3,8 %.

Следовательно, модель наиболее чувствительна к изменениям параметра X_{10} (поражение молнией), что говорит о возможности воздействия на данный фактор организационными (дополнительное обучение, проверка знаний, повышенные требования к средствам защиты работников, потенциально подверженных данному фактору риска) и инженерно-техническими решениями с целью максимально эффективного снижения показателя травматизма.

Выводы

В работе проведен статистический анализ травматизма животноводческой отрасли сельского хозяйства, показана необходимость проведения мероприятий по его снижению. Выявлены наиболее вероятные риск-факторы для данной отрасли. Разработана математическая модель, описывающая взаимосвязь между риск-факторами и числом несчастных случаев со смертельным исходом. Проведен анализ чувствительности модели и выявлены факторы (поражение молнией и повреждения в результате контакта с животным), оказывающие влияние на общее количество случаев производственного травматизма со смертельным исходом в животноводческой отрасли.

Для воздействия на фактор поражения молнией можно предложить следующие превентивные мероприятия:

– введение системы мониторинга погодных условий для своевременного получения штормовых предупреждений и системы оповещения;

– разработка инструкций по охране труда, в которых должны учитываться все вредные производственные факторы, в том числе и работа в сложных метеорологических условиях (ливни, грозы, шквалистый ветер);

– контроль наличия, состояния и использования средств индивидуальной защиты;

– обучение работников действиям во время ухудшения погодных условий, поиску безопасных укрытий во время грозовых проявлений, приемам оказания первой помощи при поражении молнией;

– проектирование и создание технических решений молниезащиты, позволяющих обезопасить работника, животных и сооружения от воздействия на них грозовых проявлений, вызванных прямым ударом молнии и ее вторичными проявлениями.

В целом анализ данных о несчастных случаях, моделирование и прогнозирование потенциально опасных ситуаций с использованием математических методов позволяют выявить закономерности и разработать эффективные стратегии минимизации рисков. Применение математической модели, учитывающей влияние различных факторов на уровень травматизма, способствует принятию обоснованных решений и повышению безопасности труда в сельском хозяйстве.

Особое внимание следует уделить специфике животноводства, где производственный травматизм охватывает не только работников, но и животных, являющихся основным ресурсом отрасли. Потери поголовья в результате аварийных ситуаций, таких как поражение молнией, не только несут экономический ущерб, но и могут иметь долгосрочные последствия для устойчивости хозяйства. Учет таких рисков в рамках комплексного подхода к здоровьесбережению позволяет обеспечить более полную защиту и работников, и животных, а также повысить общую эффективность животноводческих организаций.

Список использованных источников

1. Старовойтов, И. Г. Методы оценки риска в системе управления охраной труда / И. Г. Старовойтов, В. А. Бирюк, Ю. А. Булавка // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 5–15.
2. Системы управления охраной труда. Порядок проведения работ по оценке рисков в области охраны труда: метод. рекомендации. – Введ. 19.06.06. – Мн. : БелГИСС, 2007. – 13 с.
3. Аралов, Е. С. Влияние вредных факторов на организм человека в нефтяной и газовой промышленности / Е. С. Аралов, А. А. Лобачева, А. И. Ломанцова // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2019. – № 4 (17). – С. 34–38.
4. Пособие по наблюдению за условиями труда на рабочем месте в промышленности. Система Элмери / Х. Лайтинен, П-Л. Раса, Т. Ланкинен [и др.]. – Хельсинки : Институт профессионального здравоохранения Финляндии, 2000. – 24 с.
5. Ефремова, О. С. Профессиональный риск. Оценка и определение : практ. пособие / О. С. Ефремова. – М. : Альфа-Пресс, 2010. – 336 с.
6. The development history of accident causation models in the past 100years: 24Model, a more modern accident causation model / Fu G., Xie X., Jia Q. [et all.] // Process Safety and Environmental Protection. – 2020.
7. Выбор наиболее перспективного решения летнего содержания скота в условиях современных молочнотоварных комплексов / В. Г. Андруш, Т. В. Молош, С. А. Корчик [и др.] // Животноводство и ветеринарная медицина. – 2024. – № 1 (161). – Горки, БГСХА. – С. 3–8.
8. Обоснование модели расследования несчастных случаев в животноводстве, вызванных действием факторов природного характера / В. Г. Андруш, И. В. Мицкевич, Е. В. Шелегова [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. – РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2024.– Вып. 57. – С. 181–187.
9. Испанбетов, Т. К. Вопросы методологии оценки производственных рисков на предприятиях нефтегазовой отрасли / Т. К. Испанбетов // Актуальные проблемы экономики и управления на предприятиях машиностроения, нефтяной и газовой промышленности в условиях инновационно-ориентированной экономики. – 2014. – Т. 1. – С. 60–65.
10. Левша, М. В. Моделирование и оценка рисков промышленной безопасности предприятий нефтегазовой сферы / М. В. Левша // Colloquium-journal. – 2020.– № 8–1 (60). – С. 43–45.
11. Мельникова, Д. А. Методика выбора наиболее эффективных мероприятий по устранению профессиональных рисков на рабочих местах опасных производственных объектов / Д. А. Мельникова, М. А. Кривова, Н. Г. Яговкин // Проблема сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 1 (95). – С. 119–128.
12. Мисун, Ал-й Л. Обеспечение безопасной эксплуатации технических средств в условиях изменяющейся природно-техногенной среды растениеводства путем управления производственным риском : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.26.01 / Мисун Алексей Леонидович; Полоцк. гос. ун-т имени Е. Полоцкой, 2023. – 24 с. – URL: https://vak.gov.by/sites/default/files/2023-.pdf. (дата обращения: 09.02.2025).
13. Мисун, Ал-р Л. Повышение безопасности труда операторов кормоуборочных комбайнов снижением риска травмирования при устранении технологических отказов : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.26.01 / Мисун Александр Леонидович ; Полоцкий гос. ун-т имени Е. Полоцкой, 2022. – URL: https://www.vak.gov.by/sites/default/files/2022.pdf (дата обращения: 09.02.2025).
14. Трагедия в Гомельской области: молния убила 71 корову и ранила пастуха : инф. портал. – Гродно, 2026. – URL: https://newgrodno.by/incidents/tragediya-v-gomelskoj-oblasti-molniya-ubila-71-korovu-i-ranila-pastuha/ (дата доступа: 06.05.2025).
15. Карпович, В. Ф. Экономические нормативы обеспечения эффективного ведения сельского хозяйства на инновационной основе / В. Ф. Карпович, Е. П. Макуценя, К. М. Жевнерович // Научные принципы регулирования развития АПК: предложения и механизмы реализации. – Мн., 2022. – С. 71–75.
16. Ленькова, Р. К. Моделирование в социальных и экономических системах : пособие / Р. К. Ленькова, Е. В. Карачевская. – Горки : БГСХА, 2022. – 86 с.

УДК 621.432, 631.372

Поступила в редакцию 12.08.2025
Received 12.08.2025

В. Е. Тарасенко[1], А. А. Жешко[2]

[1]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: trs9@yandex.by
[2]РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: azeshko@gmail.com

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ С БОКОВЫМ ПОДВОДОМ ТОПЛИВА

Аннотация. В статье представлены результаты обработки массива данных вибродиагностики топливной форсунки с боковым подводом топлива (АЗПИ) серии 171.1112010-01 при испытании на стенде с дробящим распылением топлива. Выполнено графическое построение преобразованного сигнала виброускорения топливной форсунки с дробящим распылением в пространстве комплексных чисел. Получена графическая интерпретация преобразования Фурье в комплексной плоскости для сигнала виброускорения форсунки на стенде с дробящим распылением с указанием вычисленных фаз колебаний для каждой гармоники спектра.

Ключевые слова: форсунка, система, стенд, сигнал, спектр, анализ, преобразование.

V. E. Tarasenka[1], A. A. Zheshka[2]

[1]EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: trs9@yandex.by
[2]RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: azeshko@gmail.com

PROCESSING OF VIBRATION DIAGNOSTICS DATA OF A FUEL INJECTOR WITH LATERAL FUEL SUPPLY

Abstract. The results of processing an array of vibration diagnostics data for a side-feed fuel injector (AZPI) of the 171.1112010-01 series during testing on a bench with crushing fuel spray are presented. A graphical construction of the transformed vibration acceleration signal of a fuel injector with a crushing spray in the space of complex numbers has been completed. A graphical interpretation of the Fourier transform in the complex plane for the vibration acceleration signal of a nozzle on a crushing spray stand is obtained, indicating the calculated oscillation phases for each harmonic of the spectrum.

Keywords: nozzle, system, stand, signal, spectrum, analysis, transformation.

Введение

Топливная форсунка самым непосредственным образом влияет на процесс сгорания в дизельном двигателе. С течением времени конструкция и принцип работы форсунок неоднократно менялись, у каждого нового поколения появлялись свои особенности [1]. В зависимости от системы впрыска различают форсунки со штифтовыми распылителями, применяемыми в форкамерных двигателях, и с дырчатыми распылителями, применяемыми в двигателях с непосредственным впрыском топлива (DI – direct injection) [2]. В зависимости от способа управления открытием распылителя различают стандартные форсунки с одной пружиной, форсунки двухпружинные, форсунки с датчиком положения иглы распылителя и форсунки, управляемые электромагнитным клапаном или пьезоэлектрическим элементом. Конструкция корпуса форсунки зависит



Рисунок 1 – Внешний вид форсунки с боковым подводом топлива Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ) серии 171.1112010-01 [13]

от способа установки ее в головке блока – с помощью фланца, прижимного хомута, прижимной гайки или непосредственно вворачиванием корпуса в отверстие головки блока [2].

Большое значение имеет регулярное диагностирование топливной аппаратуры двигателей: необходимы операции своевременного диагностирования форсунок, которые помогут устранить неисправности [2, 3, 4].

Основная часть

В статье рассмотрены результаты математической обработки массива данных, полученных в результате нагружения топливной форсунки с боковым подводом топлива серии 171.1112010-01 (рисунок 1) и виброконтроля многоканальной системой с гибкой структурой [5–9].

Поскольку количество выборок должно быть кратным степени 2, извлекали из массива исходных данных $2^7 = 128$ выборки (таблица), которые соответствуют частотам виброускорения форсунки на стенде с дробящим распылением топлива при различных частотах.

Проведен анализ Фурье для выделенных из общего массива данных, который получил широкое распространение для анализа сигналов в вибродиагностике [10], а также используется для определения коэффициентов гармоник и построения фильтров [11, 12]. Поскольку в рассматриваемом случае имеются дискретные наблюдения $y_1, y_2, \ldots y_n$, то прямое дискретное преобразование Фурье выполняется в соответствии с формулой

$$Y_k = \sum_{k=0}^{n} y_j e^{-\frac{2\pi}{n} jk}, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, \ldots n - 1$, элемент выборки из $n = 128$ элементов.

Фрагмент данных анализа Фурье спектра вибрации дизельной форсунки с боковым подводом топлива

№ гармоник	Частота, *f*, ГЦ	Виброускорение, дБ	Преобразование Фурье (комплексное число)	Амплитуда	Фаза, град	Обратное преобразование Фурье (входной сигнал, дБ)
1	19	62,80	41,9 287 366 172 572	0,328	0,000	62,801
2	21	64,08	2,96 331 100 698 442 + 2,07 485 424 911 296*i*	0,028	34,999	64,080
3	25	59,89	0,605 393 178 980 156 + 2,21 068 130 763 273*i*	0,018	74,685	59,891
4	27	56,63	0,882 000 744 718 849 + 2,53 776 697 384 525*i*	0,021	70,835	56,634
5	32	58,26	–2,63 966 507 440 204E-02 + 1,37 104 055 269 785*i*	0,011	91,103	58,261
6	40	55,93	0,896 566 360 366 406 + 0,925 740 193 866 188*i*	0,010	45,917	55,932
7	44	63,38	–0,269 310 651 922 184 + 1,47 748 373 653 505*i*	0,012	100,330	63,376
8	45	72,10	–1,15 339 987 306 793 + 1,03 024 823 110 428*i*	0,012	138,228	72,100
9	46	81,29	–0,988 977 327 645 159 + 0,659 225 587 092 387*i*	0,009	146,314	81,289

Окончание таблицы

№ гармоник	Частота, *f*, ГЦ	Виброускорение, дБ	Преобразование Фурье (комплексное число)	Амплитуда	Фаза, град	Обратное преобразование Фурье (входной сигнал, дБ)
10	49	86,76	–1,76 867 312 936 613 + 1,427 765 248 707*i*	0,018	141,088	86,756
11	52	85,48	–0,154 119 272 585 887 – 1,01 129 555 744 288*i*	0,008	–98,665	85,475
12	59	49,06	1,08 006 254 470 532–0,617 002 963 381 391*i*	0,010	–29,738	49,064
13	61	38,36	0,557 471 909 884 652 + 0,149 087 139 124 438*i*	0,005	14,972	38,362
14	63	43,71	1,1 192 873 054 398 + 0,521 303 899 572 282*i*	0,010	24,974	43,712
15	64	46,97	0,770 873 562 054 803 + 0,151 123 745 292 448*i*	0,006	11,092	46,969
16	67	41,27	0,757 015 346 926 661–0,98 879 140 286 057*i*	0,010	–52,562	41,269
17	72	43,83	1,45 247 820 804 822 + 0,145 558 437 791 826*i*	0,011	5,723	43,826
18	75	49,87	0,758 641 462 806 237 + 1,04 938 271 533 701*i*	0,010	54,135	49,874
19	82	46,15	–0,470 519 445 587 183 + 0,561 161 640 970 673*i*	0,006	129,979	46,150
20	89	46,61	–7,10 037 338 309 861E – 02 + 1,19 917 900 013 909*i*	0,009	93,389	46,614
21	91	43,01	–0,570 431 929 689 138 + 0,332 666 728 403 418*i*	0,005	149,750	43,007
22	94	47,54	–0,591 522 950 115 043 – 0,102 288 787 037 779*i*	0,005	–170,189	47,543
23	98	67,78	–0,341 670 878 560 945 + 0,135 309 936 912 657*i*	0,003	158,395	67,782
24	102	70,92	–1,54 425 440 608 017E – 02 + 0,363 340 138 945 879*i*	0,003	92,434	70,922
25	106	53,47	0,653 863 072 253 712 + 0,473 140 919 071 868*i*	0,006	35,890	53,472
26	110	42,42	–0,170 621 105 768 269 + 0,105 968 854 719 268*i*	0,002	148,157	42,420
27	119	36,60	–0,154 872 039 577 901 – 0,208 596 446 986 759*i*	0,002	–126,592	36,602
28	122	40,09	0,950 063 711 988 643 – 0,735 036 329 522 044*i*	0,009	–37,728	40,091
29	128	36,37	0,678 918 862 883 568 + 0,289 449 068 453 201*i*	0,006	23,090	36,367
30	132	38,69	0,614 910 879 617 597 + 0,633 040 447 972 511*i*	0,007	45,832	38,692
31	138	34,39	–9,55 828 705 477 987E – 03 + 0,409 216 155 738 657*i*	0,003	91,338	34,387
32	144	39,39	–0,264 689 137 497 847 – 2,3 765 532 028 772E – 02*i*	0,002	–174,869	39,387
33	150	58,35	–7,4 049 533 732 657E-02 + 0,237 673 045 527 238*i*	0,002	107,305	58,346
34	153	50,44	–0,294 892 444 092 289 + 0,185 662 102 498 048*i*	0,003	147,806	50,435
35	155	38,57	–6,50 133 862 211 028E – 02 – 5,53 343 809 058 713E – 02*i*	0,001	–139,598	38,570
36	158	37,17	4,66 987 847 384 874E – 02 – 0,172 967 005 244 084*i*	0,001	–74,891	37,173
37	162	37,17	0,16 322 558 437 042 + 0,194 270 656 701 046*i*	0,002	49,963	37,172

Результатом преобразования являются комплексные числа, представленные в таблице. Трехмерная графическая интерпретация представлена на рисунке 2. Модуль данных комплексных чисел равен амплитуде *k*-й спектральной составляющей (*k*-й гармоники), а аргумент комплексного числа Y_k равен фазе этой гармоники.

Например, для 4-й гармоники в алгебраической форме записи комплексного числа $z = x + yi$ получим:

$$Y_4 = 0{,}882000744718849 + 2{,}53776697384525i.$$

Для которой амплитуда определится через абсолютную величину комплексного числа $z_k = x + yi$ по формуле

$$|z|_4 = \sqrt{x^2 + y^2},$$

амплитуда для 4-й гармоники определится как

$$r = |z|_4 = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{0{,}8820^2 + 2{,}5377^2} = 0{,}2686. \quad (2)$$

Для нахождения мнимого аргумента использовали следующее соотношение:

$$x + yi = |x + yi| \times e^{\theta} = |x + yi| \times (\cos\theta + \sin\theta),$$

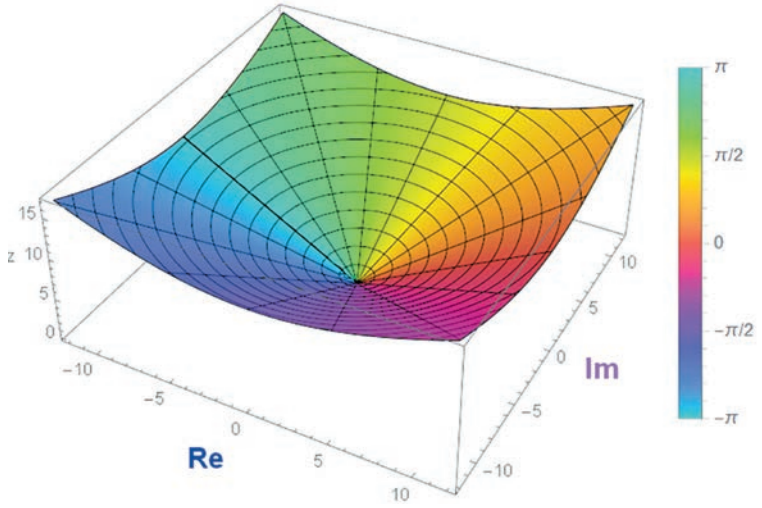


Рисунок 2 – Преобразованный сигнал виброускорения топливной форсунки с боковым подводом топлива (171.1112010-01) в пространстве комплексных чисел

тогда мнимый аргумент

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \tag{3}$$

а для нахождения фазы φ получим

$$\varphi_n = \frac{180}{\pi}\arctan\left(\frac{y}{x}\right), \tag{4}$$

тогда для 4-й гармоники фаза составит

$$\varphi_4 = \frac{180}{\pi}\arctan\left(\frac{2{,}538}{0{,}882}\right) = 70{,}8351 \text{ град.} = 1{,}2363 \text{ град.}$$

Посредством полученных значений модулей и фаз для различных гармоник можно представить комплексные числа в тригонометрической форме:

$$z = r\left(\cos\varphi + i\sin\varphi\right), \tag{5}$$

тогда

$$z = 0{,}2686 \times \left(\cos\left(1{,}2363\right) + i\sin\left(1{,}2363\right)\right).$$

В показательной форме записи комплексных чисел

$$z = re^{i\phi}. \tag{6}$$

Для рассматриваемого примера 4-й гармоники согласно формуле (6) $z = 0{,}2686e^{i\cdot 1{,}2363}$.

Поскольку над данными, представленными в таблице, произведены преобразования Фурье, для получения исходного сигнала воспользуемся обратным преобразованием Фурье, которое преобразует спектральное представление временного ряда в действительное [11, 12]

$$y_j = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} Y_k\left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + i\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)\right], \ \left(n = 0, ..., N-1\right). \tag{7}$$

По формуле (7) вычисляем данные для всего ряда наблюдений, результаты приводим в 4-м столбце таблицы. По формулам (2) и (4) определяем значения амплитуды сигнала и его фазы, приводим их значения в 5-м и 6-м столбцах таблицы. Для проверки правильности полученных

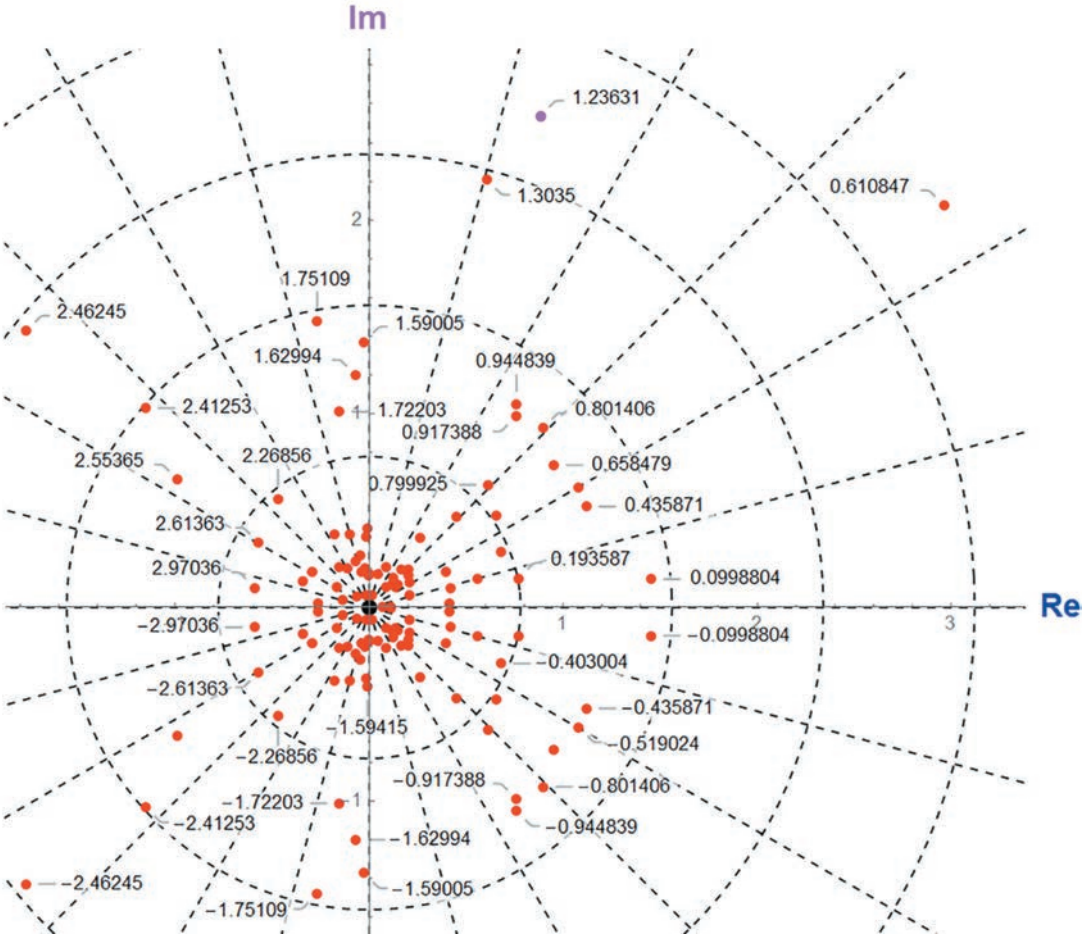


Рисунок 3 – Графическая интерпретация преобразования Фурье в комплексной плоскости для сигнала виброускорения топливной форсунки на стенде с дробящим распылением топлива с указанием вычисленных фаз колебаний для каждой гармоники спектра

результатов выполняем обратное преобразование Фурье, которое должно соответствовать исходному сигналу (седьмой и третий столбцы таблицы).

Таким образом, преобразование Фурье позволяет разложить сигнал, снятый в зависимости от времени проведения испытаний, на частотные составляющие (спектр) [12].

Для обработки виброакустических сигналов по временным параметрам используется метод, основанный на определении среднеквадратического значения виброускорения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \overline{Y}\right)_i^2}{n}}, \tag{8}$$

где $n = 128$;

$$\overline{Y} = \frac{\sum Y}{n} = \frac{62,80 + 64,08 + 59,9 + 56,63 + ... + 35,23 + 34,30}{128} = 41,93.$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \overline{Y}\right)_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\left(62,80 - 41,93\right)^2 + \left(64,08 - 41,93\right)^2 + ... + \left(34,30 - 41,93\right)^2}{128}} = 10,96 \text{ дБ}.$$

Как видно из расчетов, данный метод прост и может эффективно использоваться для выявления дефектов деталей, для которых известно допустимое среднеквадратичное отклонение по виброускорению.

Заключение

На примере топливной форсунки дизельного двигателя рассмотрены такие информативные диагностические параметры, как частота импульсов в спектре вибрации форсунки, время между импульсами, амплитуда импульсов. При этом указанные параметры характеризуют не только техническое состояние непосредственно самой форсунки, но и частично топливного насоса.

Выполнен анализ Фурье для выделенных из общего массива данных, а также определены коэффициенты гармоник и построения фильтров. Выполнено графическое построение преобразованного сигнала виброускорения форсунки с дробящим распылением в пространстве комплексных чисел. Получена графическая интерпретация преобразования Фурье в комплексной плоскости для сигнала виброускорения форсунки на стенде с дробящим распылением с указанием вычисленных фаз колебаний для каждой гармоники спектра.

Список использованных источников

1. Какие бывают топливные дизельные форсунки : сайт компании DieselKraft. – 2024–2025. – URL: https://dieselkraft.by/poleznaya-informatsiya/kakie-byvayut-toplivnye-dizelnye-forsunki.html (дата обращения: 28.08.2025).

2. Обслуживание форсунок дизельных двигателей: рекомендации для дизель-сервисов / под ред. Тадеуша Янишевского. – WUZETEM, Warszawa. – 48 с.

3. Якубович, А. И. Экономия топлива на тракторах : монография / А. И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В. Е. Тарасенко. – Мн. : БНТУ, 2009. – 229 с.

4. Тарасенко, В. Е. Анализ топливных систем дизелей с электронным управлением топливоподачей / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2016. – Вып. 50. – С. 52–57.

5. Ролич, О. Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко // Агропанорама. – 2019. – № 5. – С. 42–45.

6. Диагностирование многоканальной измерительной системой с гибкой структурой форсунок фирмы BOSCH / А. А. Жешко, В. Е. Тарасенко, О. Ч. Ролич [и др.] // Технический сервис машин. – 2021. – Т. 59. – № 1 (142). – С. 55–64.

7. Тарасенко, В. Е. Исследование вибрации форсунок с помощью многоканальной системы с гибкой структурой / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2020. – Вып. 54. – С. 185–191.

8. Ролич, О. Ч. Интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики систем, узлов и механизмов дизельного двигателя на базе беспроводной mesh-сети / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко, И. И. Балаш // Агропанорама. – 2019. – № 6. – С. 38–41.

9. Тарасенко, В. Е. Анализ вибрационных характеристик форсунок CRIN2 автотракторных дизелей / В. Е. Тарасенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса : материалы Республ. науч.-практ. конф. Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2024 / редкол.: В. А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2024. – С. 254–257.

10. Основы цифровой обработки сигналов : учеб. пособие / В. Г. Коберниченко ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 150 с.

11. Математические основы обработки сигналов. Практикум : учеб. пособие / О. С. Вадутов ; изд. 3-е, испр. и доп. – Томск : Томск. политех. ун-т, 2014. – 102 с.

12. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие / А. Б. Сергиенко ; 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

13. Форсунка 171.1112010-01 : оф. сайт Алтайского завода прецизионных изделий. – Барнаул, 2019–2025. – URL: https://azpi.ru/catalog/traditsionnaya-sistema-vpryska-topliva/mekhanicheskie/171-1112010-01/ (дата обращения: 19.09.2025).

УДК 534.322.3:629.366.02

Поступила в редакцию 08.07.2025
Received 08.07.2025

Л. В. Мисун, А. В. Гаркуша, Ал-р Л. Мисун

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ ШУМА В КАБИНЕ ТРАКТОРА В ПОСЛЕГАРАНТИЙНЫЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В статье предложен алгоритм и выполнен расчет уровней шума в кабине трактора (на примере «Беларус-1221») с послегарантийным периодом эксплуатации при возникновении акустического излучения со стороны внешнего источника. Рассмотрены технические решения, способствующие снижению шума до нормативного значения.

Ключевые слова: трактор, послегарантийный период эксплуатации, кабина, уровень шума, технические решения.

L. V. Misun, A. V. Garkusha, Al-r L. Misun

EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru

STUDY OF NOISE LEVELS IN THE TRACTOR CAB IN THE POST-WARRANTY PERIOD OF OPERATION

Abstract. An algorithm is proposed and a calculation of noise levels in the tractor cabin is performed (using the example of "Belarus 1221") with a post-warranty period of operation of the tractor in the event of acoustic radiation from an external source. Technical solutions are considered that help reduce noise to the standard value.

Keywords: tractor, post-warranty service life, cabin, noise level, technical solutions.

Введение

Из известных опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) шум выделяется как постоянно действующий фактор высокой интенсивности, воздействие которого приводит как к ухудшению здоровья работающих, так и к снижению производительности труда [1–7]. Создание мощных и производительных тракторов неизбежно сопровождается увеличением уровней шума в кабинах на рабочих местах трактористов-машинистов. Еще большую актуальность вопрос снижения шума и улучшения условий труда в кабине тракторов имеет в послегарантийный период эксплуатации. Согласно статистическим данным такой техники в Республике Беларусь около 80 % от ее общего количества. Проведенный анализ показал, что работы по снижению шума в кабинах тракторов проводились, как правило, на стадии проектирования с доводкой акустических характеристик в кабинах до нормативных величин и практически не рассматривались в послегарантийный период эксплуатации трактора. В качестве объекта исследований был выбран наиболее типичный представитель парка тракторов Республики Беларусь – «Беларус-1221».

Основная часть

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать алгоритм (рисунок 1) и методику инженерного расчета основной составляющей шума при воздействии внешних источников. Исследования шумовых характеристик в кабине проводились с учетом изменения коэффициента звукоизоляции элементов ограждения кабины в зависимости от срока эксплуатации трактора и выполнялись при возникновении акустического

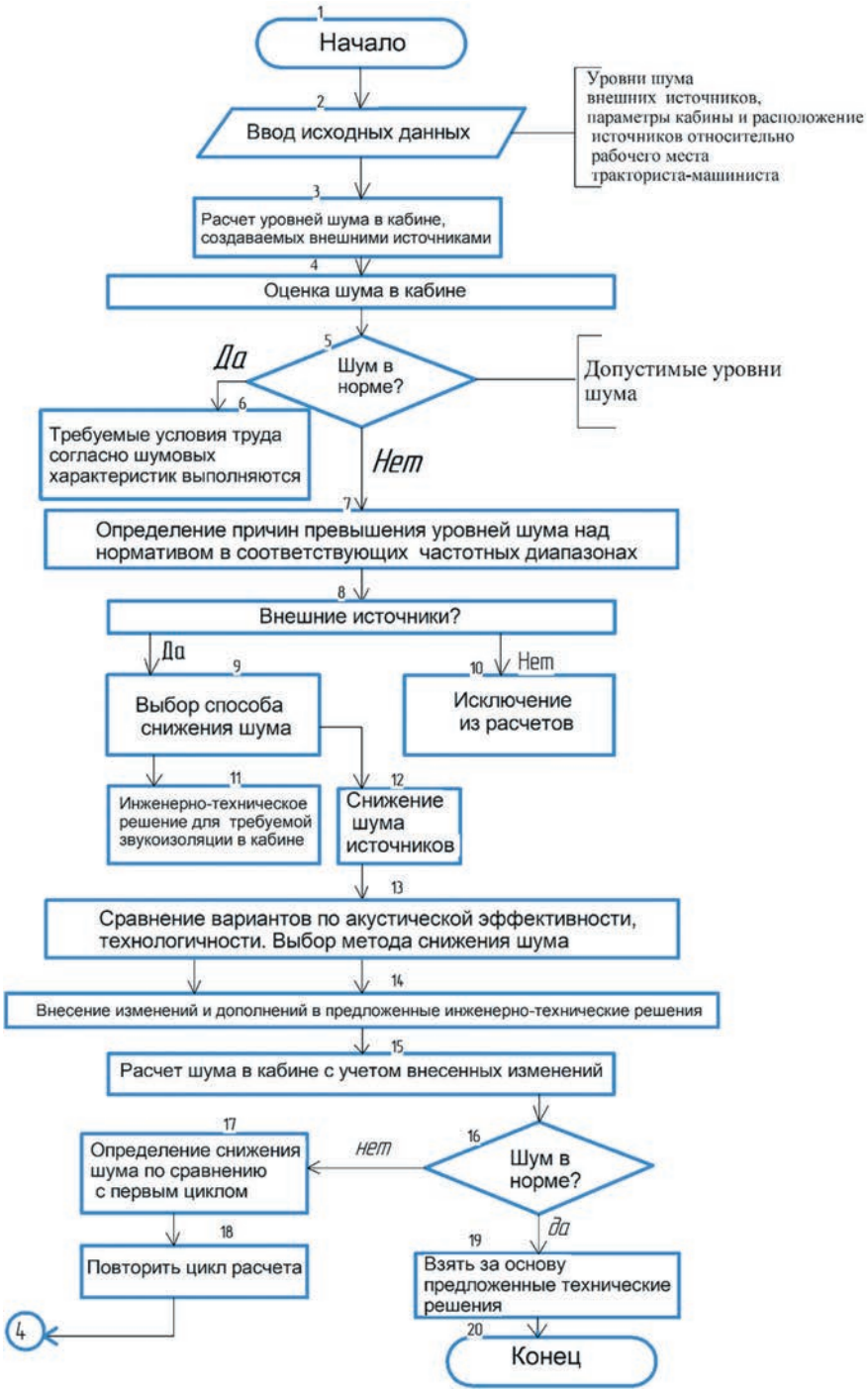


Рисунок 1 – Алгоритм расчета шума в кабине трактора, создаваемого внешними источниками

излучения со стороны внешнего источника, установленного на расстоянии одного метра от рабочего места тракториста-машиниста. Такая компоновка кабины относительно источника шума соответствует расчетной схеме, приведенной на рисунке 2.

Под наблюдением находились 20 тракторов «Беларус-1221» со сроком эксплуатации от 5 до 14 лет. Сбор и отработка информации проводилась согласно требованиям нормативных документов [8–9].

