

**А. А. Жешко, А. В. Ленский, В. И. Володкевич, А. В. Шах**

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: azeshko@gmail.com*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНА**

*Аннотация.* В статье представлены классификация и структура материальных потоков в технологиях возделывания зерновых культур, рассмотрены имитационные модели процесса уборки зерновых культур на рабочем участке.

*Ключевые слова:* зерноуборочный комбайн, имитационная модель, материальные потоки, технологии производства зерна.

**A. A. Zheshko, A. V. Lenski, V. I. Volodkevich, A. V. Shah**

*RUE “SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization”  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: azeshko@gmail.com*

## **THE RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE MOVEMENT OF MATERIAL FLOWS IN GRAIN PRODUCTION TECHNOLOGIES**

*Abstract.* The classification and structure of material flows in the technologies of cultivation of grain crops are presented, simulation models of the process of harvesting grain crops at the workplace are considered.

*Keywords:* combine harvester, simulation model, material flows, grain production technologies.

### **Введение**

Эффективная организация ресурсного обеспечения сельскохозяйственных предприятий позволяет получить существенный экономический эффект, таким образом логистика в агропромышленном комплексе является не только наукой, но и практикой управления материальными, информационными, трудовыми, энергетическими, финансовыми и другими видами ресурсов. Прогнозирование и планирование производства в растениеводческой сфере является актуальной задачей как для отдельных сельскохозяйственных организаций, так и для агропромышленного комплекса в целом.

### **Основная часть**

*Классификация и структура материальных потоков в технологиях возделывания зерновых культур.* Сельскохозяйственное предприятие можно рассматривать как сложную динамическую систему, которая активно взаимодействует с другими надсистемами. Реализация технологии производства зерновых культур предполагает перемещение основной и побочной продукции – семян, пестицидов, удобрений, запчастей для ремонта и обслуживания тракторов и сельскохозяйственных машин, горюче-смазочных материалов и других ресурсов – в течение определенного периода времени в результате применения к ним логистических операций, таких как погрузка, перегрузка, затаривание и др. При этом необходимо отметить, что материальные потоки являются вещественными объектами, которые находятся в динамическом процессе обработки [1], трансформации, движении. В случае размещения материального объекта на складе он становится материальным запасом.

Между потоками и запасами есть взаимосвязь, поэтому управление запасами также имеет высокую значимость и может составлять 20–40 % от общих логистических издержек. Поддержание запасов на нижнем необходимом уровне позволяет реализовать концепцию управления «точно в срок», что в конечном итоге является основой «стройного производства» зерновой продукции [1].

Механизм взаимосвязи материальных потоков и запасов основан на том, что запас можно рассматривать как поток, скорость движения которого является нулевой. Запас не может появиться без формирующего его потока материальных ресурсов, в то время как ресурс можно понимать, как движущийся к необходимому месту запас [2, с. 37].

$$F = \frac{dS}{dt}, \quad (1)$$

где  $F$  – материальный поток;  $S$  – запас;  $t$  – время.

Таким образом, величина материального потока определяется как первая производная запаса по времени, тогда из формулы (1) величина запаса будет определяться как определенный интеграл [2, с. 37]:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} F dt, \quad (2)$$

где  $t_0, t_1$  – соответственно начало и конец рассматриваемого периода.

Классификация и структура материальных потоков в технологиях возделывания зерновых культур представлена на рисунке 1.

В зависимости от *направления* перемещения потоков для технологии производства зерновых культур как динамической системы можно выделить *входящие* потоки, которые поступают извне – топливо, удобрения, пестициды, запчасти, а также *выходной* поток, который реализуется сельскохозяйственным предприятием – зерно.

К *сложным* материальным потокам в технологии возделывания и уборки пшеницы можно отнести поток разных запасных частей, в которые могут входить валы, подшипниковые опоры, натяжные ремни, шкивы, электрооборудование, рабочие органы и многие другие элементы для ремонта сельскохозяйственной техники. К *простым* следует отнести однопродуктовые материалы, например, удобрения, пестициды, семена.

