

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 канонів 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-

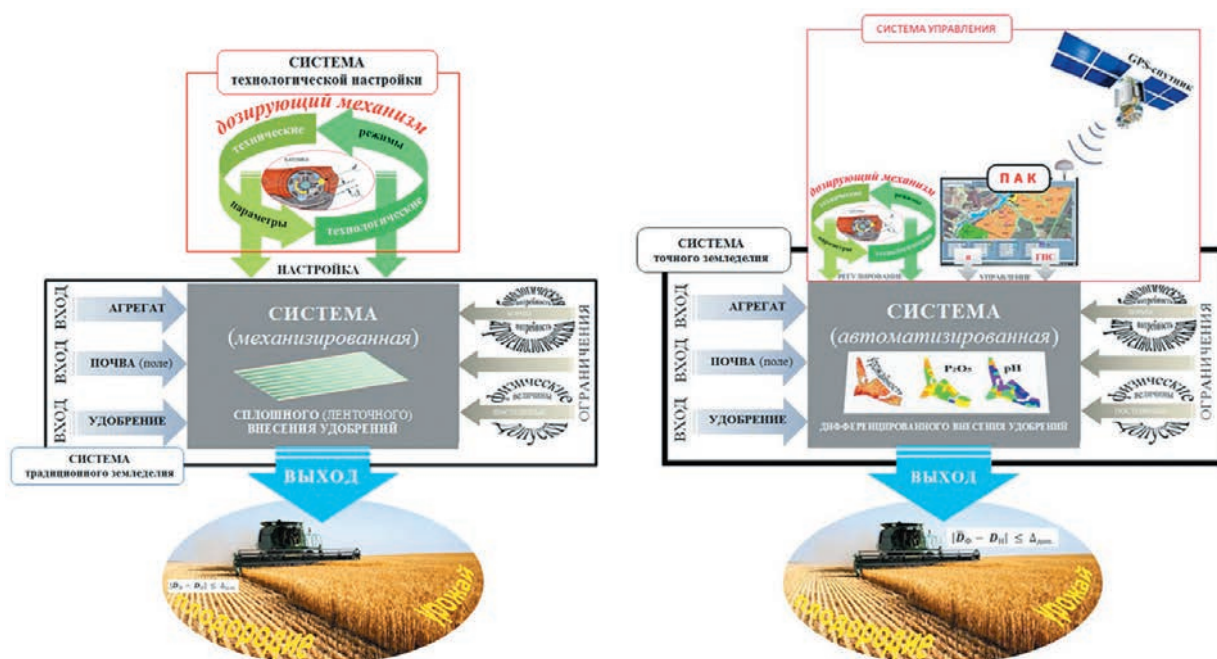


Рисунок 1 – Эволюция системы управления технологическим процессом при внесении удобрений

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

$$|\bar{D}_\Phi - D_H| \leq \Delta_{\text{доп}},$$

где $\bar{D}_\Phi$ – фактическое значение статистической характеристики качества выполнения технологической операции (посев семян, внесение удобрений), кг/га; D_H – 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).

$$V_{\text{лоб}} = z \frac{k \pi d^2}{2 \cdot 4} l, \text{ м}^3/\text{об}, \quad (1)$$

где z – количество рабочих органов посевного агрегата; k – количество дозирующих желобков; d – диаметр дозирующего желобка; l – длина дозирующего желобка.

При этом масса

$$m_{\text{лоб}} = V_{\text{лоб}} \gamma, \text{ кг/об}, \quad (2)$$

где γ – удельная объемная масса сыпучего материала.

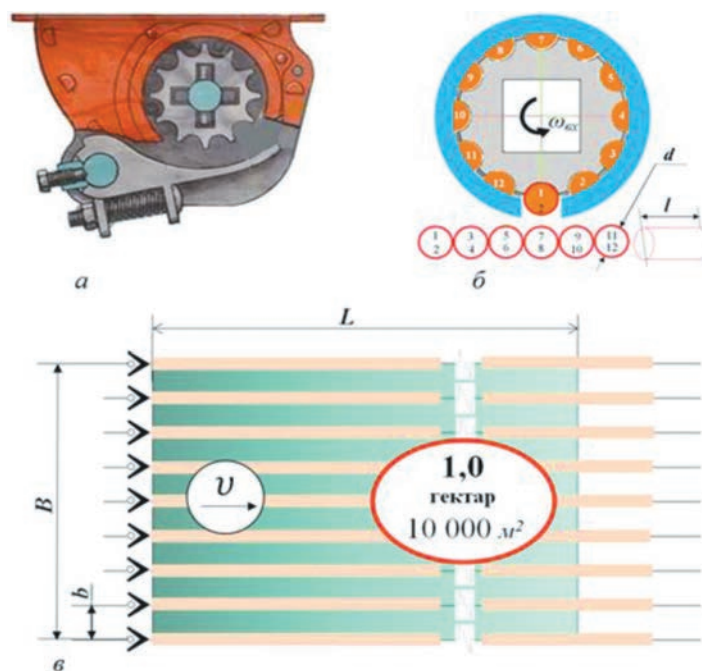


Рисунок 2 – К определению управляющего параметра дозирующего механизма: *а* – конструкция дозирующего механизма; *б* – абстракция дозирующего механизма; *в* – схема машинной технологии выполнения операции