Для определения доли воздушной составляющей шума в кабине трактора в соответствующих частотных полосах при воздействии внешних источников составлялась амплитудно-частотная характеристика воздушного объема кабины методом прозвучивания (рисунок 3). Внутри кабины устанавливался динамик, настраиваемый звуковым генератором и микрофоном.

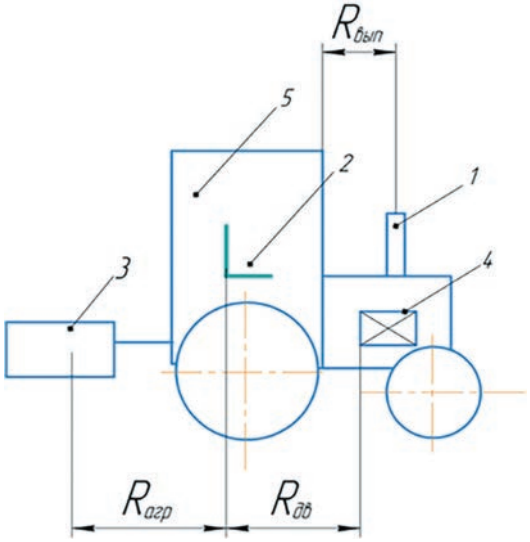


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения воздушной составляющей шума в кабине трактора:
1 – выпуск отработавших газов (ОГ) ДВС; *2* – рабочее место тракториста-машиниста;
3 – сельскохозяйственная техника; *4* – корпус ДВС; *5* – кабина трактора

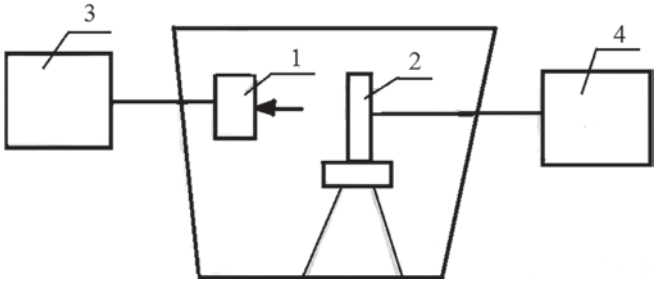


Рисунок 3 – Измерительный тракт для прозвучивания внутреннего воздушного пространства:
1 – источник шума; *2* – микрофон; *3* – звуковой генератор; *4* – шумомер

Для расчетов уровня шума в кабине при воздействии внешних источников (ДВС, выпуска ОГ ДВС) использовались следующие выражения [3]:

$$L_{\text{каб}}^{\text{дв}} = L_{w_{\text{дв}}} + 10\lg\sum_{i=1}^{n} S_{\text{каб}_i} 10^{-0{,}1(\text{ЗИ}_i - tg_i)} - 10\lg A_{\text{каб}} - L_{\text{др}}^{\text{дв}};$$

$$L_{\text{каб}}^{\text{вып}} = L_{w_{\text{вып}}} + 10\lg\sum_{i=1}^{n} S_{\text{каб}_i} 10^{-0{,}1(\text{ЗИ}_i + tg_i)} - 10\lg A_{\text{каб}} - L_{\text{др}}^{\text{вып}},$$

где $L_{\text{каб}}^{\text{дв}}$, $L_{\text{каб}}^{\text{вып}}$ – доли шума соответственно корпуса ДВС и выпуска ОГ ДВС; $L_{w_{\text{дв}}}$, $L_{w_{\text{вып}}}$ – спектры звуковой мощности соответственно корпуса двигателя и выпуска ОГ ДВС (определяются по техническому паспорту); $S_{\text{каб}_i}$ – площадь соответствующего *i*-го элемента ограждения кабины (таблица 1); n – количество элементов ограждения кабины трактора (таблица 1); $L_{\text{др}}^{\text{дв}}$, $L_{\text{др}}^{\text{вып}}$ – величина поправки к значению уровня шума в кабине трактора, соответственно от корпуса ДВС и выпуска ОГ ДВС с учетом воздействия внутренних и структурных источников шума (принимается $L_{\text{др}}^{\text{дв}} = 4$ дБ, $L_{\text{др}}^{\text{вып}} = 18$ дБ).

Расчет звукоизоляции (ЗИ) *i*-го элемента ограждения кабины проводился по формуле

$$\text{ЗИ}_i = 10\lg {m_i}^2 \cdot h_i \cdot h_i \cdot K_{\text{зв}_i} + \Delta_1,$$

где m_i – поверхностная масса *i*-го элемента ограждения кабины, кг; h – толщина стенки *i*-го элемента кабины (таблица 1); $K_{\text{зв}_i}$ – коэффициент уменьшения звукоизоляции *i*-го элемента кабины в зависимости от срока эксплуатации трактора $\text{Т}_\text{э}$ (рисунок 4); Δ_1 – величина поправки,

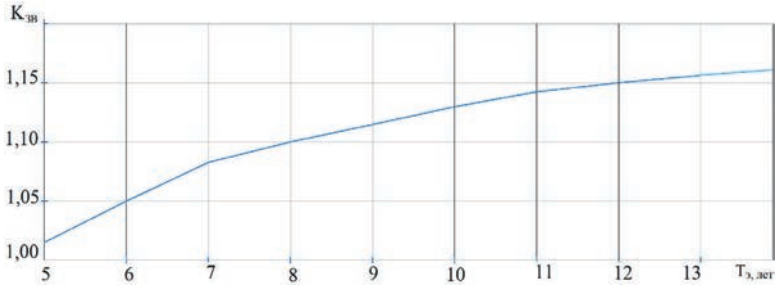


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента $K_{зв}$ от срока эксплуатации трактора

зависящей от среднегеометрической частоты (таблица 2); η – коэффициент потерь *i*-й стенки элемента ограждения кабины в октавных или 1/3 октавных полосах частот

$$\eta = \frac{1}{\pi \cdot n_1} \ln \frac{A_1}{A_n},$$

где n_1 – количество колебаний на измерительном расстоянии; A_1 и A_n – амплитуда соответственно первого и последнего колебаний на измерительном расстоянии.

Таблица 1 – **Геометрические параметры элементов ограждения кабины трактора**

Элементы ограждения кабины	Геометрические параметры				
	Толщина стенки элемента ограждения кабины, мм	Толщина металла, мм	Воздушный промежуток, мм	Площадь металлической части кабины, м^2	Площадь остекленной части кабины, м^2
Передняя стенка	4,5	1,5	–	0,65	1,8
Левая стенка	4,5	1,5	40	0,88	1,12
Правая стенка	4,5	1,5	40	1,2	1,4
Задняя стенка	4,5	1,5	–	1,2	0,4
Потолок	–	1,5	60	2,24	–
Пол	–	1,5	60	2,24	–

Таблица 2 – **Значение поправки Δ_1**

Частота, Гц	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Δ_1, дБ	1	8	17	26	35	44	53	62	71

Примечание: составлено на основе [3].

Поправка звукоизоляции элемента ограждения кабины в зависимости от его расположения относительно источника шума, tg_i, представлена в таблице 3, дБ:

$$A_{каб} = \overline{a}_{каб} S_{каб},$$

$A_{каб}$ – звукопоглощение в кабине, $\overline{a}_{каб}$ – среднее значение коэффициента звукопоглощения в кабине в октавных полосах (таблица 4).

Таблица 3 – **Дифракционные поправки к звукоизоляции элементов ограждения кабины (tg_i)**

Наименование элемента ограждения кабины	Усредненные значения поправок (дБ) в октавных интервалах частот (Гц)								
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Правая боковая стенка (со стороны двигателя)	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Задняя стенка	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Потолок	3	3	3	3	3	3	3	3	5
Передняя стенка	5	5	5	5	5	5	5	5	7
Левая стенка	7	7	7	7	7	7	7	7	8

Примечание: составлено на основе данных [3].

Таблица 4 – **Среднее значение коэффициента звукопоглощения кабины ($\bar{a}_{каб}$)**

Наименование конструкции	Коэффициент в октавных полосах частот, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Кабина со звукопоглощением	0,1	0,1	0,3	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6

Примечание: составлено на основе данных [3].

Результаты расчета показателя ЗИ приведены в таблице 5.

Таблица 5 – **Значения показателя звукоизоляции кабины тракторов «Беларус-1221» (срок эксплуатации трактора – 8 лет)**

Элементы ограждения	Звукоизоляция (дБ) в октавных интервалах частот (Гц)								
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Передняя стенка кабины	6	11	18	20	25	30	34	38	41
Левая стенка	8	14	24	30	36	42	46	48	48
Правая стенка	9	15	23	29	36	42	44	46	47
Задняя стенка	12	17	24	28	35	37	41	42	43
Потолок кабины	12	18	25	35	48	44	54	54	62
Пол кабины	11	18	30	41	49	47	57	58	65

Графическое отображение расчетов уровней шума в кабине исследуемых тракторов при воздействии внешних источников представлено на рисунке 5.

Во время экспериментальных исследований выявлено существенное влияние воздушной составляющей шума корпуса двигателя в низко- и среднечастотном диапазоне на рабочем месте тракториста-машиниста. Как один из вариантов для снижения повышенного уровня шума в кабине трактора, эксплуатируемого восемь и более лет, предлагается двухслойное ее остекление (рисунок 6).

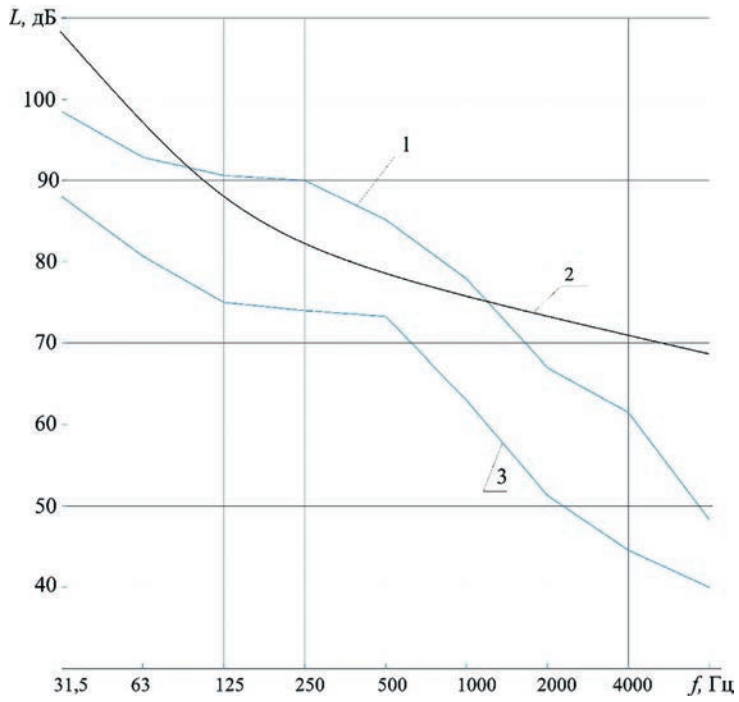


Рисунок 5 – Результаты исследований уровней шума в кабине трактора «Беларус-1221» (срок эксплуатации – восемь лет): *1* – спектр шума в кабине при воздействии шума корпуса двигателя; *2* – спектр шума в кабине при воздействии шума выхлопа ОГ ДВС; *3* – предельно допустимые уровни шума [10–11]

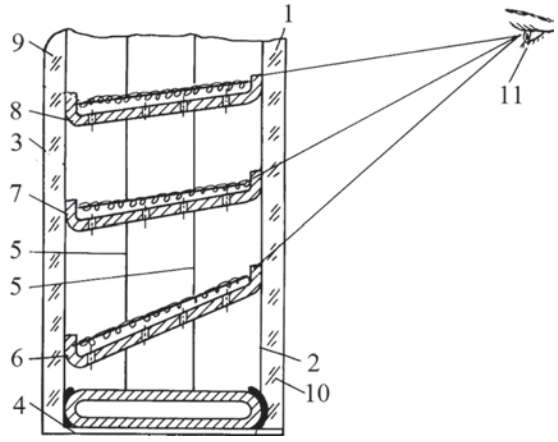


Рисунок 6 – Станина кабины трактора из двухслойного остекления [12]: *1* – станина; *2, 3* – внутреннее и внешнее стекла; *4* – упорная рама; *5* – струна; *6* – жалюзи; *7* – желоб; *8* – отверстие; *9* – слой синтетического волокна; *10* – мастика; *11* – глаз тракториста-машиниста

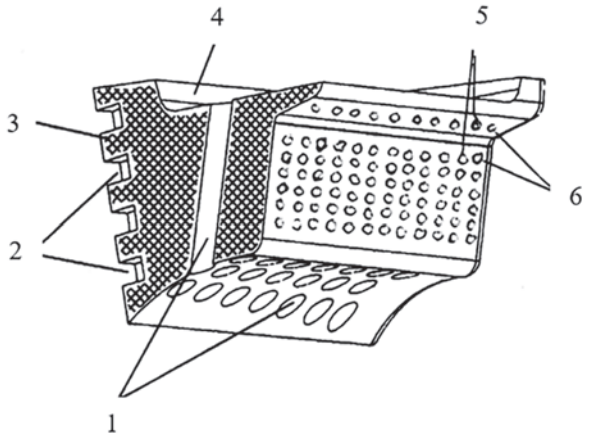


Рисунок 7 – Вертикальный поглотитель звуковой энергии в подкапотном пространстве трактора [14]: *1* – вентиляционные каналы; *2* – тупиковые полости; *3* – пористый элемент поглотителя звуковой энергии; *4* – воздухозаборная полость; *5, 6* – отверстия

Для определения способности стеклянных пластин препятствовать проникновению шума рассчитывается показатель «критическая частота волн» ($f_{кр}$) [13]

$$f_{кр} = \frac{C^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{B}} = \frac{C^2}{1{,}8 \cdot C_п h},$$

где C – скорость звука в воздухе, м/с; B – изгибная жесткость пластины; $C_п$ – скорость распространения звуковых волн в твердом теле (пластине), м/с; h – толщина пластины, м.

Среднее значение показателя звукоизоляции ($R_{ср}$) двойной стенки с воздушной прослойкой для частот от 100 до 3 000 Гц находится из выражения [13]

$$R_{ср} = 13{,}5(m_1 + m_2) + 13 + \Delta_{пр},$$

где m_1 и m_2 – масса стекол перегородки, кг; $\Delta_{пр}$– звукоизоляция воздушного промежутка, дБ.

Предлагаемое запатентованное техническое решение двухслойного остекления ближайшей к двигателю стенки кабины трактора способствует увеличению звукоизоляции кабины на частотах 250 Гц и снижению шума до 5 дБА.

Для уменьшения уровня шума, проникающего в кабину трактора, рекомендуется техническое средство в виде вертикального поглотителя звуковой энергии (рисунок 7), состоящее из цельноформованного звукопоглощающего модуля и шумопоглощающей панели, смонтированных в подкапотном пространстве. Для дополнительного демпфирования звукопоглощающего модуля выполнены тупиковые плоскости в виде обращенных вершинами внутрь прямых круговых конусов. При этом обращенные наружу диаметры оснований прямых круговых конусов равны 6–8 мм, а угол при вершине в осевом сечении углублений равен в шахматном порядке 60 и 90°. Поверхность стенок звукопоглощающего модуля облицована термостойкой микроперфорированной алюминиевой фольгой.

Для защиты от шума высоких уровней в кабине трактора предлагается использовать и шумопоглощающее техническое средство в виде брызговика (рисунок 8), которое устанавливается в нижней горизонтальной части моторного отсека трактора и содержит тонколистовой металлический элемент в виде защитной несущей оболочки [15]. Такая оболочка может включать несколько отдельно смонтированных составных частей, имеющих горизонтальные и боковые (вертикальные и наклонные) поверхности. Звукопоглощающая футеровка плосколистовых звукопоглощающих панелей содержит внешний пожаро-защитный слой звукопрозрачной пленки, а также слой пористого звукопоглощающего материала и монтажный адгезионный клеевой слой.

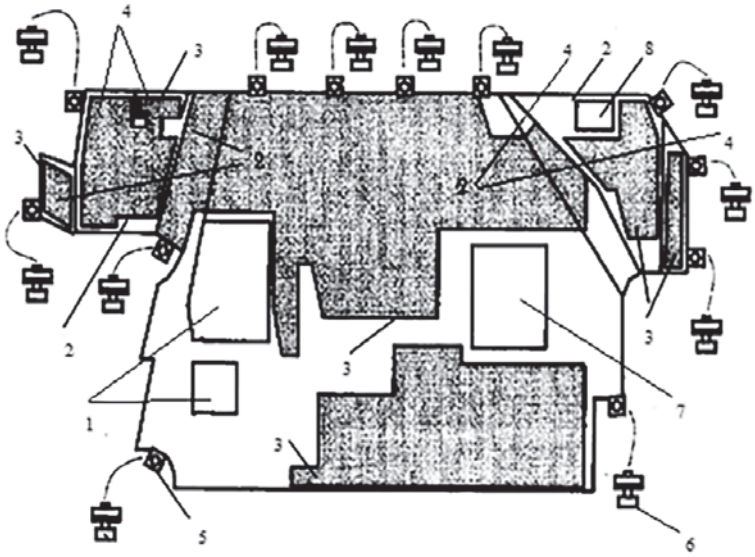


Рисунок 8 – Горизонтальный поглотитель звуковой энергии в подкапотном пространстве трактора:
1 – панели внутренние плосколистовые звукопоглощающие; *2* – панели боковые плосколистовые звукопоглощающие;
3 – панель футеровки звукопоглощающая; *4* – панели боковые плосколистовые звукопоглощающие;
5 – фланец; *6* – съемные крепежные элементы; *7, 8* – проемы вентиляционные

Периметр внешних контуров монолитной плосколистовой звукопоглощающей панели превышает периметр квадратной монолитной плосколистовой звукопоглощающей панели не менее чем в три раза. Площадь лицевой поверхности плосколистовой звукопоглощающей панели составляет не менее 0,25 м^2.

Общее количество автономных плосколистовых звукопоглощающих панелей в составе шумопоглощающего брызговика – четыре. Воздушные зазоры между противолежащими торцами отдельных автономных плосколистовых звукопоглощающих панелей больше, чем толщина плосколистовых звукопоглощающих панелей. Такие элементы устанавливаются как на горизонтальной поверхности несущей защитной оболочки шумопоглощающего брызговика, так и на ее боковых (вертикальных и наклонных) поверхностях. На монолитной плосколистовой звукопоглощающей панели имеется лабиринтный вырез, образующий воздушный зазор, ширина которого не менее толщины плосколистовой звукопоглощающей панели. Автономные плосколистовые звукопоглощающие панели выполнены в виде прямоугольных пластинчатых элементов и располагаются параллельно относительно продольной оси трактора, что способствует многократному отражению и поглощению шумопоглощающим брызговиком звуковой энергии, генерируемой системами моторного отсека.

Комплексное применение предлагаемых технических решений будет способствовать снижению уровня шума в кабине трактора на 6–8 дБА, улучшению условий и повышению безопасности труда.

Заключение

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны алгоритм и методика расчета акустических характеристик в кабине тракторов (на примере трактора «Беларус-1221»), срок эксплуатации которых составляет более пяти лет, с учетом воздействия внешних источников шума. Полученные результаты использованы в разработке технических решений для снижения уровней шума на рабочем месте тракториста-машиниста.

Список использованных источников

1. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК : монография / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2025. – 388 с.

2. Обеспечение безопасности производственной среды в кабине мобильной сельскохозяйственной техники / А. Л. Мисун, И. М. Морозова, Л. В. Мисун [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки, 2018. – № 11. – С. 24–27.

3. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Логос, 2015. – 432 с.

4. Техническое решение для снижения уровня воздействия источников шума на акустические характеристики кабины трактора в послегарантийный период эксплуатации / Ал-р Л. Л. Мисун, А. В. Гаркуша, А. П. Рудковская [и др.] // Обеспечение безопасной жизнедеятельности на современном этапе развития общества : материалы республ. науч.-практ. конф., г. Горки, 21–22 апр. 2022 г. / Бел. гос. с.-х. акад. ; редкол.: В. Н. Босак (гл. ред.) [и др.]. – Горки, 2022. – С. 92–94.

5. Физиологические и медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности : пособие / Ал-й Л. Мисун, Л. В. Мисун, Ал-р Л. Мисун [и др.]. – Мн. : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2024. – 312 с.

6. Климова, М. Г. Физическое воздействие шума на здоровье водителей / М. Г. Климова, Н. К. Христофорова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2012. – № 11. – С. 38–46.

7. Мисун, Л. В. О проблеме уровня шума в кабине мобильной сельскохозяйственной техники / Л. В. Мисун, А. В. Гаркуша // Производство и переработка сельскохозяйственной продукции : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Воронеж, 23–25 ноября 2022 г. – Воронеж : Воронежский гос. агр. ун-т, 2022. – С. 44–50.

8. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений : ГОСТ 27.502-83 ; введ. 26.07.1983 ; Госкомитет по стандартам. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 23 с.

9. Надежность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002–2015. – Взамен ГОСТ 27.002 – 89. – М. : Стандартинформ, 2015. – 63 с.

10. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности : ГОСТ 12.1.003-83. – Взамен ГОСТ 12.01. 003 – 76. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 23 с.

11. Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Шум на рабочих местах, в транспортных средствах, в помещениях жилых, общественных зданиях и на территории жилой застройки»: постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 16 ноября 2011 г., № 115 : офиц. сайт. – URL: http://minzdrav.gov.by (дата обращения: 20.01.2025).

12. Патент BY 162580, МПК 62Д33/06 (2006.01). Кабина транспортного средства : № a20100542 : заявлено 09.04.2010 : опубл. 30.08.2012 / Мисун Л. В., Мисун А. Л., Агейчик В. А. ; заявитель Бел. гос. агр. техн. ун-т. – 5 с.

13. Мисун, А. Л. Техническое решение и основные показатели звукоизоляции двухслойной конструкции из стекла кабины мобильной сельскохозяйственной техники / А. Л. Мисун, И. Н. Мисун, А. Г. Кузнецов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр., г. Горки, Бел. гос. с.-х. акад. – 2021. – Вып. 6. – С. 29–32.

14. Полезная модель BY13753, МПК B 60R 13/08, G 10K 11/168, F 0277/13 (2006.01). Поглотитель звуковой энергии для моторного отсека транспортного средства сельскохозяйственного назначения : № *u*20240284 : заявлено: 27.12.2024 : опубл. 16.06.2025 / Мисун А. Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.] : заявители : Мисун А. Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.]. – 5 с.

15. Полезная модель BY12966, МПК B 62Д 25/16, B 60R 13/08 (2006/01). Шумопоглощающий брызговик моторного отсека трактора : № *u*20210335 : заявлено 28.12.2021 : опубл. 30.08.2022 / Мисун А. Л, Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.] ; заявители : Мисун Ал-р Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.]. – 10 с.

УДК 534.836.2:629.366

Поступила в редакцию 05.05.2025
Received 05.05.2025

Л. В. Мисун, А. В. Гаркуша, Ал-р Л. Мисун

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ШУМА В КАБИНЕ ТРАКТОРА

Аннотация. Разработана математическая модель для прогнозирования снижения уровня шума в кабине трактора в зависимости от механизма поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве, влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста, материала звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора.

Ключевые слова: трактор, кабина, шум, снижение, моделирование, факторы, технические средства шумопоглощения.

L. V. Misun, A. V. Garkusha, Al-r L. Misun

EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru

JUSTIFICATION OF METHODS AND TECHNICAL MEANS FOR REDUCING NOISE LEVEL IN THE TRACTOR CABIN

Abstract. A mathematical model has been developed to predict the reduction of noise levels in a tractor cabin depending on the mechanism of absorption of sound energy in the engine compartment, the influence of the airborne component of noise at the workplace of the tractor driver, and the soundproofing material of the walls of the tractor cabin enclosure.

Keywords: tractor, cabin, noise, reduction, modeling, factors, technical means of noise absorption.

Введение

В настоящее время практически нет ни одной отрасли народного хозяйства или среды обитания человека, где шум не был бы в числе ведущих вредных факторов. Действие шума приводит к развитию преждевременного утомления, снижению работоспособности, повышению заболеваемости и инвалидности [1]. Так, если его параметры на рабочем месте тракториста-машиниста превышают 80 дБА, что во многих случаях фиксируется в кабинах тракторов с послегарантийным сроком эксплуатации, то значительное количество трактористов-машинистов имеют сенсоневральную (нейросенсорную) тугоухость [1].

Основная часть

Установленные закономерности формирования акустических характеристик на рабочем месте тракториста-машиниста позволили обосновать способы и технические решения по доведению уровня шума в кабине трактора с послегарантийным сроком эксплуатации до нормативных значений. Обоснование выбора способов и технических средств для снижения шума осуществлялось с учетом увеличения диссипативных и особенно звукоизолирующих материалов для технических устройств.

Исследования проводились на тракторе Беларус-1221.2 (срок эксплуатации – семь лет; гос. номер – ВВ-28150) при загрузке двигателя трактора на 80 % эксплуатационной мощности [2]. По результатам аттестации рабочего места тракториста-машиниста по условиям труда значение эквивалентного по энергии уровня звука непостоянного шума составило 83дБА.

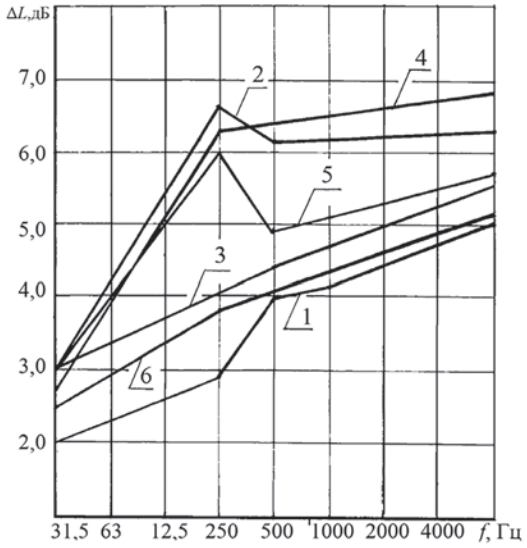


Рисунок 1 – Результаты исследований способов и технических средств для снижения звукового давления в нормируемом диапазоне частот в кабине трактора: *1* – установка акустического экрана ($b_{э.м.}$ = 14 мм); *2* – использование двойного остекления в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора [3] ($b_{с}$ = 8 мм); *3* – использование горизонтального поглотителя звуковой энергии с внешним пожарозащитным слоем из звукопрозрачной пленки в подкапотном пространстве [4] ($b_{бр.м.}$ = 12 мм); *4* – установка вертикального поглотителя звуковой энергии облицованного термостойкой микроперфорированной алюминиевой фольгой в подкапотном пространстве [5] ($b_{п.м.}$ = 12 мм); *5* – заполнение воздушных полостей между стенками металлической части кабины минераловатной плитой ($b_{м.п.}$ = 20 мм); *6* – использование (наклеивание) на металлические части ограждения кабины полимерного материала MULTI-MAT ($b_{п.м.}$ = 5 мм)

Предварительными исследованиями определены показатели снижения звукового давления в нормируемых частотах в кабине трактора при использовании различных технических решений (рисунок 1).

Большое количество факторов различной природы, способствующих снижению уровня шума в кабине трактора, делает целесообразным на первом этапе исследований выявить из них наиболее существенные. В таблице 1 приведены качественные факторы, различная комбинация которых оказывает влияние на снижение уровня шума в кабине трактора.

Таблица 1 – **Факторы снижения уровня шума в кабине трактора**

Факторы	Обозначения	
	–	+
X_1 – способ защиты от влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста	акустический экран между двигателем и кабиной трактора	двойное остекление в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора
X_2 – механизм поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве	горизонтальный поглотитель звуковой энергии	вертикальный поглотитель звуковой энергии
X_3 – материал звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора	полимерный материал MULTI-MAT	минераловатная плита

Планируем и реализуем полный факторный эксперимент типа 2^n, где n – число факторов (таблица 2).

Таблица 2 – **Матрица планирования и результаты эксперимента**

№ опыта	Планирование эксперимента			Результаты эксперимента, дБА			
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}$
1	+	+	+	7,1	7,1	6,9	7,03
2	+	+	–	6,7	6,5	6,7	6,63
3	+	–	+	6,4	6,4	6,3	6,37
4	–	+	+	5,8	6,0	6,0	5,93
5	+	–	–	5,5	5,7	5,7	5,63
6	–	+	–	4,9	4,7	4,7	4,77
7	–	–	+	4,3	4,4	4,4	4,37
8	–	–	–	3,9	4,1	4,0	4,00

Анализ предварительных исследований показал, что для описания рассматриваемого процесса целесообразно использовать уравнение регрессии следующего вида:

$$Y_1 = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_{12} + a_{13}X_{13} + a_{23}X_{23}, \quad (1)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23} – коэффициенты уравнения регрессии.

Однородность построчных выборочных дисперсий (S_i^2) результатов эксперимента проведена по критерию Кохрена [6]

$$\varphi_э < \varphi_{n-1;\,N;\,p}, \quad (2)$$

где $\varphi_э$ – экспериментальное значение критерия Кохрена следующее:

$$\varphi_э = \frac{S^2_{i\max}}{\sum\limits_{i=1}^{N} S_i^2} = \frac{0,0038}{0,0238} = 0,1597;$$

$\varphi_{n-1;\,N;\,p}$ – критическое значение критерия Кохрена при числе степеней свободы $f_{числ} = n - 1$, $f_{знам} = N - 1$ и доверительной вероятности p = 0,95 [6]:

$$\varphi_{n-1;\,N;\,p} = \varphi_{2;\,8;\,0,95} = 0,5157;$$

$$\varphi_э = 0,1597 < \varphi_{2;\,8;\,0,95} = 0,5157,$$

т. е. выдвинутая гипотеза не противоречит экспериментальным данным.

Коэффициенты уравнения регрессии (1) рассчитаны по формулам

$$a_0 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \overline{Y}_i}{N}; \quad (3)$$

$$a_i = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} x_i \overline{Y_i}}{N}, \; i = 1,2,3,...,N; \quad (4)$$

$$a_{ir} = \frac{\sum\limits_{\substack{i=1 \\ i<r}}^{N} x_{ir} x_i \overline{Y}_i}{N}, \; i, r = 1,2,3,...,N \quad (5)$$

и равны: $a_0 = 5,591$; $a_1 = 0,824$; $a_2 = 0,499$; $a_3 = 0,334$; $a_{12} = -0,084$; $a_{13} = -0,049$; $a_{23} = 0,056$.

Доверительный интервал для коэффициентов уравнения регрессии рассчитывался по формуле

$$\Delta a = t_{N(n-1);p}\sqrt{\frac{S^2_{воспр}}{nN}}, \quad (6)$$

где $t_{N(n-1);p}$ – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f = N(n-1) = 16$ и доверительной вероятности p = 0,95

$$t_{табл} = t_{N(n-1);p} = t_{16;\,0,95} = 1,7460 \text{ [7].}$$

$$S^2_{воспр} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} S_i^2}{N} = \frac{0,0238}{8} = 0,0030,$$

где $S^2_{воспр}$ – дисперсия воспроизводимости.

Тогда

$$\Delta a = 1,7460\sqrt{\frac{0,0030}{3 \cdot 8}} = 0,0195.$$

Коэффициенты уравнения регрессии значимы, если выполняются следующие условия:

$$\Delta a < |a_i|, (i = 0; 1; 2; 3); \quad (7)$$

$$\Delta a < |a_{is}|, (i, s = 0; 1; 2; 3, i < s). \quad (8)$$

В нашем случае условия (6) и (7) выполняются, поэтому уравнение регрессии (1) следующее:

$$Y_1 = 5,591 + 0,824X_1 + 0,499X_2 + 0,334X_3 – 0,084X_1 X_2 – 0,049X_1 X_3 + 0,056X_2 X_3. \quad (9)$$

Полученное уравнение регрессии адекватно, если $F_p < F_q$, где $F_P = \frac{S^2_{\text{воспр.}}}{S^2_{\text{ад}}}$ – расчетное значение F-критерия Фишера; $S^2_{\text{ад}}$ – дисперсия адекватности, характеризующая отклонение экспериментальных данных от полученных по уравнению регрессии:

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{n \cdot \varphi}{N – B}, \quad (10)$$

где φ – остаточная сумма квадратов.

$$\varphi = \sum_{i=1}^{N} (\overline{Y_i} – Y_{ip})^2 = 0,013,$$

где B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Тогда, $S^2_{\text{ад}} = \frac{3 \cdot 0,008}{8 – 7} = 0,024$, $F_P = \frac{0,003}{0,024} = 0,125$; F_q – табличное значение критерия Фишера ($F_q = F_{N(n–1); N–B; p} = F_{16; 1; 0,95} = 4,49$ [7], т. е. $F_{\text{р}} = 0,125 < F_{\text{q}} = 4,49$).

Анализ выражения (9) позволил сделать следующие выводы:

– максимальный показатель снижения уровня шума в кабине трактора достигается при $X_1 = +1$ (двойное остекление), $X_2 = +1$ (вертикальный поглотитель звуковой энергии), $X_3 = +1$ (минераловатная плита) и составляет 7,2 дБА;

– наихудший результат (3,9 дБА) ожидается, когда для защиты от влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста используется акустический экран между двигателем и кабиной трактора ($X_1 = –1$), механизм поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве – горизонтальный поглотитель звуковой энергии ($X_2 = –1$), материал звукоизоляции стенок ограждения кабины трактора – полимерный материал MULTI-MAT ($X_3 = –1$);

– фактор «способ защиты от влияния воздушной составляющей шума на рабочем месте тракториста-машиниста» (X_1) оказывает более существенное влияние на снижение шума в кабине, нежели другие рассматриваемые факторы, при этом:

$$X_1 = 0,824 > X_2 = 0,499 > X_3 = 0,334;$$

– результат численного эксперимента, когда переменные X_2 и X_3 зафиксированы на определенных значениях ($X_2 = +1$; $X_3 = +1$), показывает, что в сравнении с акустическим экраном, устанавливаемым между двигателем и кабиной трактора, использование двойного остекления в ближней к двигателю стенке кабины сопровождается повышением шумопоглощения на 23,9 %.