В зависимости от отношения к логистической системе, можно выделить *внутренний* поток, например, в рассматриваемом случае незерновая часть урожая пшеницы перемещается внутри сельскохозяйственного предприятия. *Внешним* потоком можно считать зерно, которое впоследствии идет на продажу.



Рисунок 1 – Классификация и структура материальных потоков в технологиях возделывания зерновых культур

В зависимости от агрегатного состояния и способа транспортировки материальных ресурсов можно выделить твердые навалочные, твердые насыпные, штучные, жидкие наливные, а также газообразные грузы.

К *детерминированным* материальным потокам относят те, характеристики которых известны и заранее поддаются подсчетам, например, процесс отпуска пестицидов со склада, в зависимости от определенной дозы и предварительных расчетов. К *стохастическим* потокам можно отнести зерновую часть урожая, которую заранее можно прогнозировать, но точный результат можно получить только по факту после завершения процесса уборки.

*Непрерывные* потоки представляют собой фиксированное количество объектов, которые перемещаются через определенное пространство. Однако для сельскохозяйственного производства более характерен дискретный режим перемещения материальных ресурсов, когда объекты движутся с паузами и перерывами [3; 4, с. 17].

Каждому виду материальных потоков, представленных на рисунке 1, соответствует определенный информационный поток, который отражается в сопроводительной документации, картах маршрутов, данных с GPS-трекеров. При этом информационный поток может запаздывать или опережать связанный с ним информационный поток, либо выполняться одновременно с ним, т. е. синхронно. Таким образом для управления материальным потоком генерируется соответствующий информационный поток, который может существовать на различных типах носителей и в различной форме.

В зависимости от вида носителя информации можно выделить информационные потоки, передаваемые электронными каналами связи, а также существующие на бумажных и цифровых носителях. По назначению выделяют директивные информационные потоки, которые служат для управления основным материальным потоком, а также нормативно-справочные и учетно-аналитические, которые предоставляют справочную и аналитическую информацию. Режим обмена информацией может осуществляться как онлайн, так и офлайн. Также различия могут быть в способе доставки информации: почтой, курьером, различными электронными способами связи. Отдельно можно выделить информационные потоки в зависимости от степени секретности: закрытые и открытые.

В пределах любой логистической системы помимо информационных осуществляется также движение финансовых потоков, которые представляют собой направленное движение в пределах рассматриваемой системы, а взаимодействуют с надсистемами. Финансовые потоки могут направляться на закупку материалов и сырья, приобретение ценных бумаг и товаров, оплату труда рабочих. Движение финансовых потоков может осуществляться горизонтально – между одноуровневыми звеньями, а также на различных уровнях иерархии. Форма расчета может быть денежной, информационно-финансовой и учетно-финансовой.

Кроме перечисленных потоков существуют тесно связанные с ними сервисные и грузовые потоки. Сервисный поток представляет собой движение различных услуг, оказываемых потребителям за определенный период. Разновидностью последних являются грузовые потоки, представляющие собой движение груза по конкретному маршруту в рассматриваемый промежуток времени.

Для эффективной организации и управления производственным процессом, а также для планирования в растениеводстве применяют обобщенные расчеты по сводным показателям за определенный временной промежуток [5]. Вычисления могут производиться с использованием линейных, нелинейных или динамических моделей. Например, при возделывании зерновых культур известна прибыль от их реализации. Также известны нормы расхода материальных ресурсов, которые необходимо использовать для возделывания заданного объема. Таким образом необходимо разработать план производства, который будет обеспечивать максимальную прибыль при наименьших издержках [5, 6].

$$P = \sum_{j=1}^n p_j x_j \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2, \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m, \\ x_j \leq r_j, \\ x_j \geq d_j, j = \overline{1, n} \end{cases},$$

где  $n$  – число производимых зерновых культур в хозяйстве;  $m$  – число имеющихся ресурсов различных видов;  $b_i$  – запас ресурса вида  $i$ ;  $a_{ij}$  – норма расхода  $i$ -го ресурса для производства  $j$ -го вида зерновых культур;  $r_j$  – спрос на производство  $j$ -го вида зерновых культур;  $d_j$  – требования заказчика на объем производства  $j$ -го вида зерновых культур;  $p_j$  – прибыль от реализации зерновой культуры вида  $j$ ;  $P$  – общая прибыль.