Технологическая длина пути прямолинейного движения данного агрегата для выполнения работы на 1 га площади составляет (рисунок 2, *в*)

$$L_{\text{га}} = \frac{s_{\text{га}}}{B}, \text{ м}, \quad (3)$$

где $s_{\text{га}}$ – площадь, равная 1 га = 10 000 м²; B – рабочая ширина технологической (рабочей) машины.

Технологическое время при заданной скорости агрегата в соответствии с агротехническими требованиями

$$t_{\text{га}} = \frac{L_{\text{га}}}{v_{\text{АТ}}}, \text{ мин}, \quad (4)$$

где $v_{\text{АТ}}$ – 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

$$n_{\text{га}} = \frac{M_{\text{Н}}}{m_{\text{лоб}}}, \text{ об.}, \quad (5)$$

где $M_{\text{Н}}$ – масса назначенной нормы внесения удобрений.

Управляющая (командная) информация на входе дозирующего механизма:

$$n_{\text{вх}} = \frac{n_{\text{га}}}{t_{\text{га}}}, \text{ об/мин}, \quad (6)$$

или с учетом (1) – (5) после несложных преобразований получим:

$$n_{\text{вх}} = \prod_{j=1}^{\lambda} \mu_j \frac{M_{\text{Н}} B v_{\text{АТ}}}{\pi z k d^2 l \gamma}, \text{ об/мин}, \quad (7)$$

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	v_{AT}	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:

$$n_{вх} = \xi \cdot \prod_{j=1}^{\lambda} \mu_j \cdot \frac{M_H B v_{AT}}{\pi z k d^2 l \gamma}, \text{ об/мин,} \quad (8)$$

где ξ – передаточное число привода.

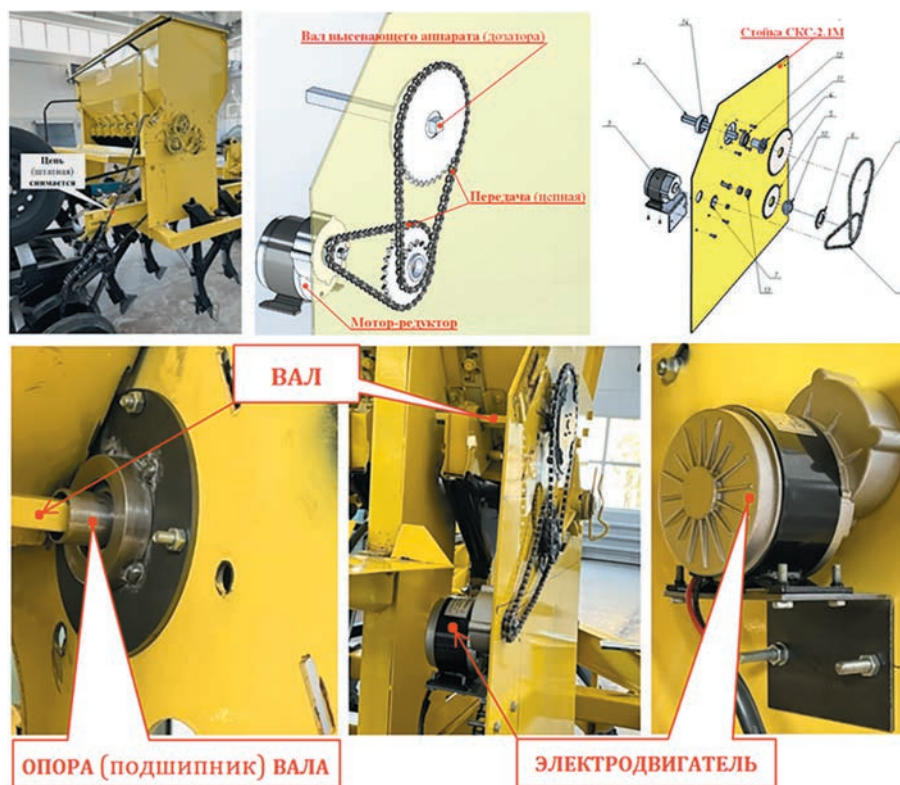


Рисунок 4 – Проектирование и монтаж привода

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. Baumanе // – Engineering for rural development. – 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. Рзаев [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).