На втором этапе регрессионного анализа шумопоглощения на рабочем месте тракториста-машиниста ставилась задача исследовать процесс с учетом изменяющихся параметров сменных шумопоглощающих технических средств, устанавливаемых на тракторе для обеспечения ПДУ. Поисковыми исследованиями выявлены наиболее существенные факторы (толщина стекол в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора ($b_{\text{с}}$), вертикального поглотителя звуковой энергии в подкапотном пространстве ($b_{\text{п. м}}$), минераловатной плиты для звукоизоляции стенок ограж-

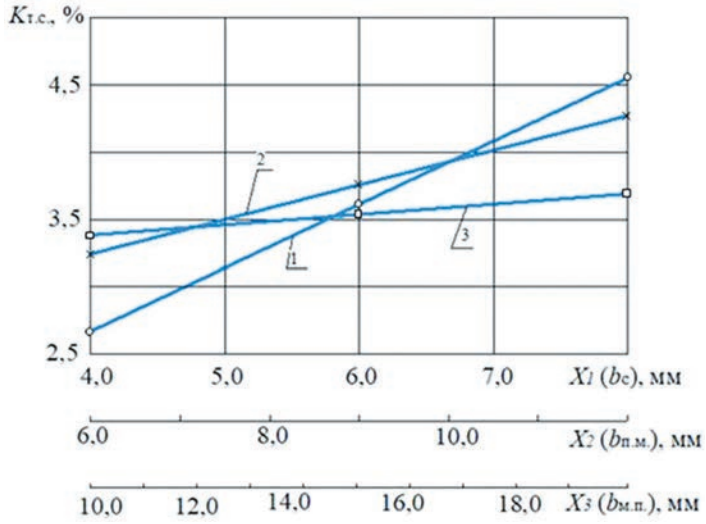


Рисунок 2 – Показатель снижения уровня шума на рабочем месте тракториста-машиниста в зависимости от толщины: *1* – стекол в ближайшей к двигателю стенке кабины трактора (b_c); *2* – вертикального поглотителя звуковой энергии в подкапотном пространстве ($b_{п.м.}$); *3* – минераловатной плиты для звукоизоляции стенок ограждения кабины ($b_{м.п.}$)

дения кабины трактора ($b_{м.п}$) (рисунок 2), влияющие на показатель уровня шума ($У_2$) на рабочем месте тракториста-машиниста относительно допустимого его значения (ПДУ) с учетом устанавливаемых сменных технических средств шумопоглощения:

$$У_2 = \frac{\frac{У_ш}{У_{ПДУ}} - \frac{У_ш - K_{т.с}}{У_{ПДУ}}}{\frac{У_ш}{У_{ПДУ}}} 100 = \frac{K_{т.с}}{У_ш} 100, \% \qquad (11)$$

где $У_ш$ – среднее значение эквивалентного по энергии уровня звука постоянного шума по результатам аттестации рабочих мест трактористов-машинистов, дБА. Согласно результатам аттестации по уровню шума на рабочих местах трактористов-машинистов (20 тракторов «Беларус-1221» 2004–2019 гг. выпуска) максимальное значение уровня шума составило 85 дБА; $У_{т.с}$ – показатель снижения уровня шума на рабочем месте тракториста-машиниста в зависимости от изменяющихся параметров сменных шумопоглощающих технических средств, дБА (рисунок 2); $У_{ПДУ}$ – предельно-допустимый уровень шума на рабочем месте тракториста-машиниста ($У_{ПДУ}$ = 80 дБА).

Наименование факторов, уровни и интервалы их варьирования представлены в таблице 3.

Таблица 3 – **Уровни и интервалы варьирования факторов**

Обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Варьируемый фактор	b_c	$b_{п.м}$	$b_{м.п}$
Единицы измерения	мм	мм	мм
Основной уровень (X_i = 0)	6,0	9,0	15,0
Интервал варьирования	2,0	3,0	5,0
Верхний уровень (X_i = +1)	8,0	12,0	20,0
Нижний уровень (X_i = –1)	4,0	6,0	10,0
Формулы перевода натуральных значений факторов в нормированные и обратно	$X_1 = \frac{x_1 - 6,0}{2,0}$, $x_1 = 2X_1 + 6,0$	$X_2 = \frac{x_2 - 9,0}{3,0}$, $x_2 = 3X_2 + 9,0$	$X_3 = \frac{x_3 - 15,0}{5,0}$, $x_3 = 5X_3 + 15,0$

Планируем и реализуем полный факторный эксперимент 2^3 (таблица 4).

Таблица 4 – **Матрица планирования и результаты эксперимента**

№ опыта	Планирование эксперимента			Опытные данные, %			Результаты эксперимента			
	X_1	X_2	X_1	Y_1	Y_2	Y_3	$\overline{Y_j}$, %	S_j^2	Y_j^p	$(\overline{Y_j} - Y_j^p)^2$
1	+	+	+	9,08	9,12	9,11	9,10	0,0001	9,25	0,0255
2	+	+	–	8,26	8,31	8,30	8,29	0,0005	8,32	0,0009
3	+	–	+	7,98	7,93	7,97	7,96	0,0005	7,81	0,0225
4	–	+	+	7,40	7,42	7,37	7,40	0,0002	7,25	0,0225
5	+	–	–	6,88	6,94	6,90	6,91	0,0003	7,06	0,0225
6	–	+	–	5,97	5,92	5,92	5,94	0,0006	6,09	0,0225
7	–	–	+	5,33	5,29	5,27	5,30	0,0006	5,45	0,0225
8	–	–	–	4,80	4,74	4,79	4,78	0,0007	4,63	0,0255
							$\sum_{j=1}^{N} \overline{Y_j} = 55,68$	$\sum_{j=1}^{N} S_j^2 = 0,0035$	$\varphi = \sum_{j=1}^{N} (\overline{Y_j} - Y_j{}^p)^2 = 0,1794$	

Обработка данных эксперимента проведена согласно формулам (2–8), (10). Проделав соответствующие вычисления и проверки, получили следующее выражение:

$$Y_2 = 6,960 + 1,105X_1 + 0,722X_2 + 0,480X_3 - 0,093X_1 X_2 - 0,015X_1 X_3 + 0,088X_2 X_3. \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показывает: наилучший результат – максимальное значение снижения шума на рабочем месте тракториста-машиниста относительно ПДУ (Y_{2max}) – достигается при $X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ и равно 9,25 % ПДУ.

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем выражение (12), используя данные таблицы 3:

$$Y_2 = -0,141 + 0,714b_{с} + 0,246b_{п.\,м} + 0,052b_{м.\,п} - 0,015b_{с}b_{п.\,м} - 0,002b_{с}b_{м.\,п} + 0,006b_{п.\,м}b_{м.\,п} \quad (13)$$

Разработанная математическая модель (выражение (13)), позволяет определить рациональные параметры сменных технических средств шумопоглощения, устанавливаемых на тракторе ($x_1 = b_{с} = 8$ мм; $x_2 = b_{п.\,м} = 12$ мм; $x_3 = b_{м.\,п} = 20$ мм), обеспечивающих максимальное снижение уровня шума (7,4 дБА), а также выбрать требуемые параметры технических средств шумопоглощения для устранения превышения ПДУ с учетом фактического значения эквивалентного по энергии уровня звука непостоянного шума.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана математическая модель шумопоглощения на рабочем месте тракториста-машиниста с учетом материала звукоизоляции стенок ограждения кабины, механизма поглощения звуковой энергии в подкапотном пространстве, воздушной составляющей шума в кабине трактора. Рассмотрены варианты использования различных сменных шумопоглощающих технических средств, исследована их целесообразность и эффективность.

Список использованных источников

1. Физиологические и медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности : пособие / Ал-й Л. Мисун, Л. В. Мисун, Ал-р Л. Мисун [и др.]. – Мн. : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2024. – 321 с.

2. Методы измерения шума на рабочих местах : ГОСТ 12.1.050-86. – Взамен ГОСТ 20445-75 ; введ. 01.01.1987. – М. : Стандартинформ, 2007. – 19 с.

3. Мисун, Ал-р Л. Технические решения и основные показатели звукоизоляции двухслойной конструкции из стекла кабины мобильной сельскохозяйственной техники / Ал-р Л. Мисун, И. Н. Мисун, А. Г. Кузнецов // Иннова-

ционные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки, БГСХА, 2021. – Вып. 6. – С. 29–32.

4. Мисун, Л. В. Техносферная безопасность : пособие / Л. В. Мисун, Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2023. – 212 с.

5. Полезная модель BY13753, МПК B 60R 13/08, G 10K 11/168, F 0277/13 (2006.01). Поглотитель звуковой энергии для моторного отсека транспортного средства сельскохозяйственного назначения: № *u*20240284 : заявлено: 27.12.2024 : опубл. 16.06.2025 / Мисун А. Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.] ; заявители : Мисун Ал-р Л., Агейчик О. Г., Гаркуша А. В. [и др.]. – 5 с.

6. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования : учеб.-метод. комплекс / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Мн. : БГАТУ, 2010. – 276 с.

7. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных : в 2 т. / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 610 с.

УДК 631.158:658.3:631.3

Поступила в редакцию 25.07.2025
Received 25.07.2025

Ал-й Л. Мисун, А. В. Гаркуша, Ал-р Л. Мисун

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАТОРОВ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ (НА ПРИМЕРЕ ТРАКТОРИСТА-МАШИНИСТА)

Аннотация. Сделан анализ методов комплексной оценки профессиональной безопасности (профессиональная подготовка, успешность, пригодность) трактористов-машинистов. Предложена математическая модель состояния профессиональной безопасности работников с учетом их психофизиологических показателей.

Ключевые слова: тракторист-машинист, психофизиологические показатели, методы моделирования, математическая модель, профессиональная безопасность.

Al-i L. Misun, A. V. Garkusha, Al-r L. Misun

EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru

MODELING OF PROFESSIONAL SAFETY OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY OPERATORS (USING THE EXAMPLE OF A TRACTOR DRIVER)

Abstract. The analysis of methods of complex assessment of professional safety (professional training, success, suitability) of tractor drivers-machinists is made. A mathematical model of the state of professional safety of workers taking into account their psychophysiological indicators is proposed.

Keywords: tractor driver-machinist, psychophysiological indicators, modeling methods, mathematical model, professional safety.

Введение

Формирование личности безопасного типа – это научно обоснованная система мероприятий, направленных на коррекцию и развитие индивидуальных способностей личности, выявленных при профотборе, благодаря которым удается достичь совершенно новых качественных результатов по повышению производственной безопасности и работоспособности человека. Эта система включает проведение профессионального отбора, повышение качества профессиональных навыков, активизацию уровня психофизиологических показателей и др. [1].

Основная часть

Для проведения исследований был осуществлен поиск наиболее корректного метода оценки профессиональной безопасности (профессиональная подготовка, успешность, пригодность) операторов мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) на примере тракториста-машиниста, позволяющего по известным психофизиологическим показателям получить теоретические значения оценки профессиональной безопасности и сравнить их с экспертными оценками, данными руководителями агропредприятий, которые хорошо знают этих работников.

Экспериментальная оценка профессиональной безопасности работников исследуемой профессии проведена на агропредприятиях Браславского и Глубокского районов Республики Беларусь (таблица 1).

Таблица 1 – **Парк тракторов «Беларус», находившихся под наблюдением (2023–2024 гг.; агропредприятия Браславского и Глубокского районов)**

Наименование агропредприятия	Год выпуска трактора	Гос. номер трактора	Стаж работы трактористом-машинистом
УП «За Родину»	2009	ВВ–25026	27
ОАО «Браславский райагросервис»	2009	ВВ–25031	24
ОАО «Сельцы»	2010	ВК–21646	13
ОАО «Браславский райагросервис»	2010	ВВ–26046	9
УП «За Родину»	2011	ВВ–26938	26
СУП «Мерецкие»	2011	ВВ–26974	14
СУП «Мерецкие»	2012	ВВ–26993	4
СУП «Мерецкие»	2012	ВВ–26994	28
СХФ «Прошково» ОАО «Глубокский райагросервис»	2013	ВА–28703	30
ГП «Озерцы»	2013	ВВ–26958	24
УП «За Родину»	2014	ВВ–27438	30
СУП «Мнюто»	2014	ВВ–27948	25
УП «Короли»	2015	ВВ–27971	19
КУСП «Браславский»	2015	ВВ–27993	16
УП «За Родину»	2016	ВВ–28150	30
СУП «Мерецкие»	2016	ВК–23022	5
УП «За Родину»	2017	ВВ–29142	10
СУП «Мерецкие»	2017	ВК–21553	17
ГП «Ломашино-Агро»	2018	ВК–22830	30
УП «Короли»	2019	ВК–23574	15

Программа исследований включала оценку таких профессионально-значимых психофизиологических показателей, как сенсомоторная реакция на световой раздражитель, память, внимание, координация движений. Необходимое количество экспертов (*m*) определялось по следующей формуле [2]:

$$m = \frac{\chi^2_{\beta;(n-1)}}{(\delta+1)(n-1)\cdot W_o}, \quad (1)$$

где $\chi^2_{\beta;\,(n-1)}$ – квантиль распределения, соответствующий доверительной вероятности β и числу степеней свободы (n – 1); n – число оцениваемых факторов (n = 4); δ – заданная точность результатов исследований (δ = 0,950); W_o – критическое значение коэффициента конкордации (W_o = 0,100).

Подставив значения показателей $\chi^2_{\beta;\,(n-1)}$ [3], δ, n и W_o в формулу (1), получим m равное четырем экспертам.

Наблюдаемые трактористы-машинисты, согласно полученным оценкам у экспертов (5; 4 и 3 балла), были разделены на три подгруппы, для каждой из которых рассчитаны математическое ожидание $m_i^{(N)}$, дисперсия $Д_i^{(N)}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma_i^{(N)}$, корреляционный момент $K_{ij}^{(N)}$ между случайными величинами X_i, X_j (i = 1, 2, 3 … n; j = 1, 2, 3 … n) и коэффициент корреляции $K_{ij}^{(N)}$ переменной величины X_i события N по следующим формулам:

$$m_i^{(N)} = \frac{\sum_{i=1}^{K_N} X_{ij}^{(N)}}{K_N}, \quad (2)$$

$$Д_i^{(N)} = \frac{\sum_{i=1}^{K_N} \left(X_{ij}^{(N)} - m_i^{(N)} \right)^2}{K_N - 1}, \quad (3)$$

$$\sigma_i^{(N)} = \sqrt{Д_i^{(N)}}, \tag{4}$$

$$K_{ij}^{(N)} = \frac{\sum_{i=1}^{K_N}\sum_{j=1}^{K_N}\left(X_i^{(N)} - m_i^{(N)}\right)\left(X_j^{(N)} - m_j^{(N)}\right)^{(N)}}{K_N - 1}, \tag{5}$$

$$r_{ij} = \frac{K_{ij}^{(N)}}{\sigma_i^{(N)}\sigma_j^{(N)}}, \tag{6}$$

где $X_{ij}^{(N)}$ (i = 1, 2, 3, …, K_N) – значение случайной величины X_i (соответствующий психофизиологический параметр), которая принадлежит одному из событий N (вероятность появления оценок 5; 4 или 3 балла).

Для проведения исследований использовались следующие методы: плотностей, геометрический и вероятностный. Первый метод основан на понятии плотности распределения системы случайных величин X_1, X_2 …, X_n, которая в каждом событии N принималась по многомерному нормальному закону [4]. Из теории вероятностей известно, что в этом примере случайная величина X_i (i = 1, 2…, n) также подчиняется нормальному закону [5]. Пусть имеется N событий случайных величин X_1, X_2…, X_n. В нашем случае событиями будет появление оценок 5; 4 или 3 балла, а случайными величинами – психофизиологические показатели: время сенсомоторной реакции на световой раздражитель, параметры внимания, памяти, частота сердечных сокращений и другие параметры, оцениваемые до и после рабочей смены. По экспериментальным данным (таблица 2) выбирается многомерный закон распределения плотности вероятности случайных величин. В нашем случае за основу был взят нормальный закон распределения. Для экспериментальных значений случайных величин X_1, X_2, …, X_n находилась плотность распределения вероятности в каждом событии N. За меру отклонения принималось отношение найденной плотности к ее максимальной величине (плотности) в событии N. Событие, в котором это отношение было наибольшим, принималось за достоверное.

При нормальном законе распределения случайной величины плотность вероятности $f^{(N)}$ (X_1, X_2 …, X_n) равна [5]

$$f^{(N)}(X_1, X_2, \ \ldots, X_n) = \frac{\sqrt{\left|C^{(N)}\right|}}{(2\pi)^{N^2}} \exp\frac{1}{2} R^{(N)}, \tag{7}$$

$$R^{(N)} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(C_{ij}^{(N)}(X_i - m_i^{(N)})\right)\left(X_j - m_j^{(N)}\right), \tag{8}$$

где $\left|C^{(N)}\right|$ – определитель матрицы; $C^{(N)} = \left\|C_{ij}{}^{(N)}\right\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице $K_{ij}^{(N)}$.

Из (7) следует, что максимальное значение плотности вероятности $f_{\max}^{(N)}$ (X_1, X_2, …, X_n) имеет место при $X_i = m_i^{(N)}$:

$$f_{\max}^{(N)}\left(m_1^{(N)}, \ m_2^{(N)}, \ \ldots, \ m_n^{(N)}\right) = \frac{\sqrt{\left|C^{(N)}\right|}}{(2\pi)^{N^2}}. \tag{9}$$

Обозначая через $\sigma^{(N)}$ меру отклонения плотности вероятности $f^{(N)}$ к ее максимальному значению $f_{\max}^{(N)}$, получим выражение, позволяющее моделировать процесс изменения состояния профессиональной безопасности тракториста-машиниста в зависимости от его психофизиологических показателей

$$\sigma^{(N)} = \exp\left(-\frac{1}{2R^{(N)}}\right). \tag{10}$$

Подставляя в соотношение (10) значение случайной величины X_1, X_2, …, X_n для каждого события N, находим $\sigma^{(N)}$. В качестве достоверного события выбираем то событие N, в котором $\sigma^{(N)}$ наибольшее. В том случае, если случайные величины X_1, X_2, …, X_n некоррелированные, то плотность вероятности $f^{(N)}(X_1, X_2, \ldots, X_n)$ находится по формуле [4]:

$$f^{(N)}(X_1, X_2, \ldots, X_n) = \frac{1}{(2\pi)^{N^2} \cdot \frac{n}{i=1}\sigma_i^{(N)}} \exp\left[-\frac{1}{2}R^{(N)}\right], \quad (11)$$

где $\frac{n}{i=1}\sigma_i^{(N)}$ – произведение среднеквадратических отклонений $\sigma_1^{(N)}$, $\sigma_2^{(N)}$, ... , $\sigma_n^{(N)}$.

$$R^{(N)} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{X_i - m^{(N)}}{\sigma_i}\right)^2, \quad (12)$$

Из выражения (10) следует, что $\sigma^{(N)}$ будет наибольшим, когда величина $R^{(N)}$ – наименьшей. Значению $R^{(N)}$ можно дать геометрическую интерпретацию. Если значения случайных величин взять безразмерными X_1/σ_1, X_2/σ_2, …, X_n/σ_n, то $R^{(N)}$ будет равно квадрату расстояния от точки с координатами X_1/σ_1, X_2/σ_2, …, X_n/σ_n до точки с координатами $\frac{m_1^{(N)}}{\sigma_1^{(N)}}$, $\frac{m_2^{(N)}}{\sigma_2^{(N)}}$, ..., $\frac{m_n^{(N)}}{\sigma_n^{(N)}}$. Для одного параметра, воспользовавшись выражением (10), можно записать

$$\sigma^{(N)} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X - m^{(N)}}{\sigma^{(N)}}\right)^2\right]. \quad (13)$$

Таблица 2 – **Результаты исследований психофизиологических показателей трактористов-машинистов**

Значение психофизиологических показателей					
X_1 время реакции (хронорефлекс), мс	X_2	X_3	X_4	X_5 память (таблица Шульте), с	X_6 частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин
	внимание (по табл. Анфимова)				
	количество знаков		число ошибок		
	просмотренных	зачеркнутых			
205/291	340/294	52/54	0/0	41/52	75/79
212/291	418/380	49/46	0/2	40/59	77/77
196/249	549/537	50/48	1/5	47/55	60/69
185/257	594/548	53/45	3/6	50/54	86/88
208/277	412/385	45/41	0/9	53/60	82/82
214/290	572/547	47/39	2/4	49/52	80/80
197/260	538/545	49/40	4/8	52/59	83/84
218/284	592/571	57/53	3/5	56/64	85/90
215/292	390/365	46/42	1/4	50/61	81/92
221/278	576/580	47/48	0/3	55/69	86/94
224/312	459/349	56/42	3/5	52/64	77/82
227/282	482/394	50/49	1/3	48/52	75/80
208/318	441/385	52/40	3/4	55/62	81/92
223/294	442/390	56/47	4/5	63/75	79/89
208/262	579/557	41/36	1/4	49/57	76/82
220/293	506/487	47/42	3/8	48/59	80/81
217/313	284/401	53/40	3/9	51/67	78/80
202/297	579/525	57/54	5/8	42/63	77/86
214/358	472/566	50/34	3/9	62/76	84/87
251/381	583/489	49/48	3/6	52/72	89/90

П р и м е ч а н и е: в числителе – значения психофизиологических показателей до работы; в знаменателе – после работы.

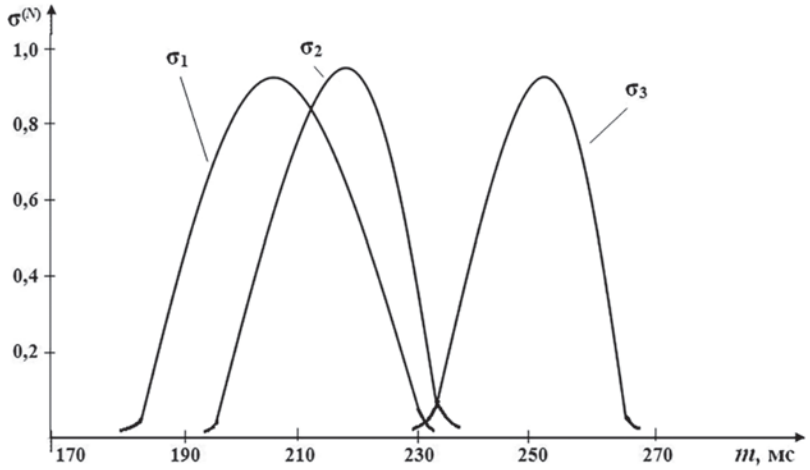


Рисунок 1 – Комплексная оценка профессиональной безопасности тракториста-машиниста (метод плотностей)

На рисунке 1 приведены графики, характеризующие величину отклонения плотности вероятности $\sigma^{(N)}$ от скорости сенсомоторной реакции (m) (таблица 3) на световой раздражитель у трактористов-машинистов ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), соответствующие оценкам 5; 4 и 3 балла.

Таблица 3 – **Время реакции на световой раздражитель, мс, у трактористов-машинистов (до начала рабочей смены)**

Баллы	Число обследованных трактористов-машинистов												Среднее значение скорости реакции (m), мс	Среднеквадратическое отклонение (σ)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
5	183	189	192	194	199	202	–	–	–	–	–	–	193,2	10,1
4	206	207	211	213	214	216	220	223	225	227	–	–	216,2	6,4
3	229	232	255	264	–	–	–	–	–	–	–	–	245,0	12,3

Предлагаемый метод плотности вероятности распределения системы случайных величин для математического моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов позволяет оценивать и прогнозировать их готовность к безопасному выполнению работ непосредственно как в течение рабочей смены, так и в перспективе.

Для сравнительного анализа полученных результатов были проведены исследования оценки состояния профессиональной безопасности тракториста-машиниста в зависимости от психофизиологических его показателей с использованием и других методов – геометрического и вероятностного. На рисунках 2–4 представлены графики функции $Z = f(x_i)$ (i = 1; 2 …, 8), которые позволяют прогнозировать (геометрический метод) профессиональную безопасность тракториста-машиниста в зависимости от частоты сердечных сокращений, скорости реакции, параметров памяти и внимания [6]. В таблице 4 приведены теоретическая оценка профессиональной безопасности трактористов-машинистов, рассчитанная по методам плотности распределения системы случайных величин, геометрическому и вероятностному, а также экспертная оценка. Сравнительный анализ показателей подтверждает, что совпадение теоретической и экспертной оценок достаточно высокое.

Установлено [1], что безопасность и оперативность выполнения оператором МСХТ управленческих технологических воздействий зависит от степени его утомляемости, уровень которой определяется с учетом психофизиологических показателей работника [7]. Согласно результатам исследований и проведенным расчетам, утомляемость у трактористов-машинистов к концу рабочего дня увеличивалась на 21 %, при этом у 95 % поддерживался «высокий» или «средний» уровень профессиональной безопасности, что характеризовало их как успешно пригодных работников с большой вероятностью готовности к безопасному труду.

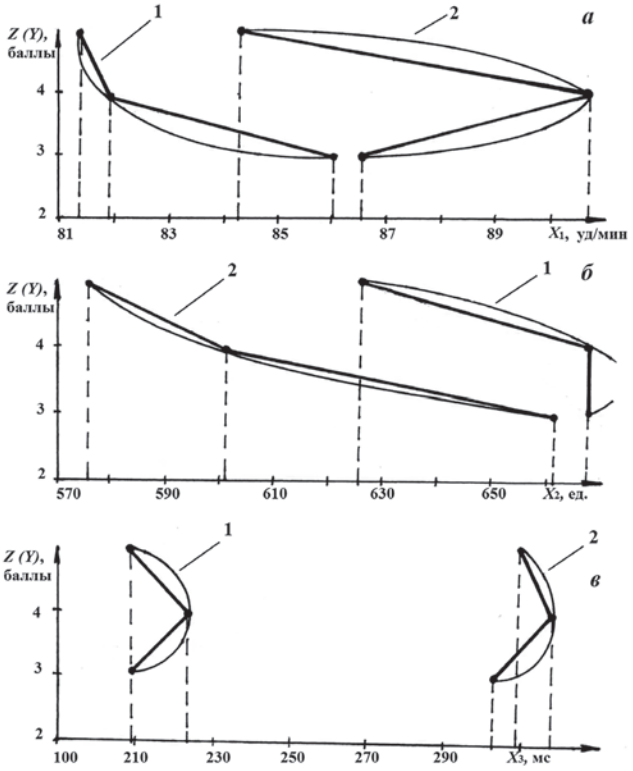


Рисунок 2 – Геометрический метод моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов по психофизиологическим показателям: *1* – начало рабочей смены; *2* – конец рабочей смены; *а* – пульс; *б* – число просмотренных знаков; *в* – скорость реакции (простая сенсомоторная реакция на белый свет)

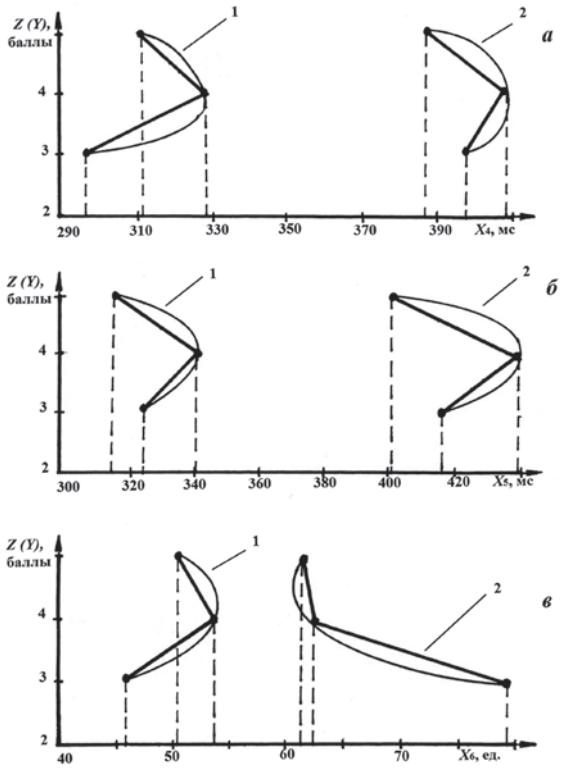


Рисунок 3 – Геометрический метод моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов по психофизиологическим показателям: *1* – начало рабочей смены; *2* –конец рабочей смены; *а* – скорость реакции (сложная сенсомоторная реакция на белый свет); *б* – скорость реакции на красный свет (сложная сенсомоторная реакция); *в* – параметры памяти

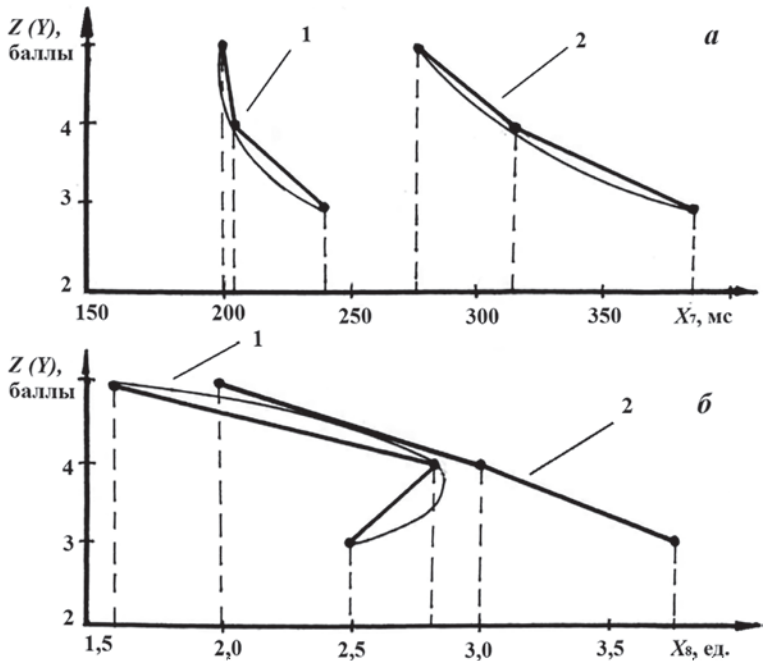


Рисунок 4 – Геометрический метод моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов: *1* – начало рабочей смены; *2* – конец рабочей смены; *а* – сенсомоторная реакция; *б* – внимание (число допущенных ошибок)

Таблица 4 – **Теоретическая и экспертная оценки профессиональной безопасности трактористов-машинистов**

Теоретическая оценка, балл				Экспертная оценка, балл
метод плотностей		геометрический метод	вероятностный метод	
расчетное значение	усредненное значение			
5,00/4,92	5	5,00/4,90	5,00/4,90	5
5,00/4,98	5	5,00/5,00	5,00/5,00	5
5,00/5,00	5	5,00/5,00	5,00/5,00	5
4,35/4,63	4	4,40/4,56	4,40/4,56	5
4,41/3,92	4	4,88/3,78	4,88/3,78	5
3,52/4,77	4	3,50/4,90	3,55/4,90	5
4,81/5,00	5	4,76/5,00	4,76/5,00	5
3,89/4,35	4	3,94/4,28	3,94/5,00	4
4,92/3,97	4	5,00/3,94	5,00/3,90	4
4,13/4,23	4	4,02/4,00	4,02/4,02	4
4,02/4,19	4	3,98/4,00	3,94/4,04	4
5,00/4,67	5	4,72/5,00	5,00/4,94	4
3,90/4,23	4	3,86/5,00	4,12/3,70	4
4,01/3,84	4	3,78/4,00	3,86/3,68	4
4,80/3,92	4	5,00/4,00	5,00/4,68	4
3,67/4,18	4	3,86/4,00	3,44/3,80	4
4,31/4,24	4	4,02/4,00	4,18/3,92	4
4,40/4,42	4	4,08/4,00	4,38/4,04	4
4,29/3,30	4	4,06/4,00	4,00/4,12	4
3,09/3,42	3	3,00/3,00	3,00/3,02	3

П р и м е ч а н и е: в числителе – значения психофизиологических показателей до работы; в знаменателе – после работы.

Заключение

Предложена математическая модель комплексной оценки состояния профессиональной безопасности трактористов-машинистов, что позволяет определить готовность работников к безопасному выполнению работ и прогнозировать успешность их профессиональной деятельности в будущем.

Список использованных источников

1. Мисун, Ал-й Л. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК : монография / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2025. – 388 с.

2. Азаренко, В. В. Моделирование влияния природно-климатических и агрохимических факторов на эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы в условиях контролируемой производственной среды / В. В. Азаренко, В. Л. Мисун, Ал-й Л. Мисун // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – № 2. – С. 18–24.

3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высш. шк. – 2000. – 480 с.

4. Невская, Г. Ф. Разработка метода плотности вероятности распределения случайных величин для моделирования комплексной оценки успешности профессиональной деятельности человека / Г. Ф. Невская, З. И. Губонина, Е. Б. Горбачев // Жизнь и безопасность. – 1998. – № 4. – С. 15–20.

5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

6. Мисун, Ал-й Л. Физиологические и медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности : пособие / Ал-й Л. Мисун, Л. В. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2024. – 312 с.

7. Мисун, Л. В. Техносферная безопасность : пособие / Л. В. Мисун, Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2023. – 212 с.

УДК 331.443:631.3

Поступила в редакцию 25.07.2025
Received 25.07.2025

Ал-й Л. Мисун

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ, РАСЧЕТ, КОНТРОЛЬ И ВЫБОР СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ РИСКАМИ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

Аннотация. Выполнено обоснование выбора стратегии управления производственными рисками на примере кормоуборочной техники.

Ключевые слова: кормоуборочная техника, простои, отказы, производственные риски, расчет, контроль, стратегии управления.

Al-i L. Misun

EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru

IDENTIFICATION OF FACTORS, CALCULATION, CONTROL AND SELECTION OF A STRATEGY FOR MANAGING PRODUCTION RISKS USING THE EXAMPLE OF OPERATION OF FORAGE HARVESTERS

Abstract. The rationale for choosing a production risk management strategy has been provided using forage harvesting equipment as an example.

Keywords: forage harvesting equipment, downtime, failures, production risks, calculation, control, strategies management.