Таким образом модель (3) выражает план производства, обеспечивающий максимальный объем прибыли с учетом ограниченности в ресурсах, спроса и требования заказчиков, выраженных неравенствами.

Необходимо отметить, что для оценки эффективности логистической деятельности сельскохозяйственного предприятия должно соблюдаться 7 условий применительно к производству зерновых культур это: зерно как товар в необходимом количестве и требуемого качества должно доставляться заказчику в конкретное место и нужное время с наименьшими затратами [6, с. 37–45].

Одним из наиболее информативных и наглядных способов представления процесса движения зерновой части урожая является построение диаграмм состояния, представленных на рисунках 2–5, что является основой имитационного моделирования движения зерна как материального потока. Имитационное моделирование представляет собой процесс создания и последующего анализа цифрового прототипа физической модели с целью изучения ее интересующих свойств и параметров. При этом имитационная модель должна точно описывать физическую модель, что позволяет получать необходимую информацию об изучаемой системе путем проведения экспериментов. Если результаты экспериментов над имитационной и физической моделями имеют минимальное расхождение, то построенная модель считается адекватной [7, с. 3]. Адекватность модели всегда зависит от цели моделирования, поскольку цифровой прототип не учитывает некоторые свойства физической модели и является ее абстракцией [8, с. 1]. В этой связи важным этапом в процессе моделирования является выделение наиболее важных и абстрагирование от менее существенных свойств физической модели.

Существует несколько принципов, на которых можно строить модели. Например, моделирование систем с дискретными событиями, системная динамика, построение динамических систем, а также агентное моделирование [9–12].

Дискретно-событийное моделирование характерно для систем с иерархической последовательностью технологических операций. Системная динамика подходит для исследования сложных систем и данный метод можно комбинировать с дискретно-событийными моделями. Агентное моделирование позволяет исследовать свойства отдельных агентов и изучать их воздействие на всю систему. Данный подход можно реализовать совместно с другими методами имитационного моделирования.

Анализ литературных источников [12–17] показал, что изучение процессов, связанных с механизацией сельскохозяйственного производства, проводится комбинированными методами, основанными на подходах агентного моделирования. В этой связи для исследования процесса уборки зерновых культур использовалась доработанная агентная модель Harvest Simulator [17] с уточненными параметрами и условиями выполнения технологического процесса. Модель состоит из агента верхнего уровня Main, на диаграмме которого располагаются геометрические примитивы, обозначающие рабочий участок, места стоянки техники, элеватор и другие объекты. Агентами являются зерноуборочный комбайн, перегрузчик зерна, который осуществляет забор материала от комбайна в поле и его транспортировку к месту перегрузки, а также зерновоз, который доставляет материал к месту послеуборочной доработки.

На рисунке 2 представлена диаграмма состояния процесса движения комбайна, для которой характерны следующие состояния:

- находится в состоянии покоя на стоянке на машинном дворе;
- движется к полю в начале смены;
- осуществляет движение по убираемому полю (вложенные состояния отвечают за движение комбайна в необходимом направлении);
- приостанавливается в момент заполнения бункера в ожидании перегрузчика зерна;
- движется к стоянке по завершении уборки рабочего участка.

Параллельно с диаграммой состояния движения комбайна выполняется контроль за наполнением его бункера (рисунок 3). При этом для диаграммы наполнения бункера в момент уборки характерны состояния:

- заполнение бункера;
- ожидание перегрузчика;
- перегрузка материала с одновременным заполнением бункера при движении с перегрузчиком.