Введение

Идентификация факторов производственного риска базируется на решении производственно-технологических и организационно-управленческих задач безопасности труда, характеризующих отношения в системе «человек – производственная среда» [1–13], возможности получения и обработки статистической информации по всей совокупности исходных данных [3–4]. При этом для оценки различных видов производственного риска целесообразно применять статистический подход [5–9] с использованием метода нелинейного логистического регрессионного анализа, устанавливающий связи между несколькими независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной непрерывного типа (вероятностью) при условии, что она может принимать значения на интервале от 0 до 1.

Основная часть

Проведенный анализ статистических данных и литературных источников [1, 3] позволил установить, что к числу травмоопасных технологических процессов производства продукции растениеводства относится заготовка кормов. При этом более 60 % заготавливаемых кормов занимают измельченные, производство которых осуществляется кормоуборочными комбайнами. Анализ данных по травматизму при эксплуатации кормоуборочной техники, аттестации и проверке знаний персонала, обслуживающего процесс уборки кормов (комбайнеры, инженерно-технические работники), проведен по данным службы охраны труда агропредприятий. Для опреде-

ления достоверности полученных данных использован метод сравнения среднеарифметических и относительных значений эмпирических совокупностей.

Факторы риска, связанные с действиями персонала, участвующего в проведении технологического процесса кормоуборки (таблица 1), влияют на простои и отказы кормоуборочного комбайна в процессе его эксплуатации. При этом простои кормоуборочных комбайнов формально могут быть вызваны как техническими причинами, так и действием самих работников.

Таблица 1 – **Факторы риска при эксплуатации кормоуборочных комбайнов, связанные с действиями персонала**

Группа факторов риска	Категория работников
Опасности, связанные с впервые принятыми на работу	Комбайнеры
	ИТР, ответственные за организацию эксплуатации кормоуборочных комбайнов
Опасности, связанные с работниками, показавшими неудовлетворительные результаты при проверке знаний	Комбайнеры
	ИТР, ответственные за организацию эксплуатации кормоуборочных комбайнов
Опасности, связанные с работниками, отстраненными от работы по результатам производственного контроля (ПК)	Комбайнеры
	ИТР, ответственные за организацию эксплуатации кормоуборочных комбайнов

Для определения риска простоя кормоуборочного комбайна как по техническим причинам (P_1), так и связанного с действиями персонала, участвующего в организации и эксплуатации кормоуборочных комбайнов (P_2), а также риска появления их отказов (P_3) рассматривалось влияние на эти процессы таких предикторов, как количество впервые принятых на работу комбайнеров и ИТР; работников из этих категорий, показавших неудовлетворительные результаты при проверке знаний для комбайнеров и аттестации для ИТР, количество отстраненных комбайнеров и ИТР от работы по результатам производственного контроля (ПК). Решение поставленных задач, выполненное с использованием метода логистического регрессионного анализа и программного комплекса [14–15], позволило получить следующую совокупность зависимостей (1–18):

1. Для риска (P_1) простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам в зависимости от предикторов $x_1 \ldots x_6$:

$$P_1 = \frac{\exp(0,71 + 0,52x_1)}{(1 + \exp(0,71 + 0,52x_1))}, \quad (1)$$

где x_1 – число впервые принятых на работу комбайнеров, $N_{\text{в. п. к}}/N_{\text{к}}$; хи-квадрат = 66,91; $p \leq 0,001$;

$$P_1 = \frac{\exp(0,99 + 7,55x_2)}{(1 + \exp(0,99 + 7,55x_2))}, \quad (2)$$

где x_2 – число комбайнеров, показавших неудовлетворительные результаты при проверке знаний $N_{\text{н. к}}/N_{\text{к}}$; хи-квадрат = 56,14; $p \leq 0,001$;

$$P_1 = \frac{\exp(1,04 + 2,77x_3)}{(1 + \exp(1,04 + 2,77x_3))}, \quad (3)$$

где x_3 – число комбайнеров, отстраненных от работы по результатам ПК, $N_{\text{о. к}}/N_{\text{к}}$; хи-квадрат = 39,37; $p \leq 0,001$;

$$P_1 = \frac{\exp(0,42 + 2,92x_4)}{(1 + \exp(0,42 + 2,92x_4))}, \quad (4)$$

где x_4 – число впервые принятых на работу ИТР, $N_{\text{в. п. и}}/N_{\text{и}}$; хи-квадрат = 95,04; $p \leq 0,001$;

$$P_1 = \frac{\exp(1,05 + 5,23x_5)}{(1 + \exp(1,05 + 5,23x_5))}, \quad (5)$$

где x_5 – число ИТР, показавших неудовлетворительные знания при аттестации $N_{а.\ и}/N_и$; хи-квадрат = 41,20; $p \leq 0,001$;

$$P_1 = \frac{\exp(1,20 + 3,44x_6)}{(1 + \exp(1,20 + 3,44x_6))}, \quad (6)$$

где x_6 – число ИТР, отстраненных от работы по результатам ПК, $N_{о.\ и}/N_и$; хи-квадрат = 13,32; $p \leq 0,001$.

2. Для риска (P_2) простоя кормоуборочного комбайна, обусловленного действиями персонала в зависимости от предикторов $x_1 \ldots x_6$:

$$P_2 = \frac{\exp(-2,98 + 0,37x_1)}{(1 + \exp(-2,98 + 0,37x_1))}, \quad (7)$$

где хи-квадрат = 14,93; $p \leq 0,001$;

$$P_2 = \frac{\exp(-2,52 + 1,75x_2)}{(1 + \exp(-2,52 + 1,75x_2))}, \quad (8)$$

где хи-квадрат = 12,04; $p \leq 0,001$;

$$P_2 = \frac{\exp(-2,60 + 1,74x_3)}{(1 + \exp(-2,60 + 1,74x_3))}, \quad (9)$$

где хи-квадрат = 13,67; $p \leq 0,001$;

$$P_2 = \frac{\exp(-2,01 + 0,62x_4)}{(1 + \exp(-2,01 + 0,62x_4))}, \quad (10)$$

где хи-квадрат = 12,24; $p \leq 0,001$;

$$P_2 = \frac{\exp(-2,40 + 1,93x_5)}{(1 + \exp(-2,40 + 1,93x_5))}, \quad (11)$$

где хи-квадрат = 16,72; $p \leq 0,001$;

$$P_2 = \frac{\exp(-1,88 + 1,92x_6)}{(1 + \exp(-1,88 + 1,92x_6))}, \quad (12)$$

где хи-квадрат = 17,08; $p \leq 0,001$.

3. Для риска (P_3) появления отказа кормоуборочного комбайна в зависимости от предикторов $x_1 \ldots x_6$:

$$P_3 = \frac{\exp(1,79 + 0,30x_1)}{(1 + \exp(1,79 + 0,30x_1))}, \quad (13)$$

где хи-квадрат = 13,55; $p \leq 0,001$;

$$P_3 = \frac{\exp(1,84 + 5,09x_2)}{(1 + \exp(1,84 + 5,09x_2))}, \quad (14)$$

где хи-квадрат = 23,44; $p \leq 0,001$;

$$P_3 = \frac{\exp(1,76 + 3,95x_3)}{(1 + \exp(1,76 + 3,95x_3))}, \quad (15)$$

где хи-квадрат = 30,50; $p \leq 0,001$;

$$P_3 = \frac{\exp(1,71 + 1,33x_4)}{(1 + \exp(1,71 + 1,33x_4))}, \quad (16)$$

где x_4 – число впервые принятых на работу ИТР, $N_{\text{в. п. и}}/N_{\text{и}}$; хи-квадрат = 19,86; $p \le 0,001$;

$$P_3 = \frac{\exp(1,14 + 9,06x_5)}{1 + \exp(1,14 + 9,06x_5)}, \quad (17)$$

где хи-квадрат = 32,25; $p \le 0,001$;

$$P_3 = \frac{\exp(1,86 + 12,47x_6)}{(1 + \exp(1,86 + 12,47x_6))}, \quad (18)$$

где хи-квадрат = 42,04; $p \le 0,001$.

Для удобства пользования сравнительной оценкой производственных рисков при эксплуатации кормоуборочных комбайнов, связанных с их техническим состоянием и действием персонала, участвующего в организации и проведении технологического процесса кормоуборки, произведено табулирование (таблицы 2–7) полученных расчетных зависимостей (1–18).

Таблица 2 – **Зависимость риска простоя и отказов кормоуборочных комбайнов от числа впервые принятых на работу комбайнеров**

Риски и причины	Число вновь принятых на работу комбайнеров									
Риск простоя и отказов кормоуборочного комбайна, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам (P_1)	66,95	77,32	85,15	90,61	94,20	96,47	97,87	98,72	99,24	99,55
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (P_2)	4,84	6,86	9,65	13,41	18,33	24,55	32,05	40,61	49,78	58,96
Риск отказов кормоуборочного комбайна (P_3)	85,62	88,97	91,62	93,67	95,25	96,45	97,36	98,03	98,54	98,92

Таблица 3 – **Зависимость риска простоя и отказов кормоуборочных комбайнов от числа комбайнеров, показавших неудовлетворительные результаты при проверке знаний**

Риски и причины	Число комбайнеров, показавших неудовлетворительные результаты при проверке знаний									
Риск простоя и отказов кормоуборочного комбайна, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам (P_1)	72,84	85,89	92,39	96,27	98,21	99,15	99,6	99,81	99,91	99,96
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (P_2)	7,46	8,76	10,25	11,98	13,94	16,17	18,68	21,47	24,56	27,93
Риск отказов кормоуборочного комбайна (P_3)	86,26	91,26	94,56	96,65	97,96	98,76	99,25	99,55	99,73	99,84

Таблица 4 – **Зависимость риска простоя и отказов кормоуборочных комбайнов от числа комбайнеров, отстраненных от работы по результатам ПК**

Риски и причины	Число комбайнеров, отстраненных от работы по результатам ПК									
Риск простоя и отказов кормоуборочного комбайна, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам (P_1)	73,92	78,9	83,15	86,69	89,58	91,9	93,74	95,18	96,31	97,18
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (P_2)	6,96	8,18	9,58	11,19	13,01	15,13	17,5	20,15	23,08	26,31
Риск отказов кормоуборочного комбайна (P_3)	85,33	89,62	92,76	95,00	97,57	97,67	98,41	98,93	99,27	99,51

Таблица 5 – **Зависимость риска простоя и отказов кормоуборочных комбайнов от числа впервые принятых на работу ИТР, ответственных за организацию эксплуатации комбайнов**

Риски и причины	Число ИТР, впервые принятых на работу									
Риск простоя и отказов кормоуборочного комбайна, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам (P_1)	60,28	73,13	83,00	89,75	94,01	96,57	98,06	98,91	99,39	99,66
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (P_2)	11,83	13,19	14,69	16,32	18,09	20,02	22,09	24,31	26,67	29,18
Риск отказов кормоуборочного комбайна (P_3)	84,64	87,78	90,36	92,43	94,09	95,4	96,44	97,24	97,87	98,36

Таблица 6 – **Зависимость риска простоя и отказов кормоуборочных комбайнов от числа ИТР, ответственных за организацию их эксплуатации, показавших неудовлетворительные результаты при аттестации**

Риски и причины	Число ИТР, показавших неудовлетворительные результаты при аттестации									
Риск простоя и отказов кормоуборочного комбайна, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам (P_1)	76,86	96,86	92,94	96,32	98,12	99,05	99,52	99,76	99,88	99,94
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (P_2)	7,90	10,22	13,46	16,87	22,08	24,62	28,06	31,65	33,84	35,68
Риск отказов кормоуборочного комбайна (P_3)	80,49	83,27	85,00	85,27	86,39	88,19	91,38	97,65	98,03	98,46

Таблица 7 – **Зависимость риска простоя и отказов кормоуборочных комбайнов от числа ИТР, ответственных за организацию их эксплуатации, отстраненных от работы по результатам ПК**

Риски и причины	Число ИТР, отстраненных от работы по результатам ПК									
Риск простоя и отказов кормоуборочного комбайна, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам (P_1)	74,09	78,78	82,82	86,23	89,05	91,35	92,20	94,68	95,86	96,78
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (P_2)	13,28	14,42	15,65	16,96	18,36	19,84	21,41	23,08	24,82	26,66
Риск отказов кормоуборочного комбайна (P_3)	86,48	92,27	95,7	97,65	98,73	99,31	99,63	99,80	99,89	99,94

В процессе анализа статистических данных определено и совместное влияние предикторов на уровень риска возникновения простоя и отказов кормоуборочных комбайнов. Полученные при этом уравнения логистической зависимости позволяют рассчитать:

– риск (P_4) простоя кормоуборочного комбайна, обусловленный числом впервые принятых на работу комбайнеров (x_1) и тех комбайнеров, кто показал неудовлетворительные результаты при проверке знаний (x_2):

$$P_4 = \frac{\exp(-2,91 + 0,27x_1 + 0,86x_2)}{(1 + \exp(-2,91 + 0,27x_1 + 0,86x_2))}, \quad (19)$$

где хи-квадрат = 16,88; $p \leq 0,01$;

– риск (P_5) простоя кормоуборочного комбайна из-за отказов его приборов и устройств безопасности, электрооборудования, обусловленный числом впервые принятых на работу, соответственно, комбайнеров (x_1) и ИТР (x_4):

$$P_5 = \frac{\exp(-0,93 + 0,23x_4 + 0,05x_1)}{(1 + \exp(-0,93 + 0,23x_4 + 0,05x_1))}, \quad (20)$$

где хи-квадрат = 6,52; $p \leq 0,05$;

– риск (P_6) простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам, обусловленный числом ИТР, занятых организацией эксплуатации кормоуборочных комбайнов и впервые принятых на работу ИТР:

$$P_6 = \frac{\exp(-1,25 + (-0,19)x_7 + 0,40x_4)}{(1 + \exp(-1,25 + (-0,19)x_7 + 0,40x_4))}, \quad (21)$$

где x_7 – число ИТР, занятых организацией эксплуатации кормоуборочных комбайнов; хи-квадрат = 10,02; $p \leq 0,01$.

Табулирование полученных зависимостей (19–21) приведено в таблице 8–10.

Таблица 8 – **Зависимость риска простоя кормоуборочных комбайнов от числа впервые принятых на работу комбайнеров и комбайнеров, показавших неудовлетворительные результаты при проверке знаний**

Число комбайнеров с неудовлетворительным результатом	Число впервые принятых на работу комбайнеров					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Риск простоя кормоуборочного комбайна по персоналу (комбайнерам), %						
1,0	11,34	14,25	18,71	22,08	28,12	33,60
0,8	10,17	12,66	16,50	20,91	24,38	29,17
0,6	8,66	11,83	14,21	17,09	21,84	26,51
0,4	7,08	9,17	12,48	15,37	18,09	23,46
0,2	6,55	8,03	10,24	13,31	16,45	20,05
0	5,19	7,38	9,22	11,58	14,34	17,81

Таблица 9 – **Зависимость риска появления отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочных комбайнов от впервые принятых комбайнеров и ответственных за организацию эксплуатации комбайнов ИТР**

Число впервые принятых на работу комбайнеров	Число впервые принятых на работу ИТР					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Риск отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна, %						
1,0	34,72	39,80	45,47	50,18	56,24	62,11
0,8	33,65	38,40	43,92	49,72	55,31	60,08
0,6	32,16	37,22	42,40	48,93	54,52	59,63
0,4	30,09	36,28	41,11	47,28	52,24	58,36
0,2	29,10	34,47	40,29	45,16	51,83	57,09
0	28,34	33,86	39,10	44,68	50,29	56,37

Таблица 10 – **Зависимость риска простоя кормоуборочных комбайнов по техническим причинам от общего числа ИТР, занятых организацией эксплуатации кормоуборочных комбайнов и впервые принятых на работу ИТР**

Число впервые принятых на работу ИТР	Всего ИТР, занятых организацией эксплуатации кормоуборочных комбайнов					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Риск простоя кормоуборочного комбайна по техническим причинам, %						
1,0	44,08	42,26	39,45	37,10	35,84	33,24
0,8	39,36	37,65	35,11	32,00	30,57	28,06
0,6	34,85	32,19	30,06	28,19	26,21	25,91
0,4	30,56	28,49	26,38	24,27	23,80	21,70
0,2	26,38	24,26	22,51	21,63	19,76	18,94
0	22,74	21,80	19,69	18,83	16,58	15,00

Результаты анализа эксплуатации кормоуборочных комбайнов позволили выделить и наиболее характерные факторы (предикторы), влияющие на производственные риски, связанные с техническим состоянием комбайнов (количество текущих ремонтов по устранению отказов 2 и 3-й групп сложности, ремонтов с применением сварки) и др. Использование программного комплекса позволило выполнить логит-преобразование риска как одномерной величины, описываемой вероятностью (зависимости 22–24)) [1]:

– риск (P_7) отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна:

$$P_7 = \frac{\exp(1,54 + (-0,47)x_8}{(1 + \exp(1,54 + (-0,47)x_8))}, \quad (22)$$

где x_8 – количество текущих ремонтов за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна; хи-квадрат = 24,98; $p \leq 0,001$,

– риск (P_8) отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна:

$$P_8 = \frac{\exp(0,32 + (-0,35)x_8}{(1 + \exp(0,32 + (-0,35)x_8))}, \quad (23)$$

где хи-квадрат = 15,35; $p \leq 0,001$;

– риск (P_9) отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна:

$$P_9 = \frac{\exp(-0,29 + 0,24x_9)}{(1 + \exp(-0,29 + 0,24x_9))}, \quad (24)$$

где x_9 – количество ремонтов с применением сварки за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна; хи-квадрат = 24,76; $p \leq 0,001$;

– риск (P_{10}) возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, обусловленный продолжительностью работы комбайна в году [1]:

$$P_{10} = \frac{\exp(-0,69 + 0,14x_{10})}{(1 + \exp(-0,69 + 0,14x_{10}))}, \quad (25)$$

где x_{10} – продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году; хи-квадрат = 18,75; $p \leq 0,001$,

– риск (P_{11}) возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, обусловленный продолжительностью работы комбайна в году:

$$P_{11} = \frac{\exp(0,81 + 0,21x_{10})}{(1 + \exp(0,81 + 0,21x_{10}))}, \quad (26)$$

где хи-квадрат = 14,18; $p \leq 0,001$.

Для удобства практического использования полученных результатов (выражения (22–26)) выполнена табуляция расчетных зависимостей (таблицы 11–13).

Таблица 11 – **Зависимость риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна от количества текущих ремонтов**

Риски (P_7; P_8) возникновения отказов, %	Количество текущих ремонтов кормоуборочного комбайна, $N_т$									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Механизмы и элементы привода рабочих органов кормоуборочного комбайна	81,75	73,34	64,26	51,28	40,82	28,90	19,46	12,95	8,26	5,28
Приборы и устройства безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна	56,23	48,41	39,74	31,80	25,68	18,92	14,22	9,39	6,18	4,25

Примечание: составлено на основе [1].

Таблица 12 – **Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна от количества ремонтов с применением сварки**

Риск (P_9) возникновения отказов, (%)	Количество ремонтов с применением сварки за срок эксплуатации кормоуборочного комбайна, $N_с$												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Металлоконструкция кормоуборочного комбайна	18,3	47,84	53,8	58,41	64,77	70,29	75,03	78,70	83,30	86,12	88,23	91,17	92,96

Примечание: составлено на основе [1].

Таблица 13 – **Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, механизмов и элементов привода его рабочих органов от продолжительности работы комбайна в году**

Риски (P_{10}; P_{11}) возникновения отказов, %	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году ($N_г$), дн.					
	1	25	50	100	150	200
Металлоконструкция кормоуборочного комбайна	14,45	33,42	36,81	42,13	52,84	64,73
Механизмы и элементы привода рабочих органов кормоуборочного комбайна	27,42	71,30	78,00	81,24	84,22	86,12

Примечание: составлено на основе [1].

Используемый логистический метод регрессионного анализа также позволяет получить зависимости для расчета риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна при совместном действии предикторов, например:

– риск (P_{12}) возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом его эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 14):

$$P_{12} = \frac{\exp(0,94 + 0,005x_{10} + 0,16x_{11})}{(1 + \exp(0,94 + 0,005x_{10} + 0,16x_{11})}, \quad (27)$$

где x_{11} – режим эксплуатации кормоуборочного комбайна с подборщиком (первый), с жаткой для уборки трав (второй), с жаткой для уборки высокостебельных культур (третий), хи-квадрат = 13,20; $p \leq 0,001$.

Таблица 14 – **Зависимость риска возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна от режима его эксплуатации и продолжительности работы в году**

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году ($N_г$), дней					
	1	25	50	100	150	200
Риск возникновения отказов металлоконструкции кормоуборочного комбайна, %						
Первый	17	63	76	80	85	86
Второй	22	67	79	82	87	89
Третий	24	71	83	85	90	92

Примечание: составлено на основе [1].

– риск (P_{13}) возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица 15):

$$P_{13} = \frac{\exp(0,30 + 0,0005x_{10} + 0,15x_{11})}{(1 + \exp(0,30 + 0,0005x_{10} + 0,15x_{11}))}, \quad (28)$$

где хи-квадрат = 16,84; $p \leq 0,001$;

Таблица 15 – **Зависимость риска возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна от режима эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году**

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году ($N_г$), дней					
	1	25	50	100	150	200
Риск возникновения отказов механизмов и элементов привода рабочих органов кормоуборочного комбайна, %						
Первый	12	61	61	73	75	79
Второй	16	63	66	78	78	83
Третий	19	67	70	80	84	85

Примечание: Примечание: составлено на основе [1].

– риск (P_{14}) возникновения отказов приборов и устройств безопасности кормоуборочного комбайна, электрооборудования, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 16):

$$P_{14} = \frac{\exp(-0,06 + 0,0008x_{10} + 0,14x_{11})}{(1 + \exp(-0,06 + 0,0008x_{10} + 0,14x_{11}))}, \quad (29)$$

где хи-квадрат = 10,57; $p \leq 0,001$.

Таблица 16 – **Зависимость риска возникновения отказов приборов и устройств безопасности кормоуборочного комбайна, электрооборудования от режима эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году**

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году ($N_г$), дней					
	1	25	50	100	150	200
Риск возникновения отказов приборов и устройств безопасности, электрооборудования кормоуборочного комбайна, %						
Первый	17	46	48	49	54	56
Второй	19	49	52	52	58	59
Третий	22	56	55	57	61	62

Примечание: составлено на основе [1].

– риск (P_{16}) возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, обусловленный режимом эксплуатации и продолжительностью работы комбайна в году (таблица табуляции 17):

$$P_{15} = \frac{\exp(-2,97 + 0,002x_{10} + 0,30x_{11})}{(1 + \exp(-2,97 + 0,002x_{10} + 0,30x_{11}))}, \quad (30)$$

где хи-квадрат = 105,19; $p \leq 0,001$.

Таблица 17 – **Зависимость риска возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна от режима его эксплуатации и продолжительности работы комбайна в году**

Режим эксплуатации кормоуборочного комбайна	Продолжительность работы кормоуборочного комбайна в году ($N_г$), дней					
	1	25	50	100	150	200
Риск возникновения отказов питающе-измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, %						
Первый	6	18	28	36	51	66
Второй	8	26	36	48	63	84
Третий	11	33	46	60	81	92

Примечание: составлено на основе [1].

Приведенные таблицы (11–17) позволяют не только произвести количественную оценку риска возникновения отказов кормоуборочного комбайна, обусловленных действием разных предикторов и их сочетаний, но и упростить осуществление контроля расчетных значений различных его видов.

Для определения безопасности ($K_{Б_{Р_i}}$) выполнения отдельно взятой *i*-й технологической регулировки (устранения отказа) при эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ), в том числе кормоуборочных комбайнов, использовалась следующая формула [16]:

$$K_{Б_{Р_i}} = 1,5K_{П_{ik}} - 0,5K^2_{П_{ik}}, \quad (31)$$

где $K_{П_{ik}}$ – приспособленность МСХТ к безопасному выполнению технологического процесса во время эксплуатации МСХТ [16].

$$K_{\text{П}ik} = \frac{15{,}3S_{ik}^{l} - 17{,}4S_{ik} - S_{ik}^{m}}{176t}, \tag{32}$$

где S_{ik} – сумма баллов экспертной оценки показателей удобства, доступности и безопасности i-й технологической регулировки МСХТ; S_{ik}^{l} и S_{ik}^{m} – соответственно сумма квадратов и кубов баллов, выставленных экспертами за удобство, доступность и безопасность проведения i-й регулировки k-го технического средства; t – число показателей приспособленности i-й регулировки k-го технического средства.

Показатель травмирования (P_{Rik}) оператора МСХТ (комбайнера, тракториста-машиниста, водителя) при выполнении, например, i-й технологической регулировки при эксплуатации k-го технического средства, используемого в технологическом процессе, можно записать как $1 - K_{\text{БР}i}$. Тогда, с учетом выражения (31), а также показателя статистической вероятности выполнения за смену i-й регулировки k-го технического средства (p_{ik}) и коэффициента $K_{\text{п. с}}$, учитывающего влияние выполненной сверх установленного регламентом i-й регулировки при эксплуатации k-го технического средства на показатель травмирования оператора МСХТ, формула для определения $P_{R_{ik}}$ представлена следующим образом [16]:

$$P_{R_{ik}} = [1 - (1{,}5K_{\text{П}ik} - 0{,}5K_{\text{П}ik}^{2})]p_{ik}K_{\text{п.с}}. \tag{33}$$

Для определения прогнозного обобщенного показателя травмирования оператора МСХТ (производственного риска) $P_{R_{\text{т. с}}}$ с учетом ее приспособленности к выполнению технологического процесса в условиях изменяющегося параметра состояния производственной среды, антропометрических характеристик оператора МСХТ используется формула для расчета средней геометрической значений $P_{R_{i_1 k}}$:

$$P_{R\text{т. с}} = \sqrt[n]{P_{Ri1k} \cdot P_{Ri2k} \cdot \ldots \cdot P_{Rink}}, \tag{34}$$

где P_{Ri1k}, P_{Ri2k}…, P_{Rink} – производственный риск при выполнении i-й регулировки (устранения отказов) (i = 1; 2 …; n) при эксплуатации k-го технического средства в условиях изменяющихся параметров состояния производственной среды.

Показатель безопасности проведения технологических регулировок (устранения отказов) при эксплуатации технического средства в условиях изменяющегося параметра состояния производственной среды $P_{\text{т. р}}$ рассчитывается по формуле [16]

$$P_{\text{т. р}} = \prod_{k=1}^{m} P(A_k), \tag{35}$$

где m – количество технологических регулировок (отказов); $P(A_k)$ – вероятность безопасного выполнения технологической регулировки (устранения отказа) k-го технического средства [16]:

$$P(A_k) = 1 - P_{R\text{т. с}}.$$

Полученные аналитические зависимости (32–33) позволили с учетом данных травматизма в растениеводческой отрасли АПК обосновать количественные показатели уровня производственного риска (таблица 18) и разработать для их определения алгоритм, реализованный в компьютерной программе [17].

Предугадать сценарий и результат безопасного производства не всегда представляется возможным в силу множества неопределенностей человеческой, организационно-технической, экономической и социальной направленности. Принятие решения и управление безопасностью труда в таких случаях связано с вероятностной определенностью, т. е. с понятием риска, от особенностей которого во многом зависят применяемые методы оценки и управления риском. При этом существование остаточного риска обуславливается невозможностью с точностью до 100 % прогнозировать будущее. В тоже время риск имеет место только по отношению к будущему и неразрывно связан с прогнозированием и планированием, а значит, и с принятием решений

Таблица 18 – **Классификация происшествий по уровню производственного риска при возделывании сельскохозяйственных культур**

Уровень производственного риска	
Наименование уровня	Показатель уровня, % / травм за год
минимальный	до 14,0 / 1…5
предельный	14,0…29,9 / 6…11
значительный	30,0…46,9 / 12…17
угрожающий	47,0…63,9 / 18…23
катастрофический	64,0 и более / 24…37

Примечание: составлено на основе [1].

вообще. Кроме того, управление риском подразумевает реализацию последовательных действий, начиная со сбора предварительной информации об объекте исследования и заканчивая повторной оценкой после реализации выработанных корректирующих действий (рисунок 1).

Для управления производственным риском при эксплуатации МСХТ для растениеводческой отрасли АПК – выработке корректирующих действий по предотвращению повышения уровня производственного риска, необходимо:

– проанализировать полученные значения показателя приспособленности МСХТ к технологическим регулировкам ($K_{\text{Пт. с}}$) и безопасности их выполнения ($K_{\text{Б}pi}$);

– определить прогнозируемый показатель безопасности управления технологическим процессом при эксплуатации МСХТ ($K_{\text{Бпр}}$);

– рассмотреть с учетом полученных значений показателей ($K_{\text{Пт. с}}$; $K_{\text{Б}pi}$; $K_{\text{Бпр}}$) соответствие технического состояния МСХТ производственным условиям выполнения технологического процесса.

В случае несоответствия:

– определить показатель приспособленности МСХТ к безопасному выполнению технологических регулировок;

– обосновать безопасные режимы эксплуатации МСХТ.

Выработку корректирующих действий по предотвращению повышения уровня производственного риска при эксплуатации МСХТ рекомендуется осуществлять посредством моделирования технологического процесса, с учетом уточненного показателя приспособленности МСХТ к безопасному выполнению технологических регулировок (рисунок 2), интенсивности их выполнения и изменения параметра состояния производственной среды (таблица 19). Установлено, что даже при «хорошей приспособленности», например, технического средства к технологическим регулировкам ($K_{\text{Пт. с}} = 0{,}8$), но двукратном (с 15 до 30 раз) увеличении изменения состояния параметра производственной среды, показатель травмирования оператора МСХТ возрастает в 1,15 раз [16].

Для осуществления контроля производственного риска может использоваться пятиуровневый классификатор, шкалы которого рассчитываются с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона. Функция желательности является результатом наблюдений за реальными решениями экспертов в различных областях знаний и обладает такими полезными свойствами как непрерывность и монотонность. Кроме того, функция Харрингтона хорошо передает тот факт, что в областях желательностей, близких к 0 и 1, «чувствительность» предпочтений при принятии решений ниже, чем в срединной зоне.

Используя принцип аналогий, а также определение производственного риска в области безопасности труда как зоны нереализуемой полезности, в пределах которой существует возможность снижения или недополучения желаемого результата, т. е. величины обратной желательности, предложена шкала для контроля тех видов риска безопасности труда, которые не имеют строгого нормативного обоснования (таблица 20).

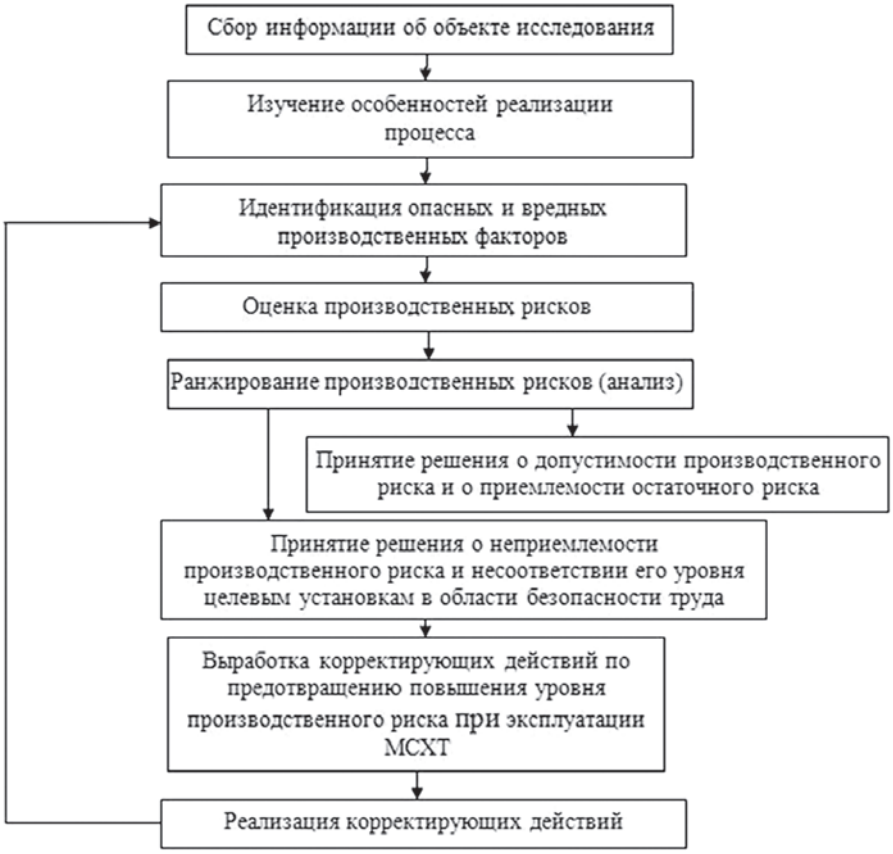


Рисунок 1 – Стратегия управления производственным риском при эксплуатации МСХТ [16]

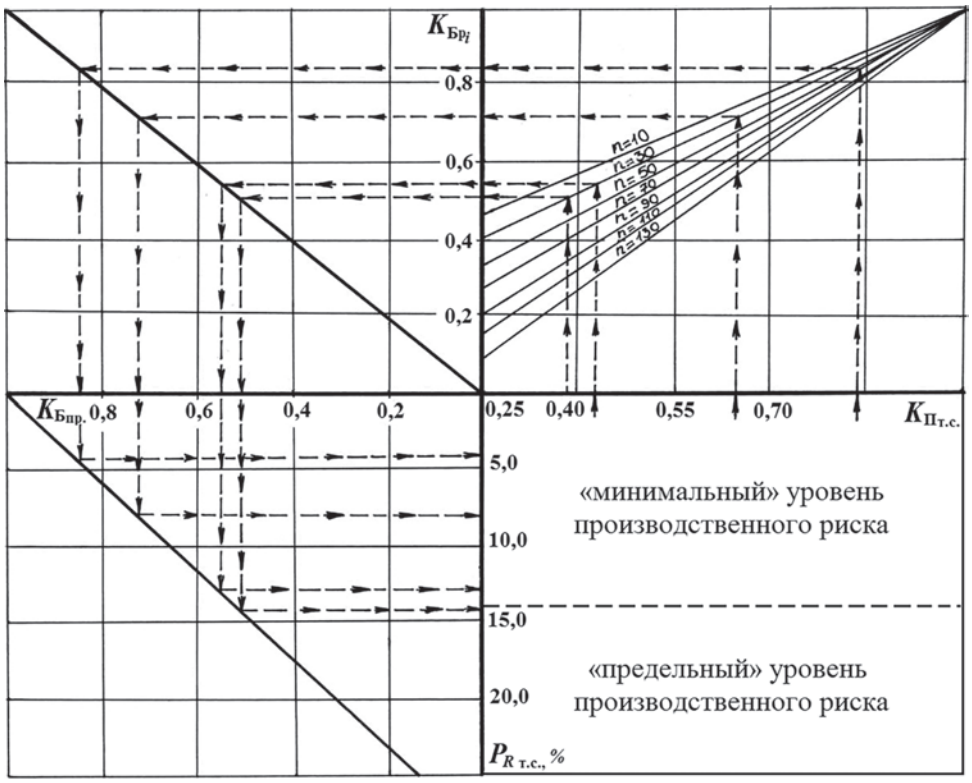


Рисунок 2 – Номограмма для оценки производственного риска с учетом интенсивности выполнения технологических регулировок при эксплуатации МСХТ

Таблица 19 – **Показатель травмирования оператора МСХТ при выполнении технологических регулировок с учетом изменения состояния параметра производственной среды**

Наименование показателя	Количество изменений за смену параметра состояния производственной среды, раз					
	5	10	15	20	25	30
Показатель травмирования ($P_{R_{т.с}}$) оператора МСХТ при выполнении технологических регулировок, %:						
при $K_{Пт.с} = 0,4$	12,10	12,60	13,10	13,60	14,20*	14,80*
$K_{Пт.с} = 0,6$	8,45	8,60	8,80	9,00	9,30	9,60
$K_{Пт.с} = 0,8$	3,34	3,38	3,48	3,63	3,80	4,00

Примечание: составлено на основе [16]. *Уровень производственного риска – «предельный».

Таблица 20 – **Шкалирование рисков безопасности труда с учетом функции желательности Харрингтона**

Наименование уровня желательности	Интервал шкалы желательности	Наименование уровня производственного риска	Интервал производственных рисков в области безопасности труда
очень хорошо	1–0,80	очень низкий	0–0,20
хорошо	0,79–0,64	низкий	0,21–0,36
удовлетворительно	0,63–0,37	средний	0,37–0,63
плохо	0,36–0,21	высокий	0,64–0,79
очень плохо	0,20–0	очень высокий	0,80–1

Как видно из таблицы 20, границе средних значений производственного риска соответствует величина 0,37. Средняя («седловая») точка, соответствующая величине производственного риска, равного 0,5, также не выходит за пределы удовлетворительной желательности и среднего его уровня, поскольку реализует принцип осторожности.

В заключении необходимо отметить те преимущества, которые имеет подход расчета и контроля производственных рисков, сочетающий получение регрессионных уровней различных видов производственных рисков с последующей табуляцией полученных с их помощью численных значений:

– возможность количественного прогноза риска отказов и простоев кормоуборочной техники, обусловленных действием различных трудно поддающихся оценке аспектов «человеческого фактора»;

– возможность учета синергетических эффектов от совместного действия нескольких факторов производственного риска как одинаковой, так и различной природы (относящихся к различным видам риска);

– возможность оперативной оценки производственного риска в условиях изменяющихся значений (колебаний) одного или нескольких факторов его обуславливающих;

– простоту применения полученного математического описания производственного риска, не требующего специальной подготовки, что позволяет использовать его не только специалистами (ИТР), занятыми контролирующими функциями, но и работниками первичного звена (операторами МСХТ);

– достоверность полученного математического описания производственного риска, подтвержденную общепринятыми статистическими критериями.

Выбор стратегии управления производственными рисками базируется на контроле достигнутых их уровней посредством трех- и пятиуровневых классификаторов (таблица 21). В частности, если контроль риска по пятиуровневому классификатору показывает, что его величина соизмерима с «очень низким» (или «низким» для трехуровневого классификатора) уровнем, то производственным риском можно пренебречь и дальнейшие шаги по его управлению необязательны. То есть в данном случае стратегией управления выступает «сохранение» (упразднение)

производственного риска. Если оцениваемый производственный риск находится на «среднем» уровне, то в качестве стратегии управления целесообразно выбрать его «уменьшение» (предотвращение), что предполагает реализацию мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия факторов и условий производственной среды на работающих.

Таблица 21 – **Уровни количественной оценки и контроля производственных рисков**

Уровни пятиуровневого классификатора	Стратегии управления производственным риском	Уровни трехуровневого классификатора	Стратегия управления производственным риском
очень низкий	сохранение	–	–
низкий	сохранение с частичным уменьшением	низкий	сохранение
средний	уменьшение	средней	уменьшение
высокий	уменьшение с частичной передачей	высокий	передача
очень высокий	передача	–	–

Если величина производственного риска по пятиуровневому классификатору может быть отнесена к «очень высокому» («высокому» для трехуровневого классификатора) уровню, то целесообразно реализовать стратегию передачи производственного риска посредством механизма страхования. Пятиуровневый классификатор позволяет также реализовать и смешанные стратегии управления производственным риском, если его величина находится в переходных областях «низкого» и «высокого» уровней, а уровень приемлемого производственного риска не должен превышать «низкий» уровень для обоих видов классификаторов. Также необходимо отметить, что реализуемыми на практике являются только две стратегии управления рисками – «уменьшение» и «передача».

Заключение

В результате проведенных исследований дана количественная оценка влияния различных предикторов и их сочетаний на производственные риски, приведена табуляция расчетных значений и стратегии управления производственными рисками.

Список использованных источников

1. Мисун, А. Л. Прогнозирование производственных рисков при эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники / А. Л. Мисун, А. В. Гаркуша // Вестник Полоцкого государственного университета. Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 1. – С. 29–32.
2. Системы менеджмента. Здоровье и безопасный путь профессиональной деятельности. Требования и руководство по применению : СТБ ISO 45001 ; введ. 25.02.2020. – Мн. : Госстандарт, 2020. – 32 с.
3. Пиуновский, И. И. Травматизм работников сельхозпредприятий при производстве продукции растениеводства / И. И. Пиуновский, А. В. Молош // Охрана труда. Сельское хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 91–97.
4. Гаранин, М. А. Корреляционное исследование влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма / М. А. Гаранин, А. М. Завьялов, Ю. В. Дементьева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – № 3. – С. 109–120.
5. Завьялов, А. М. Прогнозирование производственного травматизма на основе множественного регрессионного анализа / А. М. Завьялов, Ю. В. Дементьева, Д. Л. Раенок // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – № 2. – С. 36–50.
6. Левашов, С. П. Автоматизированная система оценки рисков профессионального травматизма работников сельскохозяйственного производства / С. П. Левашов // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 6. – С. 58–61.
7. Аксенов, В. А. Методический подход к анализу и прогнозированию рисков травмирования на рабочих местах в хозяйстве / В. А. Аксенов, А. М. Завьялов, Ю. В. Дементьева // Качество и жизнь. – 2018. – № 2. – С. 93–96.
8. Пять шагов оценки риска. – 2007. – URL: http://osha.europa.eu/eu/campaige hwi/about/material/rat 2007 (дата обращения: 26.11.2024).
9. Ворошилов, А. С. Оценка рисков травматизма / А. С. Ворошилов // Охрана и экономика труда. – 2015. – № 4. – С. 42–45.
10. Рискориентированный подход к управлению безопасностью и рисками / Г. З. Файнбург // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2016. – № 5. – С. 240–251.

11. Tanaka, K. Production risk management system with demand probability distribution / K. Tanaka, H. Akimoto, M. Inoue // Advanced Engineering Informatics. – 2012. – № 26. – С. 46–54.

12. Склеменов, Г. Ж. О процессе управления рисками / Г. Ж. Склеменов, С. А. Солод, В. В. Новиков // Охрана и экономика труда. – 2015. – № 1. – С. 45–48.

13. Соложенцев Е. Д. Технологии управления риском в структурно-сложных системах / Е. Д. Соложенцев. – СПб. : ГУАП, 2013. – 414 с.

14. Реброва, О. Ю. Статистический анализ данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA / О. Ю. Реброва. – М. : МедиаСфера, 2003. – 312 с.

15. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA: методология и технология современного анализа данных / В. П. Боровиков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2018. – 288 с.

16. Мисун, Ал-й Л. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК : монография / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2025. – 388 с.

17. Тестирование функционального состояния технического средства с учетом оценки его приспособленности к технологическим регулировкам и безопасности их выполнения: компьют. программа (свидетельство о госрегистрации № 1166) / А. Л. Мисун, В. В. Азаренко / Нац. центр интеллект. собственности Республики Беларусь, 2019.

УДК 631.158:658.3:519.8

Поступила в редакцию 17.07.2025
Received 17.07.2025

Ал-й Л. Мисун

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: LLM_90@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ БЕЗОПАСНЫХ ДВИЖЕНИЙ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация. Предложена математическая модель состояния опорно-двигательного аппарата тела человека при выполнении регулировочных технологических воздействий на техническое средство, дана оценка безопасности их выполнения с учетом антропометрических характеристик работника.

Ключевые слова: опорно-двигательный аппарат человека, технологическое воздействие на техническое средство, безопасность труда.

Al-i L. Misun

EI "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: LLM_90@mail.ru

MODELING OF TARGET-DIRECTED SAFE MOVEMENTS OF THE OPERATOR OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY WHEN PERFORMING ADJUSTMENT TECHNOLOGICAL INFLUENCES

Abstract. A mathematical model of the state of the human body's musculoskeletal system is proposed when performing technological adjustments to a technical device; an assessment of the safety of their implementation is given, taking into account the anthropometric characteristics of the worker.

Keywords: human musculoskeletal system, technological impact on technical equipment, labor safety.

Введение

Физический труд (ФТ) оператора мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) стимулирует обменные процессы в организме и сопровождается высокими энергозатратами. Например, выполнение регулировочных воздействий на техническое средство из-за затруднения использования механических устройств повышает энергозатраты: в положении сидя – на 5–10 %, в положении стоя – на 10–15 %, при вынужденной неудобной позе – на 40–50 % [1].

Основная часть

При разработке организационно-технических мероприятий по формированию комфортной производственной среды большое значение имеют антропометрические характеристики (АХ) работника (рисунок 1) – линейные, угловые, параметрические, которые используются для определения объема рабочих движений, зон досягаемости и видимости (таблица 1, рисунок 2).

Выбор размеров зон досягаемости определяется характером выполняемой технологической регулировки технического средства, параметрами используемого технологического приспособления (рабочего инструмента). Например, при необходимости дотянуться до узла рабочего органа МСХТ руководствуются минимальными размерами зон. Условием же для правильного выбора рабочей позы считается расположение проекции общего центра тяжести оператора МСХТ в пределах площади опоры. В полной мере этому соответствует рабочая поза «сидя» (рисунок 3, *б*). Если при прямой позе «сидя» энергозатраты принять за единицу, то при прямой позе

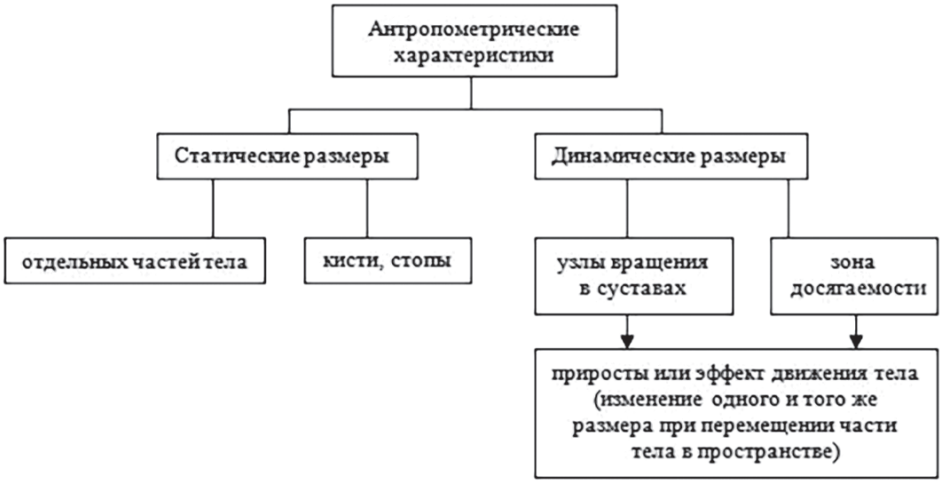


Рисунок 1 – Классификация антропометрических характеристик

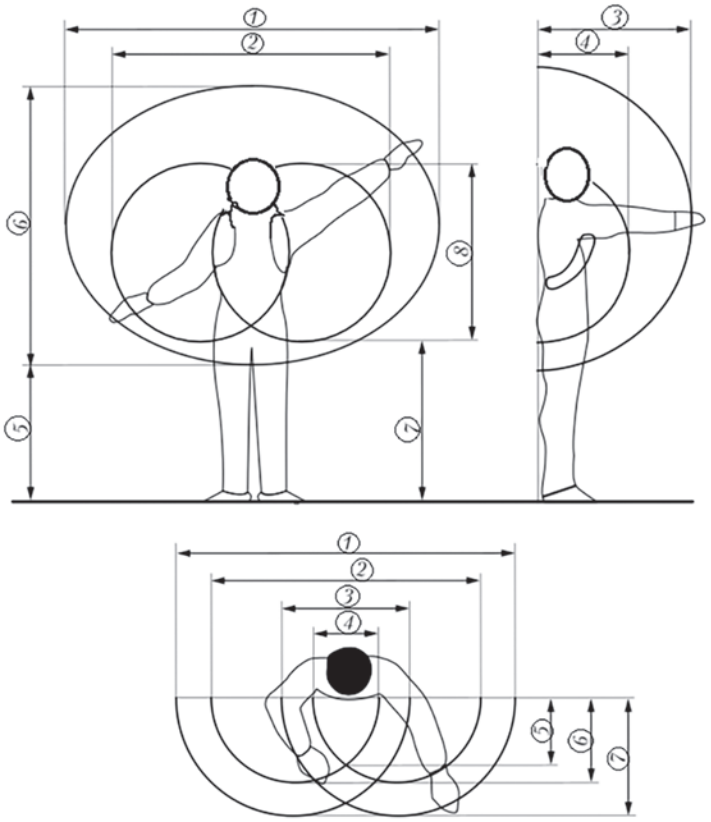


Рисунок 2 – Зоны досягаемости (1–8) рук человека в вертикальной и горизонтальной плоскостях [1]

«стоя» они составят уже 1,6 [1]. Исключить биомеханическую перегрузку у оператора МСХТ возможно при соответствии управляющего воздействия на технологическую регулировку технического средства биомеханическим возможностям оператора (таблица 2).

Рабочую зону, удобную для действия обеих рук, нужно обязательно совмещать с зоной, удобной для охвата человеческим взором (рисунок 4). По этому критерию зона 1 является самой благоприятной. Зоны 2 и 3 хорошо доступны для одной и мало доступны для другой руки, зрительный контроль осложнен. Зона 4 – труднодоступная. Зоны 5 и 6 доступны только для правой (левой) руки.

Таблица 1 – **Характеристика зоны досягаемости рабочих движений**

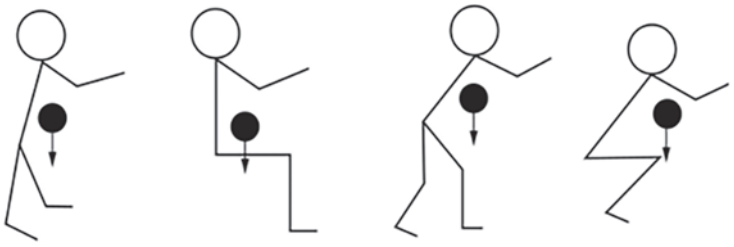
Зона досягаемости рабочих движений	Размеры зоны досягаемости рабочих движений, м			
	в вертикальной плоскости		в горизонтальной плоскости	
	для мужчин	для женщин	для мужчин	для женщин
1	1,55	1,40	1,55	1,37
2	1,35	1,10	1,35	1,10
3	0,80	0,73	0,72	0,66
4	0,50	0,43	0,24	0,20
5	0,70	0,63	0,24	0,20
6	1,40	1,26	0,33	0,30
7	0,77	0,68	0,55	0,48
8	0,80	0,72	–	–

Таблица 2 – **Соответствие управляющего воздействия на регулировку технического средства биомеханическим возможностям оператора МСХТ**

Биомеханические возможности оператора МСХТ	Кисть (сжатие динамометра), Н		Бицепс, Н		Кисть (сгибание), Н		Кисть (разгибание), Н		Стан (мышцы, выпрямление, согнутое туловище), Н
	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	
Мужчина	38,6	36,2	27,9	26,8	27,9	26,6	11,9	10,9	123,1
Женщина	22,5	20,04	13,6	13,0	21,7	20,07	9,0	8,3	71,0

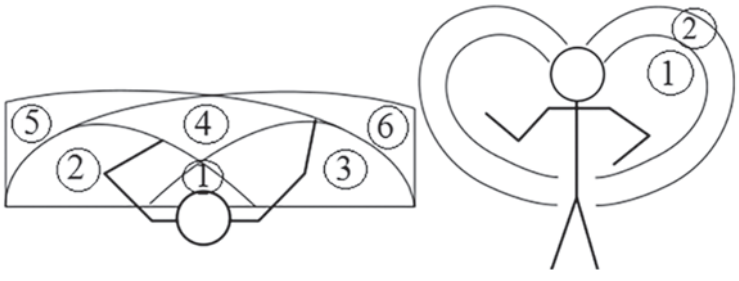
Для построения расчетной модели анализа движений оператора МСХТ при выполнении технологических регулировок рассмотрим кинематическую схему шестизвенной модели опорно-двигательного аппарата (ОДА) тела человека (рисунок 5), в которой стопа – первое звено, голень – второе, бедро – третье, туловище с головой – четвертое, плечо – пятое, предплечье (вместе с удерживаемым оператором рабочим инструментом) – шестое звено. На принятую модель наложены ограничения:

– звенья тела человека и рабочий инструмент считаются абсолютно твердыми телами;



а *б* *в* *г*

Рисунок 3 – Схемы биомеханического анализа рабочей позы «стоя» *(а, в)* и «сидя» (*б, г*) при устойчивой (*а, б*) и неустойчивой (*в, г*) позах [1]



а *б*

Рисунок 4 – Структурные схемы рабочих зон оператора МСХТ [1]:
а – при позе «сидя» в горизонтальной плоскости; *б* – при позе «стоя» в вертикальной плоскости

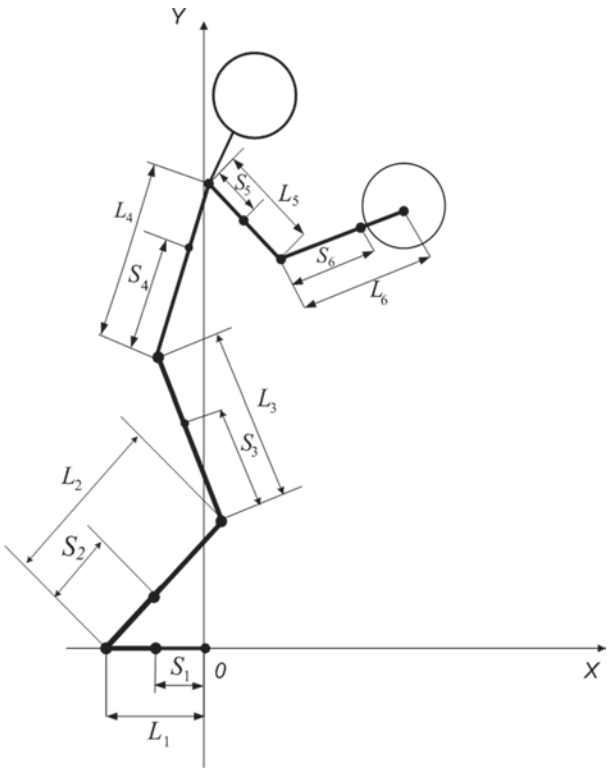


Рисунок 5 – Кинематическая схема шестизвенной модели ОДА тела человека [2]

– суставы, посредством которых звенья тела человека соединяются друг с другом, моделируются цилиндрическими шарнирами;

– трение в шарнирах отсутствует;

– центры масс (ЦМ) звеньев модели расположены на прямой, соединяющей их оси вращения в шарнирах (на продольной оси звена);

– распределение масс внутри каждого звена неизменно;

– масс-инерционные характеристики звеньев модели совпадают с соответствующими среднестатистическими параметрами сегментов тела работника.

Введем буквенную индексацию для обозначения номера звена:

L_i – длина i-го звена ($L_i = L_1, L_2, \ldots, L_N$); S_i – расстояние от оси вращения i-го звена до его ЦМ ($S_i = S_1, S_2, \ldots, S_N$); φ_i – угол наклона i-го звена тела человека к оси Ox (обобщенные координаты i-го звена) ($\varphi_i = \varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_N$); i – буквенный индекс, используемый для обозначения номера звена ($i = 1, 2, ..., N$); N – количество звеньев модели.

В кинематическом анализе движений биомеханических систем необходимы сведения [3–7] о пространственно-временных характеристиках (угловых скоростях и угловых ускорениях звеньев тела человека) и др. С этой целью введем обозначения для первой и второй производной по времени от обобщенных координат для N-звенной модели биомеханической системы: $\dot{\varphi}_i$ – угловая скорость i-го звена; $\ddot{\varphi}_i$ – угловое ускорение i-го звена.

В связи с тем, что за обобщенные координаты биомеханической системы приняты φ_i, то $\dot{\varphi}_i$ и $\ddot{\varphi}_i$ соответственно будут обозначать обобщенную скорость и обобщенное ускорение i-го звена.

Аналогично в буквенной индексации, распространяемой на N-звенную модель биомеханической системы, введем следующие идентификаторы для обозначения масс-инерционных характеристик звеньев биосистемы: P_i – вес i-го звена; m_i – масса i-го звена; J_i – центральный момент инерции i-го звена.

Для численной оценки развиваемых оператором МСХТ мышечных усилий при выполнении регулировочных воздействий использовался аналитический расчет значений управляющих моментов мышечных сил в суставах [2]. Для этого необходимы уравнения, описывающие ОДА оператора, в которых моменты мышечных сил будут входить в качестве параметров движения.

Рассмотрим естественное (без управляющих воздействий) движение N-звенной биомеханической системы, когда величина управляющих моментов мышечных сил на рассматриваемом участке траектории равна нулю. Такое движении относится к естественным движениям. Дифференциальные уравнения движения можно записать в форме уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{\partial t}\frac{\partial T}{\partial \varphi_m} - \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_m} = F_m, \tag{1}$$

где T – кинетическая энергия системы; φ_m – обобщенные координаты ($m = 1, ..., N$); $\dot{\varphi}_m$ – обобщенные скорости ($m = 1, ..., N$); F_m – обобщенные силы; N – число степеней свободы.

В качестве обобщенных координат принимаем углы наклона звеньев к оси Ox. Кинетическую энергию рассматриваемой биомеханической системы определим из выражения [8]

$$T = \frac{1}{2}\left[\sum_{i=1}^{n} A_{ij}\dot{\varphi}_i^2 + 2\sum_{i=1}^{N} A_{ij} \sum_{j=i+1}^{N} \dot{\varphi}_i \dot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i)\right], \tag{2}$$

где A_{ij} – элементы матрицы динамических коэффициентов размером $N{\cdot}M$, определяемых через значения масс-инерционных характеристик звеньев модели:

– массы звеньев m_i;

– длины звеньев L_i;

– расстояния до центров масс звеньев S_i;

– центральные моменты инерции звеньев J_i:

$$A_{ij} = \begin{cases} \delta_{ij}(J_i + m_i S_i^2) + m_i L_i S_i (1 - \delta_{ij}) + \sum\limits_{k=j+1}^{N} m_k L_i L_j, \; j \geq i, \\ A_{ij}, \;\; j < i \end{cases} \tag{3}$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, который определяется как

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j, \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$$

В рассматриваемой шестизвенной модели оператора МСХТ значения элементов матрицы определяются следующими выражениями:

$$\begin{gathered}
A_{1_1} = J_1 + m_1 S_1^2 + L_1^2(m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6); \\
A_{1_2} = m_2 L_1 S_2 + L_1 L_2(m_3 + m_4 + m_5 + m_6); \\
A_{1_3} = m_3 L_1 S_3 + L_1 L_3(m_4 + m_5 + m_6); \\
A_{1_4} = m_4 L_1 S_4 + L_1 L_4(m_5 + m_6); \\
A_{1_5} = m_5 L_1 S_5 + L_1 L_5 m_6; \\
A_{1_6} = m_6 L_1 S_6; \\
A_{2_2} = J_2 + m_2 S_2^2 + L_2^2(m_3 + m_4 + m_5 + m_6); \\
A_{2_3} = m_3 L_2 S_3 + L_2 L_3(m_4 + m_5 + m_6); \\
A_{2_4} = m_4 L_2 S_4 + L_2 L_4(m_5 + m_6); \\
A_{2_5} = m_5 L_2 S_5 + L_2 L_5 m_6; \\
A_{2_6} = m_6 L_2 S_6 + L_2 L_6; \\
A_{3_3} = J_3 + m_3 S_3^2 + L_3^2(m_4 + m_5 + m_6); \\
A_{3_4} = m_4 L_3 S_4 + L_3 L_4(m_5 + m_6); \\
A_{3_5} = m_5 L_3 S_5 + L_3 L_5 m_6; \\
A_{3_6} = m_6 L_3 S_6; \\
A_{4_4} = J_4 + m_4 S_4^2 + L_4^2(m_5 + m_6); \\
A_{4_5} = m_5 L_4 S_5 + L_4 L_5 m_6; \\
A_{4_6} = m_6 L_4 S_6; \\
A_{5_5} = J_5 + m_5 S_5^2 + L_5^2 m_6; \\
A_{5_6} = m_6 L_5 S_6; \\
A_{6_6} = m_6 L_6 S_6.
\end{gathered} \tag{4}$$

Подставив формулу (2) в выражение (1) и дифференцируя в (1) по времени обобщенные координаты и обобщенные скорости, получим формальное представление дифференциального уравнения Лагранжа:

$$\sum_{i=1}^{N} A_{ij}\,\ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \sum_{i=1}^{N} A_{ij}\dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) = F_v. \tag{5}$$

Правую часть уравнения движения определим на основании векторного равенства

$$F_v = \sum_{v=1}^{N} F_v \frac{\partial r_v}{\partial \varphi_i}, \tag{6}$$

где F_v – N-мерный вектор внешних сил, приложенный к ЦМ звеньев биомеханической системы; r_v – радиус-вектор ЦМ звеньев.

В декартовой системе координат с учетом уравнения на движение (6) определим обобщенные силы F_v

$$F_v = \sum_{v=i}^{N}\left[X_v \frac{\partial x_v}{\partial \varphi_i} + Y_v \frac{\partial y_v}{\partial \varphi_i} + Z_v \frac{\partial z_v}{\partial \varphi_i} \right]. \tag{7}$$

Так как внешней силой, приложенной к ЦМ звеньев тела, является сила тяжести, а X_v и Y_v равны нулю, то имеем следующее:

$$F_v = \sum_{v=i}^{N} Z_v \frac{\partial z_v}{\partial \varphi_i} = -\Big(\sum_{k=i+1}^{N} P_k L_i + P_i L_i \Big) \cos\varphi_i. \tag{8}$$

Введем обозначение

$$Y_i = \sum^{n} P_k L_i + P_i L_i. \tag{9}$$

Смысловые значения Y_i представляют собой выражение для определения обобщенных сил в уравнениях Лагранжа. Как следует из выражения (9) они определяются только масс-инерционными характеристиками звеньев тела. В частности, для шестизвенной биомеханической модели они имеют следующий вид:

$$\begin{gathered} Y_1 = P_1 S_1 + L_1 (P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6); \\ Y_2 = P_2 S_2 + L_2 (P_3 + P_4 + P_5 + P_6); \\ Y_3 = P_3 S_3 + L_3 (P_4 + P_5 + P_6); \\ Y_4 = P_4 S_4 + L_4 (P_5 + P_6); \\ Y_5 = P_5 S_5 + L_5 P_6; \\ Y_6 = P_6 S_6. \end{gathered} \tag{10}$$

Запишем выражение (9) в виде

$$F_i = -\sum_{i=1}^{N} Y \cos\varphi_i. \tag{11}$$

В компактной записи дифференциальные уравнения естественного движения N-звенной биомеханической модели имеют вид

$$\begin{gathered} \sum_{i=1}^{N} A_{ij}\,\ddot{\varphi}_j \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \sum_{i=1}^{N} A_{ij}\dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_j - \varphi_i) + Y_i \cos\varphi_i = 0, \\ i = 1,\ \ldots,\ N. \end{gathered} \tag{12}$$

Из выражения (12) видно, что количество уравнений, определяющих движение биомеханической системы, равно количеству ее степеней свободы или числу звеньев модели, а численное значение буквенного индекса i соответствует номеру уравнения в системе уравнений. Так, формульные выражения уравнений естественного движения неразветвленной шестизвенной модели биомеханической системы, представленные в форме уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид:

$$
\begin{aligned}
&A_{1_1}\ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1-\varphi_1)+A_{1_2}\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)+A_{1_3}\ddot{\varphi}_3\cos(\varphi_3-\varphi_1)+A_{1_4}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4-)+\\
&+A_{1_5}\ddot{\varphi}_5\cos(\varphi_5-\varphi_1)+A_{1_6}\ddot{\varphi}_6\cos(\varphi_6-\varphi_1)-A_{1_1}\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1-\varphi_1)-A_{1_2}\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)-\\
&-A_{1_3}\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3-\varphi_1)-A_{1_4}\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4-\varphi_1)-A_{1_5}\dot{\varphi}_5^2\sin(\varphi_5-\varphi_1)-A_{1_6}\dot{\varphi}_6^2\sin(\varphi_6-\varphi_1)+Y_1\cos\varphi_1=0,\\
&A_{2_1}\ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1-\varphi_1)+A_{2_2}\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)+A_{2_3}\ddot{\varphi}_3\cos(\varphi_3-\varphi_1)+A_{2_4}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4-\varphi_1)+\\
&+A_{2_5}\ddot{\varphi}_5\cos(\varphi_5-\varphi_1)+A_{2_6}\ddot{\varphi}_6\cos(\varphi_6-\varphi_1)-A_{2_1}\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1-\varphi_1)-A_{2_2}\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)-\\
&-A_{2_3}\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3-\varphi_1)-A_{2_4}\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4-\varphi_1)-A_{2_5}\dot{\varphi}_5^2\sin(\varphi_5-\varphi_1)-A_{2_6}\dot{\varphi}_6^2\sin(\varphi_6-\varphi_1)+Y_2\cos\varphi_2=0,\\
&A_{3_1}\ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1-\varphi_1)+A_{3_2}\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)+A_{3_3}\ddot{\varphi}_3\cos(\varphi_3-\varphi_1)+A_{3_4}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4-\varphi_1)+\\
&+A_{3_5}\ddot{\varphi}_5\cos(\varphi_5-\varphi_1)+A_{3_6}\ddot{\varphi}_6\cos(\varphi_6-\varphi_1)-A_{3_1}\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1-\varphi_1)-A_{3_2}\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)-\\
&-A_{3_3}\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3-\varphi_1)-A_{3_4}\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4-\varphi_1)-A_{3_5}\dot{\varphi}_5^2\sin(\varphi_5-\varphi_1)-A_{3_6}\dot{\varphi}_6^2\sin(\varphi_6-\varphi_1)+Y_3\cos\varphi_3=0,\\
&A_{4_1}\ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1-\varphi_1)+A_{4_2}\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)+A_{4_3}\ddot{\varphi}_3\cos(\varphi_3-\varphi_1)+A_{4_4}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4-\varphi_1)+\\
&+A_{4_5}\ddot{\varphi}_5\cos(\varphi_5-\varphi_1)+A_{4_6}\ddot{\varphi}_6\cos(\varphi_6-\varphi_1)-A_{4_1}\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1-\varphi_1)-A_{4_2}\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)-\\
&-A_{4_3}\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3-\varphi_1)-A_{4_4}\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4-\varphi_1)-A_{4_5}\dot{\varphi}_5^2\sin(\varphi_5-\varphi_1)-A_{4_6}\dot{\varphi}_6^2\sin(\varphi_6-\varphi_1)+Y_4\cos\varphi_4=0,\\
&A_{5_1}\ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1-\varphi_1)+A_{5_2}\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)+A_{5_3}\ddot{\varphi}_3\cos(\varphi_3-\varphi_1)+A_{5_4}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4-\varphi_1)+\\
&+A_{5_5}\ddot{\varphi}_5\cos(\varphi_5-\varphi_1)+A_{5_6}\ddot{\varphi}_6\cos(\varphi_6-\varphi_1)-A_{5_1}\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1-\varphi_1)-A_{5_2}\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)-\\
&-A_{5_3}\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3-\varphi_1)-A_{5_4}\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4-\varphi_1)-A_{5_5}\dot{\varphi}_5^2\sin(\varphi_5-\varphi_1)-A_{5_6}\dot{\varphi}_6^2\sin(\varphi_6-\varphi_1)+Y_5\cos\varphi_5=0,\\
&A_{6_1}\ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1-\varphi_1)+A_{6_2}\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2-\varphi_1)+A_{6_3}\ddot{\varphi}_3\cos(\varphi_3-\varphi_1)+A_{6_4}\ddot{\varphi}_4\cos(\varphi_4-\varphi_1)+\\
&+A_{6_5}\ddot{\varphi}_5\cos(\varphi_5-\varphi_1)+A_{6_6}\ddot{\varphi}_6\cos(\varphi_6-\varphi_1)-A_{6_1}\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1-\varphi_1)-A_{6_2}\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2-\varphi_1)-\\
&-A_{6_3}\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3-\varphi_1)-A_{6_4}\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4-\varphi_1)-A_{6_5}\dot{\varphi}_5^2\sin(\varphi_5-\varphi_1)-A_{6_6}\dot{\varphi}_6^2\sin(\varphi_6-\varphi_1)+Y_6\cos\varphi_6=0.
\end{aligned}
\tag{13}
$$

В уравнениях (13) коэффициенты A_{ij} характеризуют масс-инерционный и кинематический компоненты отдельных звеньев биомеханической системы: массы (m_i), момента инерции (J_i), длины (L_i) и положения ЦМ звеньев (S_i) на продольной оси звена. Таким образом, в численных значениях динамических коэффициентов звеньев биомеханической системы (A_{ij}) учитываются антропометрические особенности сегментов и звеньев ОДА тела работников.