Согласно плану моделирования начальной точке соответствует левый нижний угол прямоугольника, обозначающего рабочий участок. Поэтому для определения координаты начала рабочего хода используется выражение:

$$\begin{cases} x = x_p + B / 2 \\ y = y_p + L \end{cases}, \quad (4)$$

где  $x_p, y_p$  – координаты точки, определяющей положение прямоугольника на диаграмме типа агента Main;  $B$  – ширина захвата жатки зерноуборочного комбайна, м.

При инициализации модели комбайн находится на стоянке, а затем начинает перемещение к полю. Поэтому при запуске модели вычисляются координаты положения центра фигуры, которая обозначает место стоянки.

Переходы в различные состояния во время движения комбайна и наполнения его бункера осуществляются при получении сообщений, которые генерируются во время моделирования

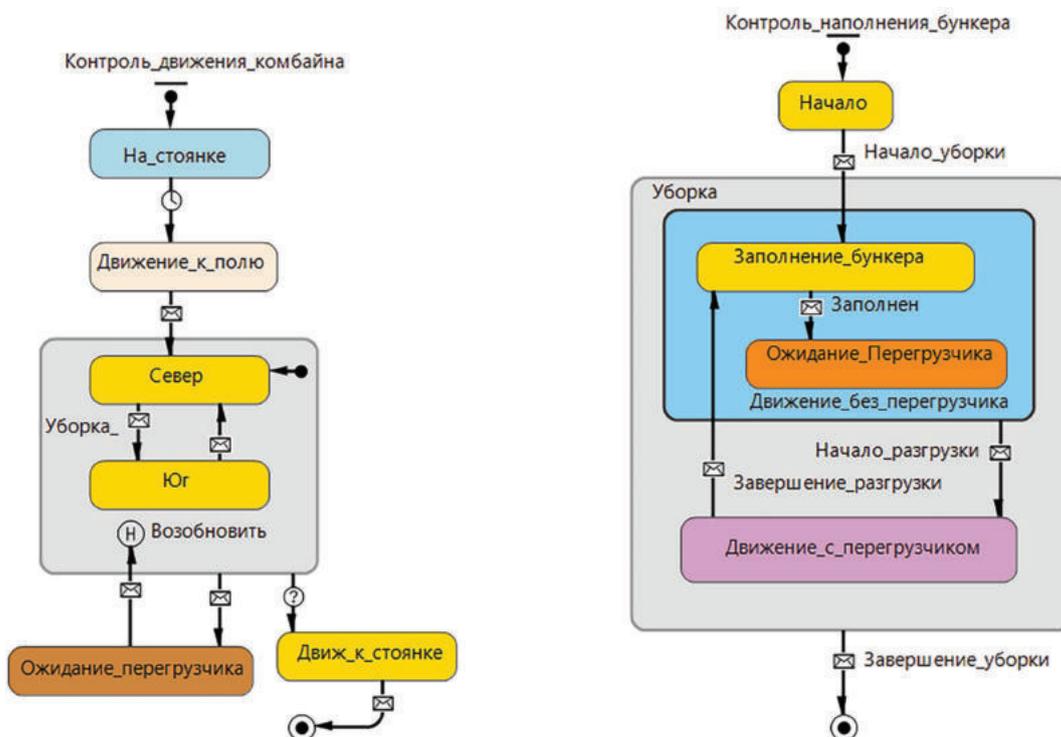


Рисунок 2 – Диаграмма состояния движения комбайна

Рисунок 3 – Диаграмма состояния наполнения бункера комбайна

в коде переходов и состояний. Переход из состояния пребывания на стоянке к движению к полю осуществляется с помощью перехода по таймингу без задержки. Выход из состояния уборки, начало движения к стоянке осуществляется с помощью перехода по выполнению условия:

$$x \geq x_p + A + B/2, \quad (5)$$

где  $A$  – ширина прямоугольника, обозначающего границы рабочего участка, м.