Уравнения движения биомеханической системы, записанные в форме (12), являются уравнениями естественного движения без управляющих воздействий. Движения же работника являются целенаправленными, требующими пространства для их выполнения (например, регулировочных воздействий с учетом возможных опасных и вредных производственных факторов), и формируются при помощи особых мышечных сил, называемых управляемыми.

В математической форме учет управляющих воздействий мышечных сил на биомеханику движения заключается во введении в правую часть уравнений естественного движения управляющих моментов мышечных сил в суставах (M_i), записываемых для i-го уравнения системы (2.12) в виде алгебраической суммы слагаемых $M_i - M_{i+1}$, где

$$M_{i+1} \neq 0, \text{ если } i < N \text{ и } M_{i+1} = 0, \text{ если } i = N. \tag{14}$$

Включая алгебраическую сумму слагаемых (15) в правую часть уравнений (13), запишем уравнения целенаправленного движения N-звенной биомеханической системы в компактной форме

$$\sum_{i=1}^{N} A_{ij}\,\ddot{\varphi}_j\cos(\varphi_j-\varphi_i)-\sum_{i=1}^{N} A_{ij}\dot{\varphi}_i^2\sin(\varphi_j-\varphi_i)+Y_i\cos\varphi_i=M_i-M_{i+1}. \tag{15}$$

Уравнение (15) представляет собой базовую математическую модель движения рассматриваемой N-звенной биомеханической системы, она может быть использована как для анализа, так и для синтеза выполнения технологических воздействий на техническое средство.

Для обоснования оценочных показателей, например, удобства проведения технологической регулировки технического средства, использовался математический аппарат теории целенаправленной механики человека, поскольку тело человека можно моделировать в виде агрегата твердых тел (звеньев), связанных между собой при помощи как подвижных, так и неподвижных соединений. Положение рассматриваемой модели – руки человека, состоящей из трех звеньев («трехзвенник»), способной вращаться относительно оси *OZ* (рисунок 6), определяется углами ориентации звеньев «трехзвенника» в его плоскости, если точка *Д* (точка крепления опорного сустава «трехзвенника» к плечевому суставу) неподвижна или движется заранее заданным образом. В этом случае модель имеет четыре степени свободы с обобщенными координатами φ_1, φ_2, φ_3, ψ.

Уравнения связей позволяют описать девять координат (x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; x_3, y_3, z_3) центров масс звеньев длиной l_1, l_2, l_3, имитирующих, соответственно, плечо, предплечье и кисть «трехзвенника», в виде функций от четырех обобщенных координат, а также определить закономерности движения центров инерции (c_1, c_2, c_3) звеньев.

В результате проведенных исследований получены зависимости [10] для определения координаты ($x_Д$, $y_Д$, $z_Д$) точки крепления опорного сустава «трехзвенника» (руки) к плечевому суставу (надплечью), а также координаты (x_E, y_E, z_E) конечной точки «трехзвенника», принадлежащей звену, имитирующему кисть руки и находящемуся в положении после выполнения регулировки [10]:

$$\begin{cases} x_Д = x_1 + (l_1/2)\cos\varphi_1 \sin\psi; \\ y_Д = y_1 - (l_1/2)\cos\varphi_1 \cos\psi; \\ z_Д = z_1 - (l_1/2)\sin\varphi_1; \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} x_Е = x_Д - \left(l_1\cos\varphi_1 + l_2\cos\varphi_2 + (l_3/2)\cos\varphi_3\right)\sin\psi; \\ y_Е = y_Д + \left(l_1\cos\varphi_1 + l_2\cos\varphi_2 + (l_3/2)\cos\varphi_3\right)\cos\psi; \\ z_Е = z_Д + l_1\sin\varphi_1 + l_2\ \sin\varphi_2 + (l_3/2)\sin\varphi_3. \end{cases} \tag{17}$$

Результаты проведенных исследований позволяют оценивать область досягаемости *F i*-й технологической регулировки, предлагать рекомендации с точки зрения повышения удобства выполнения регулировочных работ с учетом физиологически возможных показателей положения туловища, руки, антропометрических характеристик работника и условий выполнения регулировочных работ [10]:

$$F\left(x_Е, y_Е, z_Е; x_Д, y_Д, z_Д\right) = \left[\sqrt{(x_Е - x_Д)^2 + (y_Е - y_Д)^2} - (l_1 + l_2 + l_3/2)\right] K_а K_{т.р}, \tag{18}$$

где $K_а$ – коэффициент, учитывающий антропометрические характеристики (таблица 3); $K_{т.р}$ – коэффициент, учитывающий условия выполнения технологической регулировки технического средства (таблица 4).

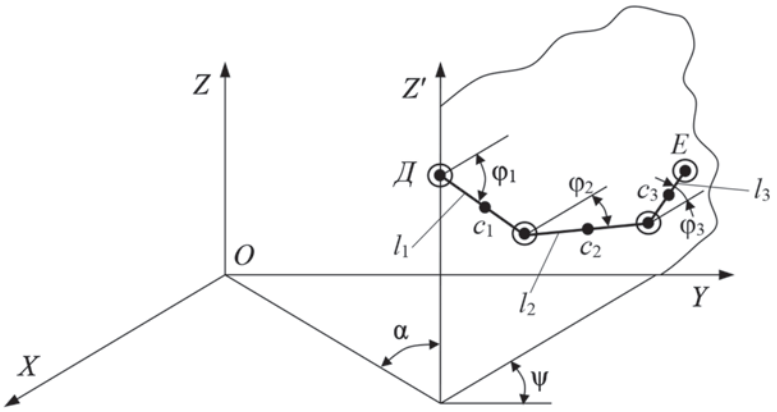


Рисунок 6 – «Трехзвенник» модели руки человека [9]

Таблица 3 – **Результаты исследований антропометрических характеристик работников**

Количество замеров	Группа роста	Длина, мм						Коэффициент $K_а$
		плечо		предплечье		кисть		
		мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины	
5	А	317	291	238	220	172	160	0,91
5	Б	331	295	251	227	177	168	0,91
5	В	335	301	254	236	182	173	0,92
5	Г	337	312	277	244	189	181	0,94
5	Д	340	319	280	251	199	191	0,92

П р и м е ч а н и е: составлено на основе [9].

Таблица 4 – **Исходные данные для оценки «удобства» выполнения технологической регулировки технического средства**

Положение тела оператора технического средства [11]	Положение рук	Коэффициент $K_{т.р}$	
		Оценка	
		в относительных единицах	баллах
1. Стоя или сидя	перед собой на уровне груди	1,0	5
2. Так же, как п. 1	над головой	0,8	4
3. Стоя или сидя с поворотом или наклоном туловища до 90°	то же, что в п. 1	0,8	4
4. В приседе	то же, что в п. 1	0,6	3
5. Так же, как п. 3	сбоку с изгибом, работа левой рукой	0,4	2
6. Стоя, в приседе или сидя с поворотом и наклоном туловища до 90°	то же, что в п. 1	0,4	2
7. Сидя, стоя подтягиваясь	над головой или сбоку	0,2	1
8. Работа с использованием дополнительных опор и др.	перед собой на уровне груди, сбоку, над головой	0,2	1

П р и м е ч а н и е: составлено на основе [9].

Область досягаемости для выполнения технологической регулировки технического средства оценивается в пять баллов (наивысший балл), если выполняется условие [10]

$$\left[\sqrt{(x_{\text{Е}}-x_{\text{Д}})^2+(y_{\text{Е}}-y_{\text{Д}})^2}-\left(l_1+l_2+l_3/2\right)\right]K_{\text{а}}K_{\text{т.р}}<0.$$

Четыре балла выставляется, если выполняется условие

$$\left[\sqrt{(x_{\text{Е}}-x_{\text{Д}})^2+(y_{\text{Е}}-y_{\text{Д}})^2}\right]K_{\text{а}}K_{\text{т.р}}=\left[\left(l_1+l_2+l_3/2\right)\right]K_{\text{а}}K_{\text{т.р}}.$$

Оценка три и менее баллов устанавливается, когда выполняется условие

$$\left[\sqrt{(x_{\text{Е}}-x_{\text{Д}})^2+(y_{\text{Е}}-y_{\text{Д}})^2}-\left(l_1+l_2+l_3/2\right)\right]K_{\text{а}}K_{\text{т.р}}>0.$$

Показатель безопасности проведения регулировочных работ $P_{\text{т.р}}$ определялся с учетом вероятности $P(A_k)$ нахождения оператора МСХТ в опасных зонах при выполнении технологических регулировок, наличия (отсутствия) дополнительных лестниц, подставок, другого вспомогательного оборудования [9], а также количества выполняемых технологических регулировок m и изменения параметра состояния производственной среды [10]:

$$P_{\text{т.р.}}=\prod_{k=1}^{m}P(A_k)=\prod_{k=1}^{m}P\left(1-P_{R_{\text{т.с}}}\right), \tag{19}$$

где $P_{R_{\text{т.с}}}$ – показатель риска травмирования оператора технического средства.

С учетом области досягаемости технологической регулировки, рассчитанных значений показателей удобства, доступности и безопасности ее выполнения определялась приспособленность технического средства к проведению регулировочных воздействий.

Заключение

Проведен анализ энергозатрат и антропометрических характеристик оператора МСХТ при выполнении регулировочных технологических воздействий. Предложена математическая модель состояния опорно-двигательного аппарата тела человека при выполнении регулировочных воздействий. Дана оценка удобства их выполнения, что позволяет прогнозировать безопасность производственной деятельности оператора МСХТ с учетом антропометрических характеристик и условий проведения регулировочных работ.

Список использованных источников

1. Каракеян, В. И. Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие / В. И. Каракеян, И. М. Никулина // М. : Юрайт-Издат, 2012. – 286 с.
2. Воронович, Ю. В. Биомеханика тяжелоатлетических упражнений : монография / Ю. В. Воронович, Д. А. Лавшук, В. И. Загревский. – Могилев : Институт МВД, 2014. – 196 с.
3. Mathematical high bar-human boody for analyzing and interpreting mechanical-energetic processes on the high bar / A. A. Arampatzis, G–P. Bruggemanna // Journal of Biomechanics. – 1998. – № 31. – P. 1083–1092.
4. Имитационное биомеханическое моделирование как метод изучения двигательных действий человека / А. В. Воронов // Теория и практика физической культуры. – 2004. – № 2. – С. 36–40.
5. Загревский, В. И. Модели анализа движений биомеханических систем / В. И. Загревский. – Томск : Томск. ун-т, 1990. – 124 с.
6. Коренев, Г. В. Введение в механику человека / Г. В. Коренев. – М. : Наука,1977. – 264 с.
7. Коренев, Г. В. Целенаправленная механика манипуляторов (научные основы робототехники) / Г. В. Коренев. – М. : Наука, 1979. – 448 с.
8. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация, теория вычислений и приложения / Р. Штойер. – М. : Наука, 1992. – 504 с.
9. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК : монография: / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Минск : Бел. гос. агр. техн. ун-т, 2025. – 388 с.
10. Мисун, Ал-й Л. Прогнозирование удобства выполнения технологических регулировок технических средств с учетом антропометрических характеристик работника и условий их проведения / Ал-й Л. Мисун // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 1. – С. 75–81.
11. Машины и тракторы сельскохозяйственные и лесные. Методы оценки приспособленности к техническому обслуживанию : ГОСТ 26026 – 83. – М. : Изд-во стандартов, 2015. – 10 с.

УДК 631.352.5, 633.522

Поступила в редакцию 28.10.2025
Received 28.10.2025

Д. Г. Фадеев, Д. А. Шишин, С. В. Прокофьев, Р. А. Попов, И. В. Великанова

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»
г. Тверь, Российская Федерация
E-mail: r.popov@fnclk.ru

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ЛУБЯНЫХ КУЛЬТУР

Аннотация. Статья посвящена вопросу разработки универсального технического средства для переработки и утилизации несеменной части урожая лубяных культур в полевых условиях в послеуборочный период.

Ключевые слова: лубяные культуры, несеменная часть урожая, измельчение, утилизация, измельчитель.

D. G. Fadeev, D. A. Shishin, S. V. Prokofiev, R. A. Popov, I.V. Velikanova

FSBSI "Federal Scientific Center of Bast Crops"
Tver, Russian Federation
E-mail: r.popov@fnclk.ru

JUSTIFICATION FOR THE DEVELOPMENT OF A SHREDDER FOR BAST CROP RESIDUES

Abstract. This article is devoted to the issue of developing a universal technical tool for processing and disposing of the non-seeded part of the bast crop in the field during the post-harvest period.

Keywords: bast crops, non-seeded part of the crop, crushing, disposal, shredder.

Введение

Одним из основных направлений устойчивого развития АПК России является рациональное использование и сохранение земель сельскохозяйственного назначения. Вместе с тем проблема их зарастания и засорения растительными остатками несеменной части урожая (НЧУ), которые скапливаются на полях годами и не подлежат дальнейшему использованию, остается особенно острой.

Возделывание лубяных культур также не является исключением. После уборки льна масличного, технической конопли на семена ежегодный объем остатков соломки составляет порядка 150 тыс. т [1]. Их приходится запахивать, утилизировать термическим путем, они медленно перегнивают и препятствуют проведению дальнейших агротехнических операций (осенняя вспашка, посев озимых и т. д.). Поэтому проблема переработки и утилизации несеменной части урожая лубяных культур – весьма актуальный вопрос, требующий решения.

Одним из инструментов решения данной проблемы представляется измельчение растительных остатков лубяных культур непосредственно в полевых условиях в послеуборочный период. Проведенный анализ показал, что скорость разложения НЧУ, эффективность накопления питательных веществ в почве напрямую зависят от степени измельчения растительных остатков, а их равномерное распределение создает влагосберегающий слой, защищающий почву от ветровой и водной эрозии [2]. В этой связи разработка универсального технического средства позволит решить данную проблему, имеющую важное практическое значение для отраслей льноводства и коноплеводства.

Основная часть

В ходе исследований и научных изысканий проведен анализ существующих отечественных и зарубежных измельчителей-разбрасывателей НЧУ, который показал, что применяемые в сельском хозяйстве мульчеры для измельчения кормовых трав и соломы зерновых культур крайне неэффективны при работе с лубяными культурами по причине содержания в структуре стеблей прочных лубяных волокон [3–6].

В результате системного анализа рабочих органов измельчителей в работе [3, 6] предложена классификация ножей-измельчителей по основным наиболее значимым конструктивным, технологическим и качественным признакам. Выявлено, что ножи для измельчения должны быть объемными, шарнирно закрепленные, обеспечивать разрушение стеблей в продольном и поперечном сечениях, иметь криволинейное лезвие противореза и комбинированную режущую часть ножа. Такой тип ножей позволит повысить эффективность и качество выполнения технологических операций и снизить энергоемкость всего процесса.

Процесс измельчения стеблей лубяных культур отличается от измельчения зерновых и зернобобовых культур. Поэтому были проведены дополнительные исследования по определению усилия резания на примере группы стеблей льна масличного в зависимости от фазы спелости семян [3]. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

Как видно из полученных данных, наибольшие усилия резания соответствуют стеблям масличного льна в полной фазе спелости семян. Это просматривается как на единичном 2,29 *Н*, так и на группах стеблей: 5,32 *Н* – для 6 стеблей и соответственно 10,1 *Н* – для 12 стеблей. Кроме этого, возрастание усилия резания прослеживается при изменении фазы спелости семян. При этом влажность стеблей уменьшается, т. е. происходит одревеснение стеблей и усилия резания увеличиваются на 45–125 %.

По результатам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ разработан и изготовлен опытный образец измельчителя растительных остатков лубяных культур (рисунок 2).

Основным рабочим органом машины является измельчающий ротор, на поверхности которого шарнирно закреплены спаренные объемные ножи. Конструктивное исполнение этого узла позволяет обеспечить сбалансированную работу ротора, высокую скорость измельчения и, что немаловажно, исключение намоток прочного лубоволокнистого материала. Кроме того, измельчитель оснащен копирующе-прикатывающим катком, что обеспечивает прикатывание и равномерное распределение измельченной массы по поверхности поля.

На рисунке 3 представлен измельчитель в агрегате с энергосредством. В качестве энергосредства используется трактор тягового класса 1,4. Измельчитель – навесная машина, изготовленная полностью из отечественных деталей и комплектующих, и представляется весьма конкурентоспособной разработкой. Ввиду отсутствия аналогов среди отечественных измельчителей, предназначенных именно для работы с лубяными культурами, машина имеет явное преимущество.

Технические характеристики разработанного измельчителя приведены в таблице.

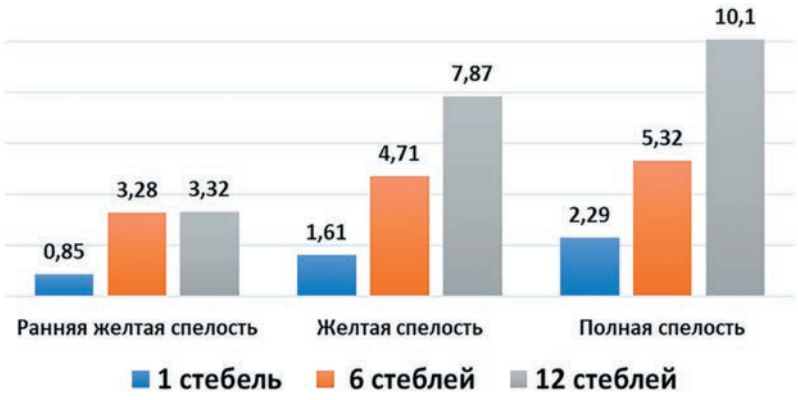


Рисунок 1 – Усредненные данные усилия резания (*Н*) стеблей льна масличного

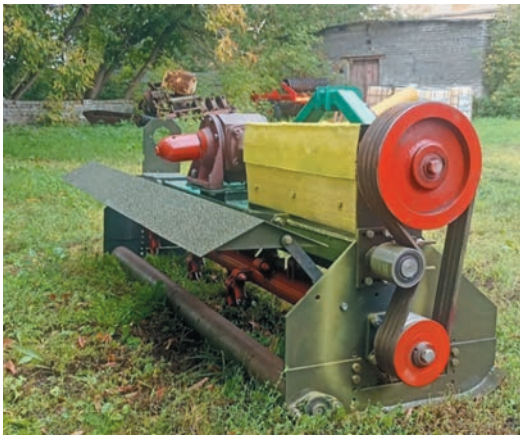


Рисунок 2 – Общий вид измельчителя растительных остатков лубяных культур



Рисунок 3 – Измельчитель растительных остатков лубяных культур в агрегате с трактором

Технические характеристики универсального измельчителя растительных остатков лубяных культур

Наименование параметра	Значение
Тип машины	Навесная
Схема навески	Задняя
Необходимая мощность трактора, л. с.	60–100
Привод	ВОМ трактора
Обороты ВОМ, об/мин	540
Производительность, га/ч	До 2
Рабочая скорость, км/ч	До 12
НЧУ перерабатываемых культур	Лен-долгунец, лен масличный, техническая конопля
Состояние стеблей (НЧУ)	– Прямостоящие (на корню); – полеглые; – валок; – лента
Ширина захвата, м	2
Частота вращения вала измельчителя, об/мин	2 000
Количество ножей, шт.	30
Привод вала измельчителя	Механический ременной
Количество ремней, шт.	4
Габаритные размеры Д × Ш × В, мм	2300 × 800 × 900
Масса, не более, кг	420

Апробация работы измельчителя проведена в октябре 2024 г. на опытных полях ФНЦ ЛК в Тверской области. Работа проводилась на льне сорта Универсал. По результатам апробации установлено, что разработанная машина обеспечивает качественное выполнение технологического процесса и требуемую степень измельчения, что также доказывает ее эффективность.

Заключение

По результатам проведенных исследований обоснована необходимость применения операции измельчения растительных остатков лубяных культур в полевых условиях. Разработан и апробирован опытный образец универсального технического средства для переработки растительной биомассы. Машина способна измельчать растительные остатки разных видов лубяных культур (льна, технической конопли), находящихся в различном состоянии, как оставшихся на корню, так и в виде валка или ленты. При этом сокращается количество технологических операций при их уборке, за счет этого достигается экономический эффект. Разработка универсального измельчителя позволит повысить эффективность процесса уборки лубяных культур, обеспечить очистку полей от неиспользованных растительных остатков и экологически безопасное производство.

Список использованных источников

1. Экономическое обоснование разработки универсального измельчителя растительных остатков лубяных культур / И. В. Великанова, Д. Г. Фадеев, С. В. Прокофьев, Д. А. Шишин // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 8. – С. 115–121.

2. Экологические и фитосанитарные функции почвенного органического вещества (проблемно-аналитический обзор) / М. С. Соколов, Ю. Я. Спиридонов, Е. Ю. Торопова [и др.] // Агрохимия. – 2018. – № 5. – С. 79–96.

3. Фадеев, Д. Г. К выбору типа измельчителя несеменной части урожая / Д. Г. Фадеев, Д. А. Шишин, С. В. Прокофьев // Наука в центральной России. – 2022. – № 6 (60). – С. 7–18.

4. Урамовский, Ю. М. Современная техника для измельчения пожнивных остатков / Ю. М. Урамовский, А. Д. Макуть // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. в 2 т. / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн., 2009. – Вып. 43. – Т. 2. – С. 26–31.

5. Ягельский, М. Ю. Тенденции развития и классификация соломо-измельчителей-разбрасывателей современных зерноуборочных комбайнов / М. Ю. Ягельский, С. А. Родимцев // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3 (60). – С. 73–87.

6. Фадеев, Д. Г. Анализ процесса измельчения несеменной части урожая лубяных культур / Д. Г. Фадеев, Д. А. Шишин, С. В. Прокофьев // Наука в центральной России. – 2023. – № 6 (66). – С. 53–61.

УДК 631.171:004

Поступила в редакцию 11.11.2025
Received 11.11.2025

А. Н. Алтыбаев

ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии» (НПЦАИ)
Казахстан, Алматы
E-mail: narikovich@yandex.ru

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Аннотация. Рассмотрена архитектура системного представления концепции повышения продуктивности (урожайности) растениеводства путем улучшения плодородия почвы за счет внесения удобрений. Проанализирована структурная эволюция подсистемы управления технологическим процессом в условиях оперативного времени, сформулированы требования к исполнительным механизмам дозатора, исходя из агротехнологических требований выполнения операции внесения удобрений. Обоснованы принципы функционирования автоматизированной системы дифференцированного дозирования сыпучих материалов. Разработан и апробирован алгоритм расчета управляющей (командной) информации на входе исполнительного механизма дозатора, который служит теоретической основой программного обеспечения точности и оперативности дифференцированного внесения удобрений в рамках концепции точного земледелия. Полученное аналитическое выражение представляет собой математическую модель зависимости управляющей (командной) информации от конструктивно-технических параметров применяемого средства механизации, технологических режимов выполнения работы, физико-механических характеристик сыпучих материалов, что создает предпосылки для реализации методически корректного математического обеспечения и позволяет вести имитационные вычислительные эксперименты на этапе проектирования автоматизированной системы. Результаты компьютерных исследований в табличной среде Excel показали надежность модели, адекватность поведения выходных переменных в зависимости входных факторов: так, увеличение нормы внесения удобрений и скорости прямолинейного движения агрегата сопровождается пропорциональным ростом величины управляющего параметра, т. е. числа оборотов на входе вала высевающего аппарата. Изменение удельного веса применяемого удобрения вносит изменения управляющей информации в обратной пропорциональности. Представлено инженерное решение по замене привода вала высевающего аппарата серийно выпускаемой посевной машины для автоматизации работы дозатора на основе GLONASS/GPS и GIS-технологий. Эксплуатационно-технологическое тестирование работоспособности экспериментального образца, проведенное на опытном поле при внесении минеральных удобрений, показало функциональную работоспособность автоматизированной системы в целом, а также подтвердило корректность принятых методологических предпосылок.

Ключевые слова: регулирование, управление, норма, дозатор, отклонения, параметр управляющий, обороты вала, привод, скорость.

A. N. Altybaev

LLP “Research and Production Center of Agroengineering” (SPCAE)
Almaty, Kazakhstan
E-mail: narikovich@yandex.ru

ALGORITHM FOR GENERATING CONTROL INFORMATION FOR AN AUTOMATED SYSTEM FERTILIZER APPLICATION

Abstract. The architecture of the systematic presentation of the concept of increasing productivity (yield) of crop production is presented by improving soil fertility through fertilization. The structural evolution of the process control subsystem under operating time conditions is analyzed, the requirements for the dispenser actuators are formulated based on the agrotechnological requirements for the fertilizer application operation. Principles of functioning of the automated system of differentiated batching of loose materials are substantiated. An algorithm for calculating control (command) information at the input of the dispenser actuator has been developed and tested,

which serves as the theoretical basis for the software for accuracy and efficiency of differentiated fertilization within the framework of the concept of precision farming. The obtained analytical expression is a mathematical model of dependence of control (command) information on structural and technical parameters of the used mechanization means, technological modes of operation, physical and mechanical characteristics of bulk materials, which creates prerequisites for the implementation of methodically correct mathematical support and makes it possible to conduct simulation computational experiments at the design stage of the automated system. The results of computer studies in the Excel tabular environment showed the reliability of the model, the adequacy of the behavior of the output variables depending on the input factors: for example, an increase in the rate of fertilization and the speed of rectilinear movement of the unit is accompanied by a proportional increase in the value of the control parameter, i.e. the number of revolutions at the input of the sowing apparatus shaft. Changing the specific gravity of the fertilizer used changes the control information in inverse proportion. An engineering solution for replacing the shaft drive of a sowing apparatus of a mass-produced sowing machine for automating the operation of a dispenser based on GLONASS/GPS and GIS-technologies is presented. Operational and technological testing of the performance of the experimental sample, carried out on the experimental field when adding mineral fertilizers, showed the functional performance of the automated system as a whole, and also confirmed the correctness of the adopted methodological prerequisites.

Keywords: regulation, control, norm, dosing unit, deviations, control parameter, shaft speed, drive, speed.

Введение

В условиях глобальной цифровой трансформации все аспекты социально-экономического развития переживают переходный период, связанный с переосмыслением устоявшихся канонов и представлений. Аграрный сектор, ведущей парадигмой которого определена технологическая модернизация сельскохозяйственного производства, не является исключением [1–3]. В свою очередь, реализация технологической модернизации реальных производственных процессов предполагает, что проектирование как технических средств, так и технологических процессов производства должно базироваться на широком внедрении результатов научных и научно-технических изысканий. Основной приметой наступления цифровой трансформации в области сельскохозяйственного производства следует считать принципы точного земледелия, реализуемого, в основном, программно-аппаратным инструментарием GLONASS/GPS и GIS-технологий [4–5]. В то же время следует понять, что принципы точного земледелия в большей степени направлены на совершенствование процессов управления на всех уровнях производства полевых механизированных работ в сельском хозяйстве. При этом сами производственно-технологические, т. е. рабочие процессы, во многом не претерпевают изменений принципиального порядка.

В этой связи наибольшую актуальность приобретают вопросы, касающиеся оперативного управления состоянием технологической работоспособности рабочих органов и исполнительных механизмов серийно выпускаемых машин и агрегатов сельскохозяйственного назначения.

Цель работы – совершенствование алгоритма расчета параметров управляющей подсистемы посевных агрегатов, оборудованных автоматизированной системой дифференцированного дозирования гранулированных удобрений.

Методика и материалы. Методологическим ориентиром служили: принципы системного подхода и аппарат системного анализа; приоритет агротехнологий; основные положения теоретической и прикладной информатики; методы (принципы) статистического и динамического моделирования. В качестве исходных материалов использовались информационные ресурсы в области инженерно-технологического обеспечения сельскохозяйственного производства, а также справочные данные, необходимые для проектирования технологических операций внесения удобрений.

Результаты исследований и обсуждение. Известно, что в стратегии устойчивого развития сельскохозяйственного производства важное место занимает концепция повышения продуктивности (урожайности) растениеводства путем улучшения плодородия почвы за счет внесения удобрений. Удобрения обеспечивают рост, развитие культур и высокую урожайность [6–7]. Современная система внесения удобрений представляет собой комплекс сложных процессов, взаимосвязанных в различных аспектах, и улучшение функционирования ее требует серьезного научно-методологического анализа, прежде всего, основных концептуальных положений технологи-

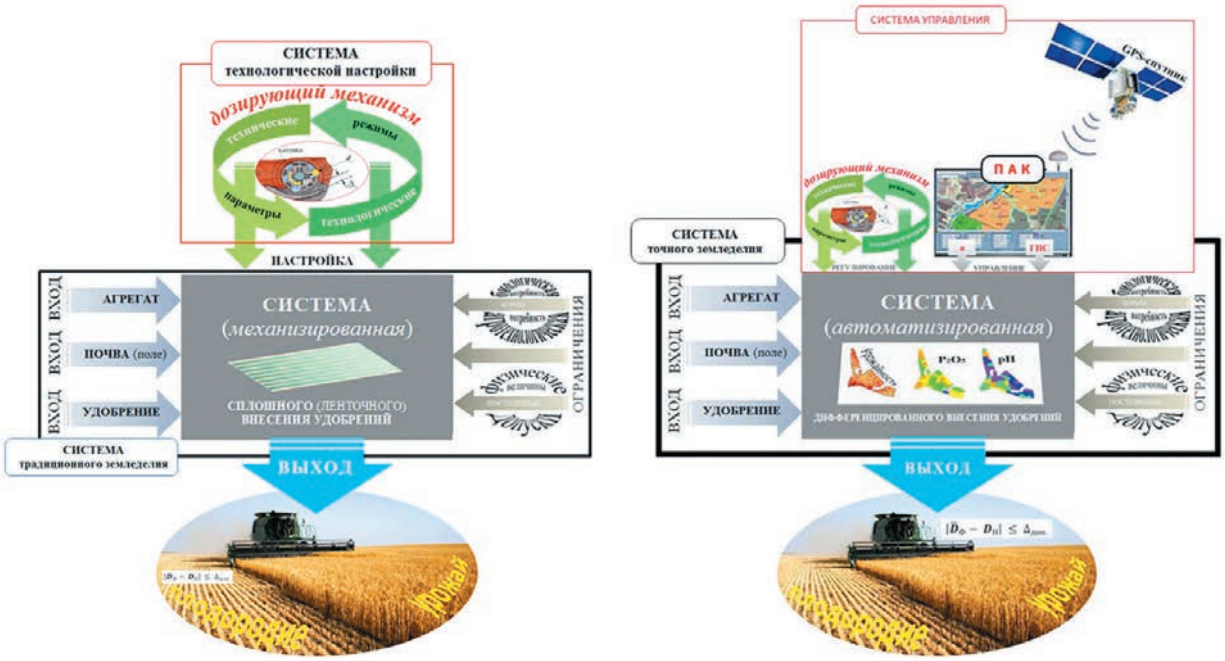


Рисунок 1 – Эволюция системы управления технологическим процессом при внесении удобрений

ческих процессов сельскохозяйственного производства. Упрощенная архитектура системного представления концепции восстановления структуры почвы и повышения ее качества с использованием удобрений в эволюции инженерно-технологического обеспечения технологической операции внесения удобрений показана на рисунке 1.

Из анализа представленной эволюции следует, что:

– традиционная система управления технологической операцией обеспечивает равномерность внесения удобрений по всей посевной площади, исходя из допущения, что потребность почвы в удобрениях также распределена равномерно. При этом управляющие воздействия ограничиваются предварительной настройкой перед началом выполнения технологической операции внесения удобрений [8–9], а оценка качества работы представляет собой констатацию факта. Таким образом, в традиционной системе отсутствует управление технологическими процессами в условиях оперативного времени;

– современная система точного земледелия ставит задачу о дифференцированном внесении удобрений для каждого элементарного участка обрабатываемой площади. При этом известные решения [10–11] в основном сосредоточены на определении пространственно-временных координат элементарных участков с различными потребностями в удобрениях, а вопросы обеспечения точности внесения, а вернее управления механизмом дозирования в условиях оперативного времени, решаются, исходя из логики измерения и манипулирования абстрактными сигналами, циркулирующими в программно-аппаратном модуле автоматизированной системы в целом, вне учета как физико-механических характеристик удобрений, так и конструктивно-технологических параметров исполнительных органов дозаторов, а также текущих технологических режимов выполнения работы агрегатом. Такое положение свидетельствует о том, что в настоящее время отсутствует понимание системных основ цифровой трансформации в области производства полевых механизированных работ;

– технологическая операция внесения удобрений, как составная часть общей агротехнологии возделывания и уборки сельскохозяйственных культур, представляет собой сложную систему, функционирование которой с позиции инженерно-технологического обеспечения может быть представлена как совокупность следующих существенных признаков и их взаимодействий.

Входные переменные: машинно-тракторный агрегат (МТА) с существенными признаками, выраженными эксплуатационно-технологическими показателями (паспортная производитель-

ность, рекомендуемая скорость движения, ширина захвата и др.) в данной постановке задачи; почвенные условия, представленные физико-механическими характеристиками почвы, размерами площадей обработки; посевные материалы (семена, удобрения), содержащие физико-механические характеристики, а также информацию о технологических качествах.

Ограничения: к ним относятся нормативно-технические регламенты, утвержденные, исходя из биологических, агротехнологических предпосылок, а также с учетом особенности машинных технологий.

Управляющие воздействия осуществляются предварительным регулированием (настройкой) исполнительных органов высевающего аппарата (длина катушки, зазор) и изменением технологического режима, т.е. числа оборотов вала высевающего аппарата в соответствии с поступающей управляющей информацией. Последняя формируется программно-аппаратным комплексом (ПАК), который функционирует на основе GLONASS /GPS и GIS-технологий, и обеспечивает дифференцированную подачу посевного материала в соответствии с агротехнологическими нормами в пространственно-временных координатах.