Поскольку на диаграмме типа агента Main поле задается с помощью графического примитива – прямоугольника, положение которого определяется координатами его верхнего правого угла, для отображения на поле в случайном порядке точек, обозначающих хлебостой используются прямоугольники с координатами  $x_{hi}, y_{hi}$ . При запуске модели их координаты генерируются в случайном порядке функцией `uniform`:

$$f(x_{hi}) = \frac{1}{A-2}, \quad 0 < x_{hi} < A-2, \quad (6)$$

$$f(y_{hi}) = \frac{1}{L-2}, \quad 0 < y_{hi} < L-2,$$

где  $L$  – длина гона (высота прямоугольника), м.

Диаграмма, характеризующая процесс движения перегрузчика, представлена на рисунке 4. Основными состояниями являются: ожидание команды, поступающей с диаграммы движения комбайна (рисунок 2) в момент его остановки; загрузка с одновременным движением с комбайном с учетом изменения направления его движения для чего служит внутренний переход; движение к месту перегрузки, которое осуществляется при условии срабатывания сразу трех переходов при получении сообщений с других диаграмм. Состояние, когда данный агент находится на перегрузке, состоит из вложенных состояний – ожидание зерновоза и перегрузка зернового материала, переход между которыми осуществляется по таймингу с дополнительным условием, а также при получении сообщений.

Диаграмма, характеризующая процесс движения агента зерновоза, представлена на рисунке 5. Данный агент находится на месте перегрузки и имеет два вложенных состояния: загрузка,

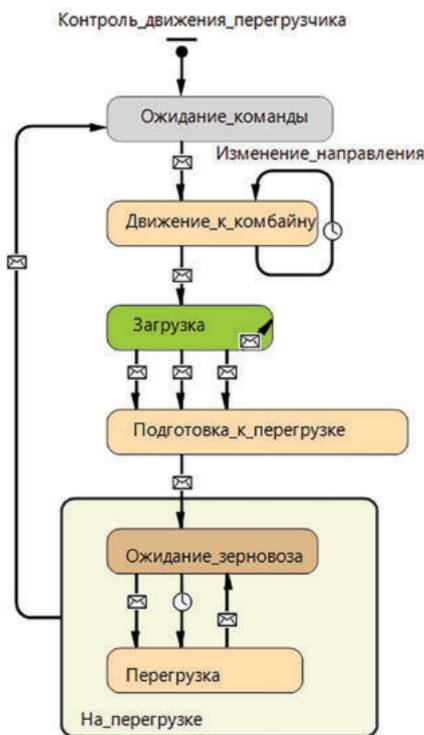


Рисунок 4 – Диаграмма состояния процесса движения перегрузчика

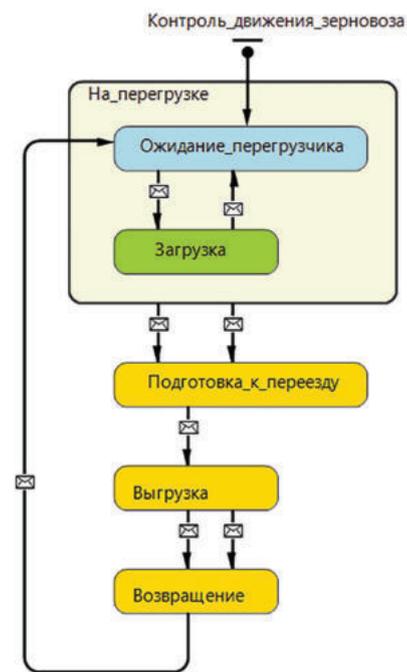


Рисунок 5 – Диаграмма состояния процесса движения зерновоза

когда перегрузчик подвозит новую порцию материала и его ожидания, при движении перегрузчика в поле за новой партией материала. Переходы осуществляются при получении сообщений с элементов диаграмм состояния. Когда кузов зерновоза заполнен, он перемещается к месту послеуборочной обработки зерна и после разгрузки возвращается обратно. Данные события отражены на диаграмме состояния 47 в виде блоков: подготовка к переезду, выгрузка и возвращение.

Для дополнительного контроля за состоянием наполнения бункера комбайна, а также кузовов перегрузчика и зерновоза используются элементы библиотеки моделирования потоков. Для этих целей используется элемент Tank (бункер), при наполнении и опустошении которого генерируются соответствующие сообщения для диаграмм состояния. Максимальная скорость на выходе соответствует скорости перегрузки зерна. А также элементы Fluid Enter и Fluid Exit, которые направляют и принимают поток к бункеру соответственно.