Выходным результатом, т. е. целевым предназначением исследуемого объекта, является обеспечение равномерного и точного распределения посевного материала в рамках агротехнических требований. Измерителем выходного результата функционирования посевного агрегата является показатель нахождения отклонений в пределах агротехнических требований, определяемый выражением

$$\left|\bar{D}_{\Phi} - D_{\text{Н}}\right| \le \Delta_{\text{доп}},$$

где $\bar{D}_{\Phi}$ – фактическое значение статистической характеристики качества выполнения технологической операции (посев семян, внесение удобрений), кг/га; $D_{\text{Н}}$ – нормативное значение внесения (посева), кг/га; $\Delta_{\text{доп}}$ – значение допускаемых отклонений от нормы (для семян – 5 %, для удобрений – 10 %).

В связи с вышеизложенным возникает необходимость сконструировать адекватную модель процесса, отражающую структуру и взаимодействия существенных признаков в данной постановке задачи для достижения оптимального функционирования путем определения (расчета) управляющей (командной) информации в каждый момент оперативного времени.

Для установления аналитических выражений элементов функционирования технологической системы внесения (посева) удобрений воспользуемся абстрактным представлением дозирующего механизма высевающего аппарата посевного агрегата и схемой механизированного (машинного) выполнения технологической операции внесения удобрений в соответствии с агротехнологическими требованиями (рисунок 2).

Для наглядности и простоты изложения в качестве конструктивного аналога принят исполнительный механизм дозатора посевного агрегата (СКС-2,1М), широко применяемого в реальных производственных условиях, а схема машинной технологии выполнения работы соответствует типовой инструкции.

Алгоритм расчета искомой величины, т. е. управляющей (командной) информации, предусматривает такую последовательность.

За один оборот вала высевающего аппарата объем дозирования определяется, исходя из конструктивно-технических параметров дозирующего механизма и технологической части агрегата (рисунок 2, *б*).

$$V_{1об} = z\frac{k}{2}\frac{\pi d^2}{4}l, \text{ м}^3/\text{об}, \quad (1)$$

где z – количество рабочих органов посевного агрегата; k – количество дозирующих желобков; d – диаметр дозирующего желобка; l – длина дозирующего желобка.

При этом масса

$$m_{1\text{об}} = V_{1\text{об}}\gamma, \text{ кг/об}, \quad (2)$$

где γ – удельная объемная масса сыпучего материала.

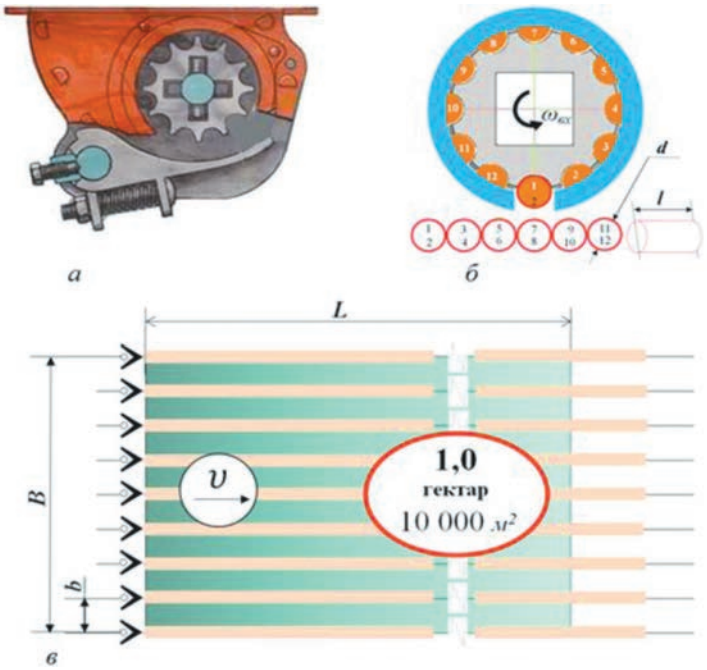


Рисунок 2 – К определению управляющего параметра дозирующего механизма: *а* – конструкция дозирующего механизма; *б* – абстракция дозирующего механизма; *в* – схема машинной технологии выполнения операции

Технологическая длина пути прямолинейного движения данного агрегата для выполнения работы на 1 га площади составляет (рисунок 2, *в*)

$$L_{\text{га}} = \frac{s_{\text{га}}}{B}, \text{ м}, \tag{3}$$

где $s_{\text{га}}$ – площадь, равная 1 га = 10 000 м^2; B – рабочая ширина технологической (рабочей) машины.

Технологическое время при заданной скорости агрегата в соответствии с агротехническими требованиями

$$t_{\text{га}} = \frac{L_{\text{га}}}{\upsilon_{\text{АТ}}}, \text{ мин}, \tag{4}$$

где $\upsilon_{\text{АТ}}$ – скорость перемещения агрегата в соответствии с требованиями агротехнологий выполнения данной операции.

Технологически необходимое количество оборотов вала высевающего аппарата для высева нормативного объема (массы) удобрений на единицу площади

$$n_{\text{га}} = \frac{M_{\text{Н}}}{m_{1\text{об}}}, \text{ об.}, \tag{5}$$

где $M_{\text{Н}}$ – масса назначенной нормы внесения удобрений.

Управляющая (командная) информация на входе дозирующего механизма:

$$n_{\text{вх}} = \frac{n_{\text{га}}}{t_{\text{га}}}, \text{ об/мин}, \tag{6}$$

или с учетом (1) – (5) после несложных преобразований получим:

$$n_{\text{вх}} = \prod_{j=1}^{\lambda} \mu_j \frac{M_{\text{Н}} B \upsilon_{\text{АТ}}}{\pi z k d^2 l \gamma}, \text{ об/мин}, \tag{7}$$

где $\prod_{j=1}^{\lambda} \mu_j$ – совокупность поправочных коэффициентов, учитывающих размерность составляющих элементов.

Таким образом, выражение (7) представляет собой математическую модель зависимости управляющей (командной) информации от конструктивно-технических параметров применяемого средства механизации, технологических режимов выполнения работы, физико-механических характеристик сыпучих материалов, конкретное назначение которой регулируется ПАК с использованием карты-задания о реальных потребностях почвы во внесении удобрений в пространственно-временных координатах. Модель объясняет взаимодействия существенных признаков процесса дозированного внесения удобрений в любой момент времени, что допускает возможность исследования на этапе проектирования технологической операции с применением компьютерных технологий.

На рисунке 3 приведены результаты численных экспериментов в табличной среде Excel по исследованию дифференциальных закономерностей изменения управляющей информации ($n_{вх}$) от отдельных входных факторов. Исходные данные для автоматизированных расчетов представлены в таблице.

Из анализа результатов вычислительных экспериментов следует, что увеличение нормы внесения удобрений (рисунок 3, *а*) и скорости прямолинейного движения агрегата (рисунок 3, *б*) сопровождается пропорциональным ростом величины управляющего параметра, т. е. числа оборотов ($n_{вх}$) на входе вала высевающего аппарата. При этом интенсивность роста числа оборотов



Рисунок 3 – Результаты компьютерных экспериментов: *а* – изменение нормы внесения удобрений; *б* – изменение скорости прямолинейного движения агрегата; *в* – изменение удельного веса

выше в зависимости от увеличения значений нормы внесения удобрений. Изменение удельного веса (рисунок 3, *в*) применяемого удобрения вносит изменения управляющей информации в обратной пропорциональности.

Исходные данные для автоматизированных расчетов

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение*	Примечание
Диаметр дозирующего элемента	d	см	1,2	Конструктивный параметр
Длина дозирующего элемента	l	см	3,8	Конструктивный параметр
Ширина захвата агрегата	B	м	1,824	Технический параметр
Ширина междурядий	b	см	22,8	Технический параметр
Длина пути агрегата	L	м	5482,5	Расчетный параметр
Скорость передвижения агрегата	$\upsilon_{АТ}$	км/час	7,0	Технологический параметр
Объемный вес сыпучего вещества	γ	кг/м^3	810,0	Справочный параметр
Норма внесения (высева)	M_H	кг/га	50,0	Технологический параметр
Число дозирующих элементов	k	ед.	12	Технический параметр
Число рабочих органов	z	ед.	9	Технологический параметр

Примечание: *условные значения для вычислительных экспериментов на базе сеялки СКС-2,1.

Для инженерных расчетов с учетом фактических характеристик приводного механизма следует ввести в формулу (7) коэффициент, учитывающий передаточное число привода. Тогда формула имеет следующий вид:

$$n_{вх} = \xi \cdot \prod_{j=1}^{\lambda} \mu_j \cdot \frac{M_Н B \upsilon_{АТ}}{\pi z k d^2 l \gamma}, \text{ об/мин}, \qquad (8)$$

где ξ – передаточное число привода.

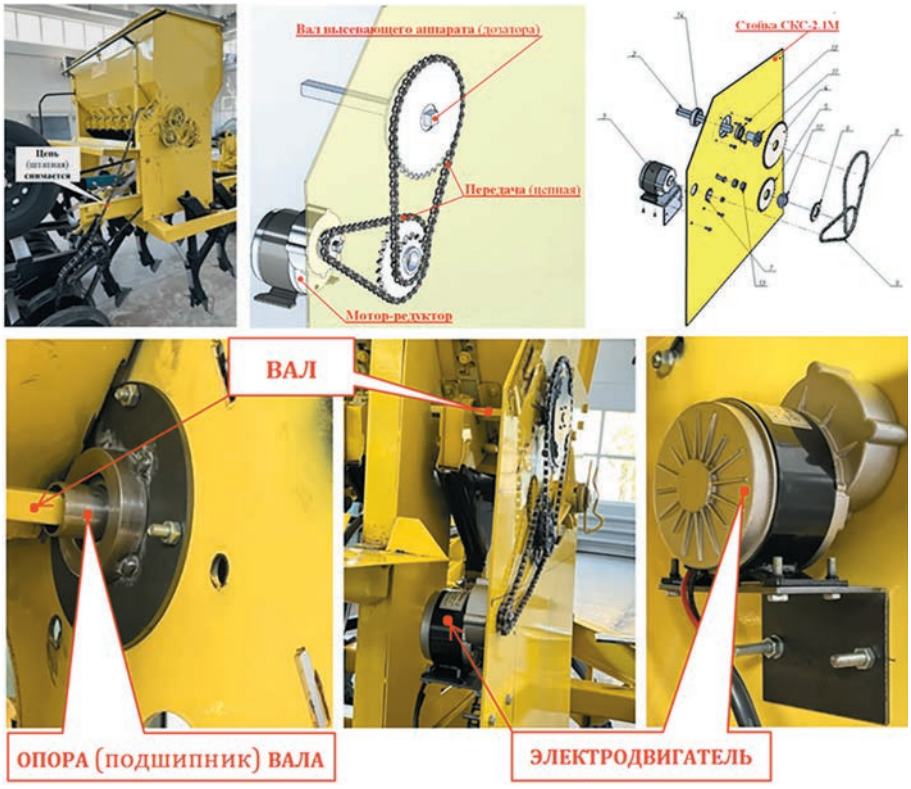


Рисунок 4 – Проектирование и монтаж привода

На рисунке 4 приведены результаты проектирования привода от электродвигателя и монтажа его на сеялку СКС-2,1М для реализации автоматизированного управления числа оборотов на валу высевающего аппарата в условиях оперативного времени. Управление оборотами электродвигателя осуществляется по сигналу широтно-импульсной модуляции (ШИМ) от микроконтроллера STM32.

Эксплуатационно-технологическое тестирование экспериментального образца [12, 13] показало функциональную работоспособность автоматизированной системы в целом и подтвердило корректность принятых методологических предпосылок.

Выводы

Предложено системное представление концепции восстановления структуры почвы и повышения ее качества с использованием удобрений, что дает возможность анализировать эволюцию инженерно-технологического обеспечения технологической операции внесения удобрений. Разработан алгоритм расчета управляющей информации на входе дозирующего механизма для дифференцированной подачи удобрений, позволяющий установить закономерности изменения управляющей информации в зависимости от параметров применяемого средства механизации, технологических режимов выполнения работы, физико-механических характеристик вносимых удобрений.

Работа выполнена в рамках реализации Проекта BR23992516 «Разработка и совершенствование технических средств и технологического оборудования, обеспечивающих реализацию научно-обоснованных технологий производства продукции растениеводства».

Список использованных источников

1. Павловский, В. Точное земледелие – умная технология XXI века / В. Павловский, А. Мучинский, Г. Добыш // Белорусское сельское хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 27–31.

2. В Казахстане идет цифровая трансформация агрокомплекса: ИТ-портал PROFIT. – 2024–2025. – URL: https://profit.kz (дата обращения: 15.09.2025).

3. Future agricultural systems and the role of digitalization for achieving sustainability goals / MacPherson J., Voglhuber-Slavinsky A., Olbrisch M. [et al.] // A review. Agronomy for Sustainable Development. – 2022. – № 70. – Vol. 42. – DOI: 10.1007/s13593-022-00792-6 (date of access: 25.08.2025).

4. Якушев, В. В. Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции : автореф. дис. … д-ра с.-х. наук : 06.01.03 / Якушев Вячеслав Викторович ; Санкт-Петербургский ГАУ. – СПб., 2013. – 50 с.

5. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие : учеб. пособие / В. И. Балабанов, А. И. Беленков [и др.] – М. : РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2013. – 119 с.

6. Влияние минеральных удобрений и стимуляторов роста на урожайность сои / С. А. Селицкий // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2017. – № 1 (65). – С. 60–65.

7. Майборода Н. М. Почвы, удобрения и урожай / Н. М. Майборода. – Краснояр. гос. агр. ун-т. – Красноярск, 1982. – 215 с.

8. Сельскохозяйственные машины. Настройка и регулировка : учеб. пособие / В. П. Капустин, Ю. Е. Глазков. – Тамбов : ТГТУ, 2010. – 196 с.

9. Алтыбаев, А. Н. Система технологической настройки машинно-тракторных агрегатов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Система технологий и машин для инновационного развития АПК России», посвящ. 145-летию со дня рождения академика В. П. Горячкина ; г. Москва, 17–18 сентября 2013 г.

10. Патент RU № 2613468, МПК A01C 21/00, 2006. Способ пропорционально-дифференцированного внесения удобрений : заявлено 16.09.2015 : опубл. 20.03. 2017 / Коломейченко В. В., Кынев Н. Н., Перегудов В. П. ; заявитель ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. – 8 с.

11. Celms, A. Global navigation satellite system as technical solution element of farm-land processing in Latvia / A. Celms, A. Ratkevics, V. Baumane // – Engineering for ruraldevelopment. – URL: http:tf.llu.lv/conference/proceedings2014/Papers/07_ Celms_A.pdf (date of access: 20.08.2018).

12. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний. Межгосударственный стандарт : ГОСТ 28714-2007. – Взамен ГОСТ 28714–90 ; введ. 08.06.2007. – М. : Стандартинформ, 2008. – 44 с.

13. Цифровая трансформация системы управления процессами подпочвенного внесения удобрений / А. Н Алтыбаев., А. С. Рзалиев [и др.] // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : материалы XVI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. «ИнформАгро-2024», – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2024. – URL: https://rosinformagrotech.ru/fntp/novosti-minselkhoza-o-fntp/xvi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-nauchno-informatsionnoe-obespechenie-innovatsionnogo-razvitiya-apk-informagro-2024 (дата обращения: 15.09.2025).

УДК: 631.319.06

Поступила в редакцию 21.11.2025
Received 21.11.2025

П. Т. Бердимуратов[1], А. П. Таджимуратова[1], В. Б. Ловкис[2], Т. А. Непарко[2]

[1]Национальный исследовательский университет
«Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
г. Ташкент, Республика Узбекистан
E-mail: b_parakhat@mail.ru
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mta_mtp@bsatu.by

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРЕБНЯ И КОНСТРУКЦИИ ФОРМОВЩИКА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ТОЧНОГО И ШТУЧНОГО ВЫСЕВА СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА

Аннотация. Успехи в возделывании хлопчатника во многом зависят от сроков и качества подготовки почвы к посеву и посева, а последний, в свою очередь, – от способов проведения посевной и совершенствования конструкции машин. Целью исследования является обоснование формы гребней и параметров формовщика гребней к хлопковой сеялке. Авторами предложена новая технология посева с одновременным формированием гребней. Теоретически обоснованы форма и параметры гребня. При выполнении формы гребня в виде равнобокой трапеции и соответственно с высотой и шириной поверхности гребня не менее 100 мм и 160 мм обеспечивается защита семенного ложа от затопления дождевыми потоками. Приведена конструкция разработанного формовщика гребней к хлопковой сеялке для осуществления предложенной технологии.

Ключевые слова: хлопчатник, сеялка, технология, сгребатель-формовщик, дождевой поток, семенное ложе, гребень.

P. T. Berdimuratov[1], A. P. Tadjimuratova[1], V. B. Lovkis[2], T. A. Neparko[2]

[1]National Research University
“Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”
Tashkent, Republic of Uzbekistan
E-mail: b_parakhat@mail.ru
[2]EI “Belarusian State Agrarian Technical University”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mta_mtp@bsatu.by

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE RIDGE AND DESIGN OF THE FORMER FOR THE TECHNOLOGY OF PRECISE AND INDIVIDUAL OF COTTON SEED SOWING

Abstract. Success in cultivating cotton largely depends on the timing and quality of soil preparation for sowing and sowing, and the latter, in turn, depends on how it is carried out and on the perfect design of the machines. The aim of the study is to justify the shape of the ridges and the parameters of the moulder to the cotton seeder. The authors proposed a new technology for sowing with the simultaneous formation of ridges. The shape and parameters of the ridge are theoretically justified. When performing the ridge shape in the form of an isosceles trapezoid and, accordingly, with a height and width of the ridge surface of at least 100 mm and 160 mm, the seed bed is protected from flooding by rain streams. The design of the developed comb moulder to a cotton seeder for the implementation of the proposed technology is given.

Keywords: cotton, sowing machine, technology, rake-forming machine, rain stream, seed bed, comb.

Введение

Известно, что традиционная технология сева хлопчатника по гладкому полю наиболее простая и малозатратная. Однако она более чувствительна к изменениям погоды. При посеве хлопчатника на гладком поле при обильных дождях происходит затопление семенного ложа, что приводит к снижению всхожести семян и образованию корок [1]. В настоящее время широко рас-

пространяется гребневая технология посева пропашных культур [2]. При гребневом посеве создаются благоприятные водные и температурные условия для быстрого и полного всхода семян хлопчатника. Для посева хлопчатника в основном производят нарезку гребней осенью. При этом нарезанные осенью гребни теряют перед посевом (весной) свою форму, что требует дополнительной операции по их восстановлению. Поэтому формирование гребней одновременно с посевом является необходимой задачей. Цель исследования – обоснование формы гребней и параметров формовщика гребней к хлопковой сеялке.

Основная часть

Предложенная технология осуществляется следующим образом (рисунок 1): рыхлители *1* в виде полустрельчатой лапы подрезают сорные растения и крошат почву, их почвосдвигающие пластины, перемещая почву в сторону средней части гребня, присыпают стенки гребня разрыхленной почвой. Затем формовщик *2* формирует и уплотняет гребень, после чего, идущий вслед за ним полозовидный сошник *3*, открывает бороздку посередине гребня, а уплотнитель *4* уплотняет ее дно. Каточек *5* после высева семян частично вдавливает их в почву. Загортачи *6* заделывают семена на установленную глубину, а каток 7 с коническим ободом уплотняет почву.

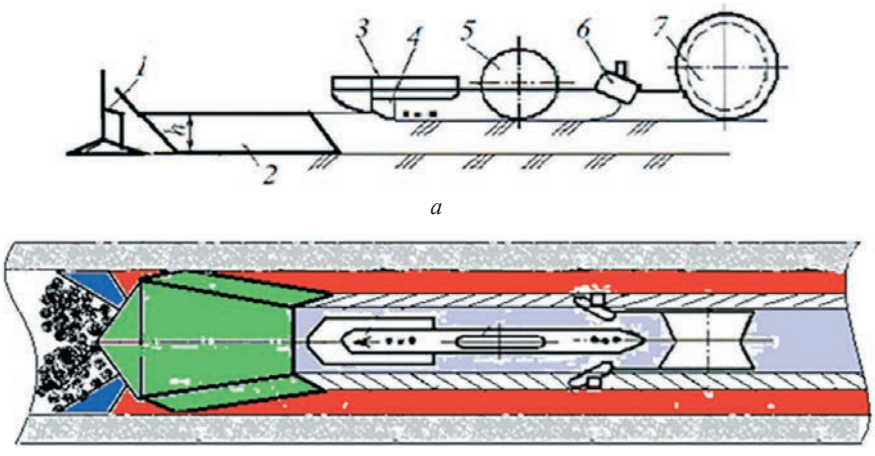
В зависимости от условий работы рыхлители могут быть выполнены в виде односторонней плоскорежущей лапы, полустрельчатой лапы или бороздореза-отвальщика.

Рыхлители *1* с крыльями закрепляются, а формовщик с помощью параллелограммного механизма навешивается к раме сеялки.

Одним из основных требований к параметрам гребня является возможность защитить семенное ложе от затопления дождевыми потоками и от коркообразования. Как известно, при формировании гребней боковые стенки осыпаются под углом естественного откоса. Следовательно, при осыпании почвы образуется грядка, по форме напоминающая равнобокий треугольник. Однако для работы рабочих органов сеялок на вершине такого гребня необходимо иметь площадку шириной 160–170 мм [1]. Для этого приходится срезать его вершину, после чего такой гребень перед посевом превращается в равнобокую трапецию (рисунок 2), форму, которую принимаем за основу для проведения последующих расчетов.

Исследования по совершенствованию технологий подготовки почвы к посеву пропашных культур на гребнях, созданию машин для формирования гребней, обоснованию конструкций и параметров их рабочих органов проводились Г. М. Рудаковым, А. Г. Понамаревым, В. И. Курдюмовым и Е. С. Зыкиным, Ф. М. Маматовым и У. Х. Кадировым, Х. Г. Абдулхаевым и др. [1–7].

Г. М. Рудаковым и А. Г. Понамаревым обоснованы параметры грядоделателя для посева хлопчатника на гребнях. В. И. Курдюмовым и Е. С. Зыкиным обоснованы технология и средства



а

б

Рисунок 1 – Технология посева с одновременным формированием гребней:
а – вид сбоку; *б* – вид сверху; *1* – полустрельчатая лапа с почвосдвигающей пластиной; *2* – формовщик; *3* – сошник сеялки; *4* – уплотнитель; *5* – каточек; *6* – загортач; *7* – конический каток

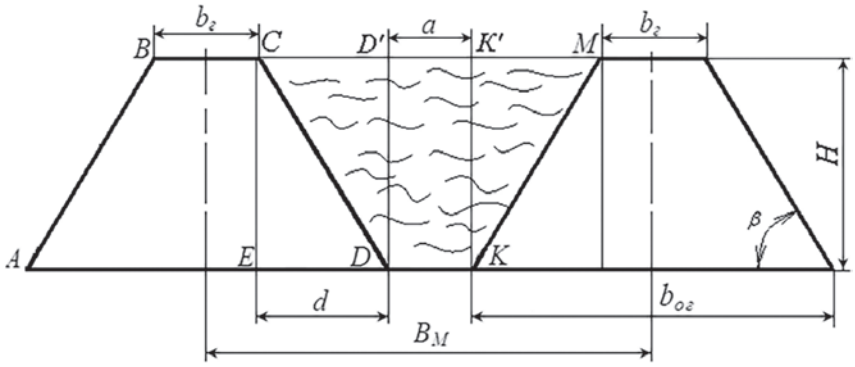


Рисунок 2 – Схема к определению параметров гребня

механизации гребневого возделывания пропашных культур для условий Российской Федерации. Ф. М. Маматовым и У. Х. Кадировым разработана технология подготовки почвы к посеву картофеля на гребнях. Ф. М. Маматовым и Б. Мирзаевым [8, 9] рассмотрены вопросы противоэрозионной обработки почвы перед посевом пропашных культур. Исследования Х. Г. Абдулхаева направлены на разработку орудия для рыхления гребней и уничтожения сорной растительности, а также образования мульчирующего слоя на их поверхности. Все эти исследования были направлены на усовершенствование традиционных технологий и технических средств для подготовки почвы к посеву технических культур, в том числе хлопчатника, что не удовлетворяет современным требованиям сельскохозяйственного производства. В данных исследованиях не рассмотрены вопросы формирования гребней и посева хлопчатника за один проход агрегата. Приведенные недостатки могут быть устранены путем разработки формовщика гребней к хлопковой сеялке, осуществляющего формирование гребней и посев хлопчатника за один проход агрегата.

Для определения минимально допустимых параметров сформированных гребней исходим из условия, чтобы их не заливали дождевые потоки. Из рисунка 2 видно, что для обеспечения защиты семенного ложа от затопления площадь поперечного сечения бороздки междурядий S_{CDKM} должна быть больше площади поперечного сечения осадков в междурядья за сутки ($Q_с B_м$).

С учетом вышеизложенного, параметры гребня определяли, исходя из условия попадания в бороздку междурядий выпавших суточных осадков

$$H_1 = \frac{1}{2K_у}[(B_М - b_г)\mathrm{tg}\beta - \sqrt{[(B_М - b_г)\mathrm{tg}\beta]^2 - 4Q_с B_М \mathrm{tg}\beta}] + h; \quad (1)$$

$$b_{ог} = 2H_1 \mathrm{ctg}\beta + b_г; \quad (2)$$

$$S_г = (B_м - b_{ог})H_1 + H_1^2 \mathrm{ctg}\beta, \quad (3)$$

где H_1 – минимально допустимая высота гребня; $Q_с$ – количество осадков, выпавших за сутки; β – угол естественного откоса; $B_м$ – ширина междурядьев; $b_г$ – ширина вершины гребня; $K_у$ – коэффициент, учитывающий усадку почвы; h – высота неровностей поверхности поля; $S_г$ – площадь поперечного сечения бороздки.

Выполненные расчеты по выражениям (1) – (3) при $Q_с$ = 34 мм, $b_г$ = 160 мм, h = 36 мм, $K_у$ = 0,90 и β = 36° [10] показали, что минимально допустимая высота гребня h_1 должна быть не менее 100 мм; допустимая ширина нижнего основания гребня $b_{ог}$ – не менее 435 мм; допустимая площадь поперечного сечения бороздки $S_г$ – не менее 306 см^2 при $B_м$ = 900 мм и 204 см^2 при $B_м$ = 600 мм.

Форма и параметры гребня являются основой для определения параметров формовщика. Основными параметрами формовщика являются ширина входной $B_ф$ и выходной $b_ф$ кромки полоза формовщика, угол установки боковых отвалов к направлению движения α и к горизонтальной плоскости $\beta_у$, длина полоза L.

Оптимальный угол установки α боковых отвалов к направлению движения определялся из условия обеспечения свободного скольжения и уплотнения почвы отвалами, т. е. $\alpha \le (\pi/4 - \varphi/2)$,

где φ – максимальный угол трения почвы по отвалу. При известном значении φ = 30° получим $\alpha \leq 30°$.

Для определения длины и ширины входной кромки полоза формовщика получены следующие выражения:

$$L = \frac{1}{2}(B_р - b_{ог})\text{ctg}\,\alpha, \quad (4)$$

$$B_ф = 2L\text{tg}\alpha + b_г. \quad (5)$$

Подставив в формулы (4) и (5) значения $B_р$ = 554 мм, $b_г$ = 160 мм, $b_{ог}$ = 435 мм и α = 14–16°, получим, что длина полоза формовщика должна быть в пределах L = 183–238,9 мм, а ширина входной кромки формовщика $B_ф$ = 292–334 мм.

Угол наклона боковых граней к горизонтали определялся при условии исключения осыпания почвы гребня по следующему известному выражению: $\beta_у \leq \beta$, где β – угол естественного откоса.

Так, чтобы устранить осыпание боковых граней гребня, необходимо располагать боковые отвалы формовщика под углом $\beta_у$ = 42–45° к горизонтальной плоскости поля.

Высоту отвала h принимаем равным минимально допустимой высоте гребня, $h = H_1$ = 100 мм.

При работе козырек формовщика, воздействуя на почву, производит ее деформацию (рисунок 1). Угол установки α_1 козырька определим из условия обеспечения скольжения почвы по нему:

$$\alpha_1 \leq \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}. \quad (6)$$

Подставляя в это выражение известное значение φ = 25–30°, получим α_1 = 30–34°.

Высоту отвала h принимаем равной минимально допустимой высоте гребня H_1. Тогда h = 100 мм.

Для проверки результатов теоретических исследований, а также для изучения влияния различных факторов на качество формирования гребней нами был изготовлен опытный образец формовщика к хлопковой сеялке и проведены его сравнительные лабораторно-полевые исследования. Опыты проводились в следующих вариантах: посев хлопчатника по гладкому полю (контроль); посев на гребнях, сформированных одновременно с посевом хлопчатника.

В результате исследований было установлено, что при посеве формовщик обеспечивает формирование гребней с требуемыми параметрами: высота гребней составляла 10,1–10,7 см, а после заделки семян загортачами и прикаткой – 12,0–13,0 см. Наблюдения показали, что при посеве на гребнях устраняется попадание дождевого потока в семенное ложе. В результате чего ускоряется появление всходов и развитие растений, исключаются пересевы хлопчатника [11, 12].

При предложенном способе посева соблюдены благоприятные температурные, водные и воздушные условия. Посев хлопчатника на гребнях (по сравнению с посевом по гладкому полю) обеспечил оптимальную температуру почвы в начале апреля на глубине 4,0–5,0 см в пределах 12–14 °С при влажности почвы 12–13 % и плотности почвы в пределах 1,04–1,16 г/см^3, что способствовало хорошему развитию растений. В результате применения предложенной технологии с разработанной сеялкой количество всходов растений увеличивается на 17,8 %, а урожайность хлопчатника – на 9,9 % по сравнению с хлопчатником, посеянным на ровном поле.

Заключение

При выполнении формы гребня в виде равнобокой трапеции и соответственно с высотой и шириной поверхности гребня не менее 100 и 160 мм обеспечивается защита семенного ложа от затопления дождевыми потоками. При выполнении входной кромки формовщика шириной 290–320 мм, выходной кромки 160 мм, угла наклона бокового отвала к направлению движения 20°, длины полоза формовщика 203–215 мм, высоты бокового отвала 100 мм и угла установки бокового отвала к горизонту 42–45° обеспечивается качественное выполнение технологического процесса формирования гребней.

При посеве семян хлопчатника на гребнях с одновременным формированием гребня количество всходов растений увеличивается на 17,8 %, а урожайность хлопчатника повышается по сравнению с гладким способом посева на 9,9 %. Это дает основание предполагать, что данная технология может применяться для посева хлопчатника, что подтверждено результатами экспериментальных исследований.

Список использованных источников

1. Рудаков, Г. М. Технологические основы механизации сева хлопчатника / Г. М. Рудаков. – Ташкент : Фан, 1974. – 284 с.

2. Пономарев, Е. И. Обоснование параметров рабочих органов для формовки гребней и грядок под посев хлопчатника : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Пономарев Евгений Иванович ; Среднеаз. НИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Ташкент : Янгиюль, 1985. – 16 с.

3. Курдюмов, В. И. Технология и средства механизации гребневого возделывания пропашных культур : монография / В. И. Курдюмов Е. С. Зыкин. – Ульяновск : Вега-МЦ, 2017. – 320 с.

4. Курдюмов, В. И. Энергосберегающая технология посева пропашных культур / В. И. Курдюмов, Е. С. Зыкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 1. – С. 7–8.

5. Energy-resourse saving machine for preparing soil for planting root crops on ridges / F. M. Mamatov, U. Kodirov // European Science Review. – Vienna, 2016. – № 11–12. – С. 125–126.

6. Обоснование параметров ножей выравнивателя-рыхлителя / Х. Г Абдулхаев, М. М. Халилов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – № 13 (3). – С. 44–47. – URL: https://www.vimsmit.com/jour/article/view/334 (дата обращения: 05.09.2025).

7. Abdulkhaev Kh. G. About field tests on implement for presowing cultivation of ridges // European Applied sciences – Stuttgart, 2015, № 6. – P. 54–55.

8. Mirzaev, B. A justification of broach-plow's parameters of the ridge-stepped ploughing. E3S Web of Conferences / B. Mirzaev, F. Mamatov, O. Tursunov. – 2019. – DOI: 10.1051/e3sconf/20199705035 (date of access: 10.09.2025).

9. Technologies and technical means for anti-erosion differentiated soil treatment system. E3S Web of Conferences / B. Mirzaev, F. Mamatov, I. Avazov, S. Mardonov. – 2019. – DOI: 10.1051/e3sconf/20199705036 (date of access: 11.09.2025).

10. Ахмеджанов, М. Уплотнение валиков / М. Ахмеджанов, Т. Аваздурдиев // Земледелие. – М., 1982. – № 7. – С. 7–8.

11. Утепбергенов, Б. К. Обоснование оптимальных параметров грядок для сева хлопчатника на их гребни / Б. К. Утепбергенов, П. Т. Бердимуратов, Д. К. Жумамуратов // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистон. – Нукус, 2017. – № 1 (246). – С. 34–36.

12. Berdimuratov, P. T. Improving the combing technology and tool for sowing the cotton / P. T. Berdimuratov, F. M. Mamatov // European science review. – Austria, 2018. – № 1. – P. 237–239.

УДК: 631.363

Поступила в редакцию 21.11.2025
Received 21.11.2025

Б. П. Шаймарданов[1], П. Т. Бердимуратов[1], В. Б. Ловкис[2], Т. А. Непарко[2]

[1]Национальный исследовательский университет
«Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
г. Ташкент, Республика Узбекистан
E-mail: b_parakhat@mail.ru
[2]УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mta_mtp@bsat

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ТОЧНОГО И ШТУЧНОГО ВЫСЕВА СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования по обоснованию технологии точного и штучного высева, включающей рабочий орган для внесения удобрений, формирователь-уплотнитель гребня с закрепленным к нему высевающим сошником, загортач для заделки семян, прикатывающий каток, устройство для укладки поливного шланга и загортач для заделки шланга в почву.