### Заключение

Таким образом в статье предложена классификация и структура материальных потоков в технологиях возделывания зерновых культур, на примере движения зерновой части урожая представлена имитационная модель процесса уборки.

Согласно итогам имитационного моделирования и сопоставления полученных данных с протоколами испытаний зерноуборочных комбайнов была подтверждена высокая сходимость полученных результатов. Например, для зерноуборочного комбайна расхождение по удельному расходу топлива составило 1,8 %, по производительности – 5,9 %.

Исследования выполнены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор с БРФФИ № Т23МН-004 от 02.05.2023 г.).

### Список использованных источников

1. Галяутдинов, Р. Р. Механизмы взаимодействия потоков и запасов на предприятии с точки зрения логистики / Р. Р. Галяутдинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – 2016. – Т. 10, № 1. – С. 157–163.
2. Ивуть, Р. Б. Логистика / Р. Б. Ивуть, С. А. Нарушевич. – Минск : БНТУ, 2004. – 328 с.
3. Григорьев, М. Н. Логистика. Базовый курс : учебник / М. Н. Григорьев, С. А. Уваров. – М. : Юрайт, 2011. – 782 с.
4. Левкин, Г. Г. Логистика в АПК : учеб. пособие / Г. Г. Левкин. – 2-е изд. – М. : Берлин : Директ-Медиа, 2014. – 245 с.
5. Скитер, Н. Н. Логическое моделирование производственных процессов в растениеводстве / Н. Н. Скитер, Т. В. Плещенко, Т. В. Склямина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2007. – № 3 (7).
6. Кокунова, И. В. Особенности использования логистического подхода в агропромышленном комплексе / И. В. Кокунова // Известия Великолукской ГСХА. – 2015. – № 3.
7. Лимановская, О. В. Имитационное моделирование в AnyLogic 7 : учеб. пособие в 2 ч. / О. В. Лимановская. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – Ч. 1. – № 3. – С. 37–45.
8. Леонова, Н. Л. Имитационное моделирование : конспект лекций / Н. Л. Леонова ; СПбГТУРП. – СПб., 2015. – 94 с.
9. Боев, В. Д. Моделирование в AnyLogic : пособие для практ. занятий / В. Д. Боев. – СПб. : ВАС, 2016. – 412 с.
10. Боев, В. Д. Компьютерное моделирование : пособие для практ. занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7 / В. Д. Боев. – СПб. : ВАС, 2014. – 432 с.
11. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для академич. бакалавриата / А. С. Акопов. – М. : Юрайт, 2014. – 389 с.
12. Ivanov, D. Operations and Supply Chain Simulation with AnyLogic. Decision-oriented introductory notes for management students in bachelor and master programs / D. Ivanov // E-Textbook, Berlin School of Economics and Law. – 2017. – P. 97.
13. Худякова, Е. В. Оптимизация технико-экономических параметров организации процесса уборки зерновых культур на основе имитационного моделирования / Е. В. Худякова // Агроинженерия. – 2015. – № 5 (69).
14. Гордеев, А. С. Имитационная модель определения местоположения корневой системы плодовых растений / А. С. Гордеев, Б. С. Миниш // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – № 1.
15. Rukomoynikov, K. P. Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system / K. P. Rukomoynikov, T. V. Sergeeva, T. A. Gilyazova // Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023. – Vol. 27, № 3. – P. 69–80.
16. Galimov, R. R. Crop harvesting model in Anylogic simulation tool / R. R. Galimov, V. V. Tikhonovsky, V. Garafutdinova // South Siberian scientific bulletin. – № 6 (46). – December 2022. – P. 324–332.
17. Harvest Simulator. AnyLogic simulation software / Transportation and Logistics. – URL: <https://cloud.anylogic.com/model/b9142b00-a801-4275-a4df> (date of access: 17.07.2024).