Ключевые слова: технология, гребневый посев, формирователь, уплотнитель, капельное орошение, укладчик, поливной шланг.

B. P. Shaimardanov[1], P. T. Berdimuratov[1], V. B. Lovkis[2], T. A. Neparko[2]

[1]National Research University
“Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”
Tashkent, Republic of Uzbekistan
E-mail: b_parakhat@mail.ru
[2]EI “Belarusian State Agrarian Technical University”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mta_mtp@bsatu.by

TECHNOLOGICAL SCHEME FOR PRECISE AND PIECE-BY-PIECE SOWING OF COTTON SEEDS

Abstract. The article presents the results of technological scheme for precise and piece sowing of cotton seeds, including a working element for applying fertilizers, a ridge former and compactor, a seed coulter riveted to them, a coverer for embedding seeds, a compacting roller, a device for laying an irrigation hose, and a coverer for embedding the hose with soil.

Keywords: ridge seeding, seeder, former, compactor, drip irrigation, paver, irrigation hose.

Введение

Повышение урожайности хлопчатника и сбора его в оптимальные сроки связаны с обеспечением получения ранних, дружных и здоровых всходов. Однако в последние годы хлопкоробы Узбекистана в период посевной сталкиваются с большими трудностями из-за неблагоприятных погодных условий (проливные дожди, заморозки почвы и т. д.). На части площадей приходится пересевать хлопчатник, что приводит к снижению его урожая, затягиванию уборки и удорожанию производства. В связи с этим у хлопкоробов республики возникла необходимость изменить технологию выращивания хлопчатника так, чтобы можно было провести качественный посев в ранние сроки, завершить уборку урожая в октябре и тем самым дать возможность совершить все необходимые полевые работы в полном объеме под урожай следующего года до наступления ненастных дней [1].

Чтобы избежать влияние неблагоприятных погодных условий на рост и развитие хлопчатника в ряде областей республики проводят посев по гребням взамен посева хлопчатника по гладкому

полю [2]. При этой технологии после обильных осадков над семенным ложем не образуются лужи. Для организации посева по этой технологии необходимо осенью нарезать гребни, а перед севом подготовить их вершину к выполнению этой работы, что влечет за собой значительные трудовые и материальные затраты и резко снижает эффективность данной технологии. Кроме того, как показал опыт сева хлопчатника по гребням, его очень сложно проводить существующими посевными агрегатами, так как сошник сеялки здесь не имеет необходимой опоры [3].

Для устранения этих недостатков необходимо разработать такую сеялку для посева хлопчатника на гребнях, применение которой позволило бы при наименьших затратах получить ранние и здоровые всходы без пересева, а главное, защитить посевы от дождевых потоков и при необходимости провести подпитывающие поливы.

Цель статьи – на базе полученных патентов решить ряд технологических и технических вопросов, связанных с посевом хлопчатника на гребнях, сформированных одновременно с посевом.

Основная часть

Известна и широко используется на практике технология сева хлопчатника по гладкому полю [3, 4]. Технология наиболее простая и малозатратная. Однако при интенсивных дождях над семенным ложем образуются потоки воды, которые приводят к образованию почвенной корки. В результате ежегодно приходится пересевать до 30 % площадей хлопчатника.

Для устранения этого явления взамен посева хлопчатника по гладкому полю хлопкоробы начали использовать посев на гребнях грядок, сформированных осенью после пахоты [5]. При этой технологии семена хлопчатника заделываются в более прогретую почву, чем при посеве по гладкому полю.

По данным Физико-технического института имени С. А. Азимова Академии наук Республики Узбекистан, на гребнях грядок радиация в 1,5 раза больше попадает в почву, чем на гладком поле, а температура почвы повышается на 4–5 °С [6]. Это дает возможность начать сев в ранние сроки, ускорить появление всходов и развитие растений, устранить появление почвенной корки над семенным ложем и в результате увеличить урожай хлопка-сырца.

Согласно описываемой технологии осенью по вспаханному полю нарезают гребни, а весной готовят их к посеву. При этом, если недостаточно для дружных всходов естественной влаги, то за 8–12 дней до посева проводят предпосевной полив. Для мелкокомковатой разделки, сохранения влаги и уничтожения сорняков по мере достижения почвой оптимальной влажности проводят ее предпосевную обработку универсальной профильной бороной. Для выполнения этих операций требуется не менее трех отдельных агрегатов, что финансово весьма накладно. Кроме того, как показала практика посева хлопчатника по гребням, сошники сеялки в работе смещаются от линии сева, что приводит к нарушению прямолинейности высева. Это снижает качество посева, вызывает повреждение всходов при обработках вегетационного периода, а в период уборки урожая нарушаются агротехнические показатели хлопкоуборочной машины.

Учитывая эти недостатки, в зоне старого орошения, где всходы можно получить по естественной влаге и имеется достаточно плодородной почвы, грядки (высотой не менее 100 мм) можно формировать одновременно с посевом. В этом направлении разрабатывались специальные устройства к хлопковой сеялке [7]. Недостатками данной сеялки являются: непрямолинейность посева семян, вызванная вилянием сошника в поперечном направлении относительно грядки из-за отсутствия опоры; разваливание грядки в процессе вегетации растения из-за отсутствия уплотнения; отсутствие адресного внесения удобрения.

Задачами исследования являются: достижение прямолинейности высева семян; формирование уплотненной грядки непосредственно при посеве с одновременным адресным внесением удобрений под семена; укладка и заделка поливных шлангов на гребне грядки. Поставленные задачи достигаются [8, 9] путем жесткого крепления сошника к формирователю-уплотнителю, комплектования сеялки устройством для внесения удобрений и укладчиком шланга капельного орошения для улучшения показателя устойчивого полива, увеличения срока службы поливного шланга и использования контакта водовыпуска шланга с почвой для снижения напора струи поливной воды.

Сеялка для посева пропашных культур имеет ряд преимуществ: прямолинейность сева семян и формирование уплотненной грядки с одновременной укладкой и заделкой поливных шлангов на гребне грядки, возделывание сельскохозяйственных культур при капельном орошении полей с помощью поливных шлангов, оснащенных водовыпусками для адресного и равномерного увлажнения корневой системы растения.

Сущность способа заключается в том, что семена засеваются на гребне грядки выше слоя минеральных удобрений, вносимых одновременно с посевом, грядки формируют непосредственно при посеве с уплотнением почвы, а полив осуществляется по шлангам капельного орошения, уложенным на гребнях грядок в специально продавленные и засыпанные почвой выемки [5, 7, 10, 11].

Схема сеялки приведена на рисунке 1. Сеялка состоит из последовательно расположенного рабочего органа *1* для внесения удобрений; емкости *2* для удобрений; тукопровода *3*; формирователя-уплотнителя грядки, состоящего из козырька *4*; корпуса *5*, имеющего при входе форму зеркально установленных предплужников, при выходе – форму трапеции. Козырек *4* плавно переходит в крышу *6*. Боковые щитки и крышка корпуса постепенно сужаются. С формирователем-уплотнителем жестко соединен сошник *8*, что обеспечивает прямолинейность высева за счет устранения виляния сошника относительно формирователя-уплотнителя. Над сошником установлена семенная банка, далее расположен загортач *9* для заделки семян; каток *10* и устройство для укладки поливного шланга, включающего барабан *11* для намотки шланга *12*; направляющие ролики *13*; прижимной каток *14* и загортач *15* для заделки уложенного шланга. Семена *16* располагаются над внесенными удобрениями *17*.

На рисунке 2 изображен вид спереди формирователя-уплотнителя грядки, на рисунке 3 – формирователь-уплотнитель в изотермии с отверстиями *18* под болты жесткого крепления сошника к формирователю.

Технологический процесс работы сеялки и функциональные задачи его элементов заключаются в следующем. При поступательном движении сеялки рабочий орган *1* вносит в почву минеральные удобрения, отвалы формирователя-уплотнителя *5* сгребают, сжимают в горизонтальном направлении предварительно обработанную (боронованием, малованием и т. д.) почву и придают ей заданную форму. Благодаря суживанию сечения корпуса формирователя грядки прессуются до заданной величины плотности почвы. Как и при работе обычной сеялки, сошник *8* высевает семена на гребне грядки *7*, загортач *9* заделывает семена, прикатывающий каток *10* уплотняет почву над высеянными семенами для обеспечения надежного контакта семян с почвой и на гребне грядки выдавливает углубления под укладку поливного шланга капельного орошения. В эти углубления укладывает поливной шланг *12*, сматывая его с барабана *11*, пропуская через направляющие ролики *13* и прижимной каток *14*, а загортач *15* засыпает шланг слоем почвы. Таким образом, за один проход сеялки обеспечивается весь цикл работ по созданию уплотненной грядки, локальному и адресному внесению удобрений *17*, посева семян *16* и укладке

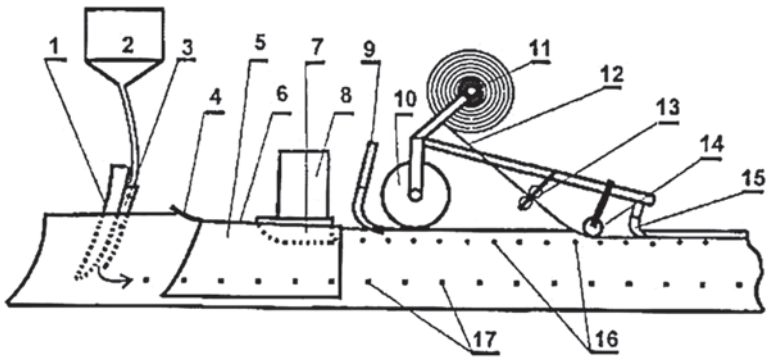


Рисунок 1 – Схема сеялки: *1* – последовательно расположенный рабочий орган для внесения удобрений; *2* – емкость для удобрений; *3* – тукопровод; *4* – козырек; *5* – корпус; *6* – крыша; *8* – сошник; *9* – загортач для заделки семян; *10* – каток; *11* – барабан; *12* – шланг; *13* – направляющие ролики; *14* – прижимной каток; *15* – загортач; *16* – семена; *17* – удобрения

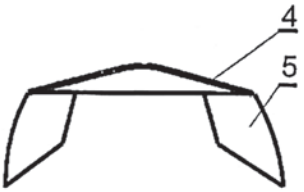


Рисунок 2 – Схема формирователя-уплотнителя (вид спереди): *4* – козырек; *5* – корпус

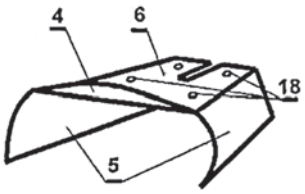


Рисунок 3 – формирователя-уплотнителя (в изометрии): *4* – козырек; *5* – корпус; *6* – крыша; *18* – отверстия

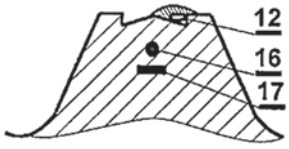


Рисунок 4 – Схема гребня с расположением поливного шланга, семян и удобрения: *12* – поливочный шланг; *16* – отверстие для семен; *17* – отверстие для удобрения

поливного шланга. Поперечное сечение грядки после прохода сеялки с высеянными семенами *16*, внесением удобрения *17* и уложенным поливным шлангом представлено на рисунке 4 [12].

Преимущества капельного орошения (экономия поливной воды, удобрений, снижение затрат на борьбу с сорной растительностью) общеизвестны, поэтому этот способ широко используется в мировой практике, чаще всего при плантационном возделывании сельскохозяйственных культур.

Известны различные конструкции водовыпусков для капельного орошения, например, капельный водовыпуск (RU2278504), включающий ленту, склеенную или сваренную с поверхностью гибкого трубопровода над отверстием в трубопроводе. Поверхность сопряжения ленты с поверхностью трубопровода выполнены с шевронными канавками, водовыпуск отличается сложностью конструкции. Другой капельный водовыпуск (RU2294628), включающий трубопровод с вставкой из эластичного материала, которая снабжена полукруглой канавкой и канатом, зафиксированным дисками. Его недостатком является сложность конструкции. Известен поливной шланг для капельного орошения, выполненный из непрозрачного эластичного пластиката (UZ FAP00899). Водовыпуски в стенке шланга выполнены в виде прорезей длиной L_1 = 1–4 мм на расстоянии L_2 = 100–500 мм друг от друга в диаметрально противоположных сторонах шланга. Прорези выполняются вдоль, перпендикулярно или под углом α = 45° к продольной оси шланга. Недостатком поливного шланга является то, что во время полива вода растягивает прорези, в результате чего первоначальная длина, а следовательно, и сечение прорезей, по мере эксплуатации постепенно увеличиваются. Причем увеличение длины прорезей у отверстий различно. В результате возникает неравномерность расхода воды по отверстиям и увеличение общего расхода поливной воды. Таким образом, нарушается устойчивость полива как по расходу, так и по неравномерности. Задачей конструкции поливного шланга является улучшение показателей устойчивости полива и увеличение срока службы поливного шланга. В конструкции поливного шланга, выполненного из эластичного пластиката, водовыпуски расположены в одну линию с одной стороны поливного шланга с отбортовками по краям отверстий для придания им прочности, чтобы избежать разрывов по краям отверстий. Водовыпуски представляют собой круглые отверстия. Соотношение отверстия к диаметру поливного шланга составляет d/D = 1/30–40, отверстия выполнены в стенке по одну сторону шланга на расстоянии L = 80–400 мм.

Конструкция поливного шланга показана на рисунке 5: поперечный разрез шланга *2*, заполненный водой *8,* и водовыпуск *3*, по краям которого выполнена отбортовка *4.*

На рисунке 6 показано расположение водовыпусков *3* на отрезке шланга. Поливной шланг имеет сравнительно простую конструкцию. Отношение диаметра отверстий к диаметру шланга 1/(30–40) позволяет обеспечить равномерный расход воды вдоль поливного шланга при низком напоре. В связи с тем, что наполненный водой шланг располагается водовыпусками вниз, струя

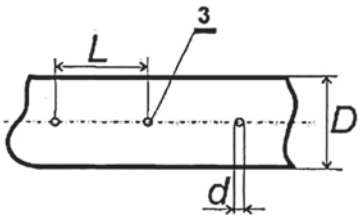


Рисунок 5 – Конструкция поливного шланга:
D – диаметр поливного шланга;
d – диаметр отверстия;
L – расстояние между отверстиями;
3 – водовыпуск

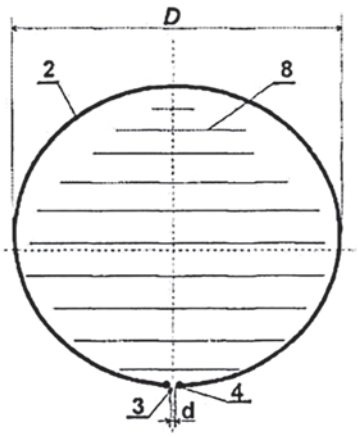


Рисунок 6 – Расположение водовыпусков на отрезке шланга:
D – диаметр поливного шланга;
d – диаметр отверстия; *2* – поперечный разрез шланга;
3 – водовыпуск; *4* – отбортовка;
8 – вода внутри шланга

поливной воды из-за сопротивления почвы снижает напор и эффект полива получается адекватным поливу каплями, т. е. почва в контакте с капельницей компенсирует давление струи.

Наиболее близким аналогом такому способу укладки является изобретение SU1634957.

Перфорированный поливной шланг размещается на поверхности трубопровода, уложенного в траншею. При заполнении трубопровода водой шланг выносится на поверхность поля для полива. Недостатками аналога является сложность системы и перерасход поливной воды, так как полив осуществляется струйный, а не капельный.

Задачей способа укладки поливного шланга является контакт водовыпусков. В результате почва за счет непосредственного контакта с водовыпуском выполняет роль компенсатора давления струи воды, а тонкий слой почвы поверх шланга защищает шланг от солнечных лучей, продлевая тем самым срок его службы. Поливной шланг укладывается на гребень грядки для капельного орошения водовыпусками на поверхность почвы и прикрывается слоем почвы, угол отклонения от оси водовыпуска к поверхности почвы не должен превышать 15°.

Наилучшим вариантом укладки шланга считается укладка с расположением водовыпусков по нормали (перпендикулярно) к поверхности почвы. Вместе с тем эксперименты [9], проведенные в Янгиюльском районе, на полигоне Государственного центра по сертификации и испытанию сельскохозяйственной техники и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан, показали, что контакт водовыпуска с почвой (благодаря деформациям почвы и шланга) достигается и при отклонении оси водовыпуска к поверхности почвы на 15°. В опытах использовали насос водного типа GRANDFAR-1 с производительностью 30 м^3/ч на 1 га. Все поливные шланги изготовлены местными производителями. Поливные шланги эластичные, имеют толщину 250–300 микрон, определенного диаметра и размера отверстия для полива. При поливах шланг расширяется по диаметру, и при отсутствии воды – сужается, и тем самим происходит самоочищение от илистых слоев внутри шланга. Длина поливных шлангов – от 100 до 250 м, расстояние между отверстиями от 7 до 10 см. По данному способу полив можно организовать сразу после сева, как рекомендуется по агротехнике. В исследованиях определили [9], что расход воды при бороздовом поверхностном поливе составлял 6 000 м^3, а при предлагаемом способе полива на гребне – 2 000 м^3. Открытие поливных борозд и ручное прореживание не выполнялись.

Укладка поливного шланга показана на рисунке 7, где схематически представлено сечение грядки *1*, поливной шланг *2*, водовыпуск *3*, след *5* от уплотнительного катка сеялки, слой почвы *6* для прикрытия шланга от солнечных лучей, контур *7* зоны увлажнения, корневая система *8* растения, угол α отклонения оси водовыпуска к поверхности почвы [13–16].

Поливной шланг раскладывают в поле вдоль рядков растений на гребень грядки по следу фигурного перекатывающего барабана сеялки водовыпусками вниз. Один конец шланга герме-

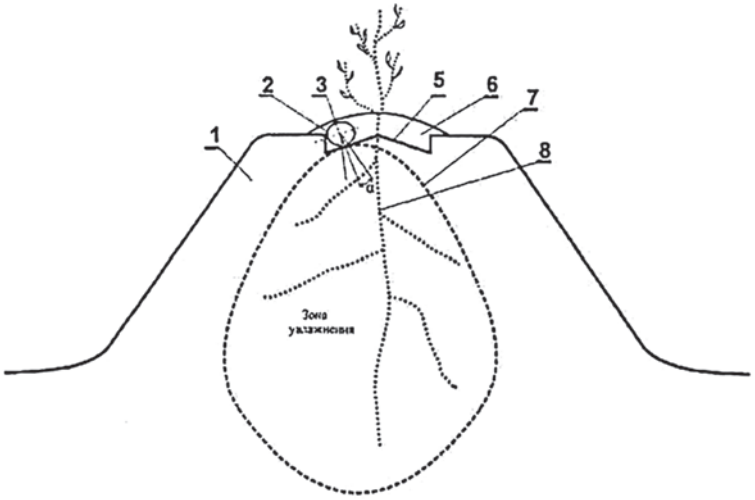


Рисунок 7 – Укладка поливного шланга: *1* – грядка; *2* – поливной шланг; *3* – водовыпуск; *5* – след от уплотнительного катка сеялки; *6* – слой почвы для прикрытия шланга от солнечных лучей; *7* – контур зоны увлажнения; *8* – корневая система растения

тично закрывается, а другой подключается к источнику поливной воды с напором (0,1–0,3 атм.). Вода, поступая в шланг, наполняет его и вытекает через отверстия. Встречая сопротивление почвы, снижает напор, обеспечивая полив аналогично капельному поливу. Таким образом, почва служит компенсатором давления струи.

Заключение

Рассмотренная в статье технологическая схема позволяет разработать комбинированную сеялку для точного и штучного высева семян хлопчатника по гребням с адресным поливом корневой системы растения. Данная технология осуществляется ранней весной с максимальным использованием влаги, аккумулированной в осенне-зимний период, она позволяет управлять агрофоном при машинном сборе хлопка-сырца, а также дает возможность экономить воду для полива. Экономический эффект предлагаемого способа определяется снижением затрат труда и издержек на пересевы, совмещением операций адресного внесения удобрений и посева, повышением урожайности и качества уборочных работ за счет лучшего агрофона (прямолинейность кустов в рядке).

Реализация предлагаемого способа полива позволит наряду с экономией воды и удобрений, присущих капельному орошению, значительно упростить конструкцию поливного шланга и повысить срок его службы, что, естественно, благотворно повлияет на эффективность производства поливного шланга и продукции сельскохозяйственных культур.

Список использованных источников

1. Кондратюк, В. П. Возделывание хлопчатника на грядах и гребнях / В. П. Кондратюк, Ю. А. Погосов // Хлопководство. – 1980. – № 4. – С. 15–17.

2. Погосов, Ю. А. Рекомендации по возделыванию хлопчатника на гребнях / Ю. А. Погосов, Н. Ш. Шарипов, А. М. Кундузов. – М. : ЦНИИТИ, 1982.

3. Сергиенко, В. А. Исследование рабочих органов хлопкового культиватора : автореф. дис. … канд. техн. наук / Сергиенко Василий Анисимович. – Узбек. акад. с.-х. наук. Ташк. ин-т инженеров ирригации и механизации сел. хозяйства ТИИИМСХ. – Ташкент, 1959. – С. 10–22.

4. Рудаков, Г. М. Технологические основы механизации сева хлопчатника / Г. М. Рудаков. – Ташкент : Фан, 1974. – 284 с.

5. Хлопчатник: интенсивная технология. – М. : Агропромиздат, 1988. – 65 с.

6. Земля становится теплее / Умаров Г. Я. [и др.] // Сельское хозяйство Узбекистана. – 1975. – № 1. – С. 28–29.

7. Полезная модель РУз № FAP00396. Устройство для посева пропашных культур / Э. Х. Сайфи, П. Т. Бердимуратов, Р. Д. Халилов [и др.] // Расмий ахборотнома. – 2008. – № 9 (89).

8. Калинин, А. Б. Мировые тенденции и современные технические системы для возделывания картофеля : учеб. пособие / А. Б. Калинин, В. А. Ружьев, И. З. Теплинский. – СПб. : Проспект Науки, 2024. – 160 с.

9. Шаймарданов, Б. П. Ғўза парваришида томчилатиб сугориш усулида агрофонини бошкариш имкониятлари (О возможности управления агрофоном способом капельного орошения при возделывании хлопчатника) / Б. П. Шаймарданов, Р. Д. Матчанов [и др.] // AGRO ILM. – 2017. – № 6 (50 SON) – 13 с. – URL: https://www.researchgate.net/publication/362173071_Agro_ilm_-_kh_zur_2017-No650_son (дата обращения: 15.10.2025).

10. Хамидов, М. Х. Ғўзани суғоришда томчилатиб суғориш технологиясини қўллаш / М. Х. Хамидов, Б. У. Суванов // Irrigftsiya va Melioratsiya jurnali/. – Тошкент, 2018. – № 4 (14). – С. 9–11.

11. Умурзоқов, У. П. Сув танқисчиллиги шароитида қишлоқ хўжалик ишлаб хўжалик ишлаб чиқаришини ривожлантириш истиқболлари / У. П. Умурзоқов, А. К. Ахмедов // Irrigftsiya va Melioratsiya jurnali. – Тошкент, 2015. – № 1. – С. 94–96.

12. Патент UZ IAP 06312. Сеялка для посева на грядках : № IAP 2016 0324 № (22) : заявлено 19.08.2016 : опубл. 14.10.2020(21) / Шаймарданов Б. П., Шаймарданов Х. Б. [и др].

13. Серикбаев Б. С. Расчет режима капельного орошения хлопчатника нового сорта «Султан» // Irrigftsiya va Melioratsiya jurnali / Б. С. Серикбаев, А. Т. Бутаяров. – Тошкент, 2019. – № 2 (16). – С. 10–14.

14. Патент UZ IAP 06314 : Поливной шланг для капельного орошения и способ его укладки : № IAP 2017 0013 № (22) : заявлено 12.01.2017 : опубл. 14.10.2020. (21) / Шаймарданов Б. П., Шаймарданов Х. Б., Матчанов Р. Д. [и др.].

15. Эгамбердиева, Ш. А. Низконапорная система капельного орошения нового поколения / Ш. А. Эгамбердиева, Ф. А. Бараев, С. Б. Ғўломов // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М., 2013. – С. 112–114.

16. Шаймарданов, Б. П. Разработка технологии гребневого выращивания хлопчатника с адресным и равномерным увлажнением корневой системы растения / Б. П. Шаймарданов, К. О. Шавазов, Б. Усманалиев // Irrigftsiya va Melioratsiya jurnali. – Тошкент, 2020. Махсус сон.-Б. С. 27–32. – URL: https://jurnal.tiiame.uz/storage/web/source/1/6.%20%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2/2020/%2B%2Bmaxsus2020.pdf (дата обращения: 15.09.2025).

СОДЕРЖАНИЕ

Жилич Е. Л., Комлач Д. И., Рогальская Ю. Н., Никончук В. В., Бернацкая Д. В. Автоматизированное доение: использование и перспективные направления развития 3

Жилич Е. Л., Комлач Д. И., Рогальская Ю. Н. Применение роботизированных систем в технологиях промышленного доения коров 8

Клыбик В. К., Ракевич Ю. А. Упрощенная модель геометрической формы вымени коров 16

Жилич Е. Л., Рогальская Ю. Н., Никончук В. В., Бернацкая Д. В. Результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных конструктивных и технологических параметров устройства для дистанционного определения промеров тела и живой массы крупного рогатого скота 20

Никончук В. В., Цалко С. А. Бернацкая Д. В. Результаты приемочных испытаний самоходной машины для обслуживания кормового стола крупного рогатого скота МСКС 29

Лепешкин Н. Д., Микульский В. В., Бегун П. П., Мижурин В. В. Результаты приемочных испытаний агрегата почвообрабатывающего модульного АМП-6 33

Перепечаев А. Н., Пылило И. С., Тарима А. С. Влияние оснащенности техникой на эффективность возделывания льна 39

Курилович М. И., Голдыбан В. В, Селиванова В. П. Моделирование процесса отделения некондиционных клубней картофеля струей сжатого воздуха 43

Курилович М. И. Обоснование геометрии вальцов для устойчивого вращения клубней картофеля в оптических сортировочных машинах 49

Жешко А. А., Голдыбан В. В., Герасюто С. Л. Особенности построения имитационной модели процесса внесения твердых минеральных удобрений роботизированной платформой 54

Азаренко В. В., Жешко А. А., Бондаренко Д. Н., Бегун П. П. Результаты исследования аэродинамических свойств твердых минеральных удобрений 60

Селиванова В. П., Комлач Д. И., Голдыбан В. В., Курилович М. И. Требования к системе распознавания растений для прецизионного внесения гербицидов в условиях автономного вождения 70

Селиванова В. П., Комлач Д. И., Голдыбан В. В., Курилович М. И. Анализ морфологических признаков и стадий онтогенеза сорных растений в задачах автоматизированного распознавания 75

Жилич Е. Л., Рогальская Ю. Н., Никончук В. В., Бернацкая Д. В. Современные устройства, предназначенные для зоотехнического учета свиней в режиме реального времени 80

Жилич Е. Л., Цалко С. А. Контроль качества кормов 86

Дыба Э. В., Хартанович А. М. Анализ технологий заготовки сурепицы на зеленый корм 92

Дыба Э. В., Хартанович А. М. Оценка качества валкования сурепицы гребенчатыми граблями методом регрессионного анализа 100

Дыба Э. В., Хартанович А. М. Результаты проведения исследований по определению засорения формируемых валков сурепицы 110

Юрин А. Н., Комлач Д. И., Захаров А. В., Шевцов А. А. Исследование процесса роботизированной прополки питомников 118

Юрин А. Н., Захаров А. В., Тодоров Е. Ю. Обоснование способа определения качества плодов при их сортировке 121

Лепешкин Н. Д., Микульский В. В., Мижурин В. В. Исследование основных факторов, влияющих на качество высева механическими сеялками с централизованным бункером 127

Лепешкин Н. Д., Микульский В. В., Мижурин В. В. Экспериментальная установка и приборы для исследования процесса двухступенчатого дозирования посевного материала к сошникам механической сеялки с централизованным бункером 136

Лепешкин Н. Д., Микульский В. В., Мижурин В. В. Результаты исследования дробления семян элементами системы высева механической широкозахватной сеялки с централизованным бункером 140

Лепешкин Н. Д., Шупилов А. А., Синяк Ю. В. Формирование условий для влагообеспечения посевов зерновых культур при основной безотвальной обработке почвы 147

Непарко Т. А., Ловкис В. Б., Быков Н. Н., Дыба Э. В. Ленточный валкователь: функциональные показатели 150

Непарко Т. А., Ловкис В. Б., Быков Н. Н., Дыба Э. В. Ленточный валкователь: эксплуатационные показатели и экологичность производства 158

Ленский А. В., Жешко А. А. К вопросу оценки эффективности обработки кукурузы от насекомых-вредителей при помощи агродрона 163

Ленский А. В., Бойко С. В., Жешко А. А., Немкевич М. Г. Результаты экспериментальных исследований по оценке технологических параметров работы агродрона при инсектицидных обработках кукурузы 174

Дыба Э. В., Трофимович Л. И., Хартанович А. М. Совершенствование процесса подбора и загрузки рулонов на транспортную платформу 183

Дыба Э. В., Яровенко П. В., Хартанович А. М. Анализ результатов экспериментальных исследований макетного образца устройства для снятия полимерных материалов с запрессованных кормов 188

Дыба Э. В., Хартанович А. М., Пунько А. Н., Кошля Г. И. Разработка методики экспериментальных исследований по обоснованию оптимальных параметров автоматизированного захватывающего устройства 195

Дыба Э. В., Хартанович А. М., Пунько А. Н., Кошля Г. И. Анализ результатов экспериментальных исследований по обоснованию оптимальных параметров автоматизированного захватывающего устройства 204

Капустин Н. Ф., Клыбик В. К., Ракевич Ю. А. Исследование влияния расхода воздуха и времени процесса самосогревания твердого сепарированного навоза крупного рогатого скота на его температуру ... 213

Капустин Н. Ф., Клыбик В. К., Ракевич Ю. А. Влияние температуры самосогревания твердого сепарированного навоза крупного рогатого скота на его теплопроводность и влагопоглощающую способность 218

Кольга Д. Ф., Быков Н. Н., Костюкевич С. А., Кунц В. В., Жилич Е. Л. Оптимизация потребления сухого вещества и влажности кормовой смеси при кормлении коров 221

Бурдейко В. А., Ловкис В. Б., Дыба Э. В. Теоретические предпосылки исследования процесса очесывания особей колорадского жука конической щеткой машины 228

Горгодзе А. Р. Предложения по обновлению тракторного парка в агропромышленном комплексе Российской Федерации на основе статистических данных 234

Капустин Н. Ф., Китиков В. О. Эколого-экономический эффект технологии анаэробной очистки сточных вод на очистных сооружениях 238

Тарасенко В. Е., Жешко А. А., Гаврукович П. А. Анализ средств контроля основных параметров автотракторных двигателей 241

Тарасенко В. Е., Жешко А. А., Буслаев В. Д. Мониторинг состояния масла автотракторных двигателей на современном этапе 250

Тарасенко В. Е., Жешко А. А., Барташевич А. Л. Математическая обработка экспериментальных данных наблюдений за отказами топливных насосов дизелей 258

Жилич Е. Л., Мазур А. М., Торган А. Б., Таразевич Е. В., Кольга Д. Ф., Костюкевич С. А. Исследование технологических параметров производства концентрата квасного сусла и кваса из картофеля... 268

Мисун Ал-й Л., Азаренко В. В. К вопросу обоснования агрегированных параметров и динамики состояния производственной среды агропроизводства в оценке ее безопасности 275

Андруш В. Г., Шелегова Е. В., Володкевич В. И., Быстрова В. А. Применение регрессионной трехмерной модели для прогнозирования риск-факторов травмирования в животноводстве 283

Тарасенко В. Е., Жешко А. А. Обработка данных вибродиагностики топливной форсунки с боковым приводом топлива 290

Мисун Л. В., Гаркуша А. В., Мисун Ал-р Л. Исследование уровней шума в кабине трактора в послегарантийный период эксплуатации 296

Мисун Л. В., Гаркуша А. В., Мисун Ал-р Л. Обоснование способов и технических средств для снижения уровня шума в кабине трактора 304

Мисун Ал-й Л., Гаркуша А. В., Мисун Ал-р Л. Моделирование профессиональной безопасности операторов мобильной сельскохозяйственной техники (на примере тракториста-машиниста) 311

Мисун Ал-й Л. Идентификация факторов, расчет, контроль и выбор стратегии управления производственными рисками на примере эксплуатации кормоуборочных комбайнов..... 318

Мисун Ал-й Л. Моделирование целенаправленных безопасных движений оператора мобильной сельскохозяйственной техники при выполнении регулировочных технологических воздействий..... 333

Фадеев Д. Г., Шишин Д. А., Прокофьев С. В., Попов Р. А., Великанова И. В. Обоснование разработки измельчителя растительных остатков лубяных культур 343

Алтыбаев А. Н. Алгоритм формирования управляющей информации для автоматизированной системы дифференцированного внесения удобрений..... 347

Бердимуратов П. Т., Таджимуратова А. П., Ловкис В. Б., Непарко Т. А. Обоснование параметров гребня и конструкции формовщика для технологии точного и штучного высева семян хлопчатника..... 355

Шаймарданов Б. П., Бердимуратов П. Т., Ловкис В. Б, Непарко Т. А. Технологическая схема точного и штучного высева семян хлопчатника..... 360

Научное издание

МЕХАНИЗАЦИЯ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Межведомственный тематический сборник

Основан в 1968 году

Выпуск 59

Редакторы *А. Л. Маслякова, Т. А. Матох*
Художественный редактор *Ю. П. Барабанова*
Технический редактор *О. А. Ткачёва*
Компьютерная верстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 26.05.2026. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 43,01. Уч.-изд. л. 28,2. Тираж 100 экз. Заказ 96.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельства о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013, № 2/196 от 05.04.2017.
Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск.