

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.351:621.316

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-36-43>

Оптимизация перевозки сельскохозяйственной продукции с применением технологий имитационного моделирования

С.И. Некрасов¹, А.В. Шитикова², А.С. Апатенко³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ sergej.nekrasov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>² plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Аннотация. Применение эффективных инновационных технологий распределения и управления производственными ресурсами позволяет сократить издержки и оптимизировать управленческие процессы в организациях агропромышленного комплекса. С целью разработки подхода по оптимизации перевозки сельскохозяйственной продукции автомобильным транспортом осуществлен теоретико-методологический анализ этого процесса в России. Выявлено, что качество и себестоимость транспортировки продукции АПК зависят от условий транспортирования, сезонности, режимов перевозки и хранения овощей и фруктов, а также эксплуатационных затрат на перевозку. Для онлайн-мониторинга этих показателей в режиме реального времени и фиксирования условий перевозки в конструкцию транспортного средства (автомобиль) авторами предложено установить термодатчики и датчики влажности, камеры фиксирования положения груза и блок телематики, который получает и обрабатывает данные с датчиков уровня топлива, загрузки транспортного средства, скорости и др. и отправляет информацию на компьютер оператора. Апробация разработанной методики проведена на 306 грузовых автомобилях транспортной компании «Технология движения», из них 118 ед. – KAMAZ, 64 ед. – SCANIA, 121 ед. – MERSEDES-BENZ ACTROSS. Проведен анализ отказов всех рассмотренных автомобилей. Информация о парке машин и данные, полученные от дополнительного оборудования, установленного нами на транспортных средствах, позволили собрать информацию, необходимую для описания процесса, и разработать алгоритм оптимизации показателей, влияющих на себестоимость и качество транспортировки сельскохозяйственной продукции. Разработанная с помощью программно-вычислительного комплекса «Сапфир» имитационная модель на базе ЛТ-системы поможет повысить качество перевозки сельскохозяйственной продукции и снизить затраты. Разработанная имитационная модель применима для исследования и прогнозирования развития системы грузоперевозок в аграрной отрасли.

Ключевые слова: оптимизация перевозки сельскохозяйственной продукции, перевозки сельскохозяйственной продукции автомобильным транспортом, имитационная модель, АПК, качество транспортировки, себестоимость транспортировки, качество перевозки сельскохозяйственной продукции

Для цитирования: Некрасов С.И., Шитикова А.В., Апатенко А.С. Оптимизация перевозки сельскохозяйственной продукции с применением технологий имитационного моделирования // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 36-43. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-36-43>

ORIGINAL ARTICLE

Optimization of transportation of agricultural products using simulation technologies

S.I. Nekrasov¹, A.V. Shitikova², A.S. Apatenko³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ sergej.nekrasov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>² plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Abstract. The use of effective innovative technologies for distribution and management of production resources reduces costs and optimizes management processes in agro-industrial enterprises. To develop an approach to optimizing the transportation of agricultural products, the authors analyzed theoretical and methodological basics of this process in Russia. It was found that the quality and costs of transportation depend on the conditions of transport, seasonality, methods of transport and storage of fruit and vegetables, as well as operational costs for transportation. To provide for the online monitoring of these indicators in real time and recording of transportation conditions in the design

of a vehicle (automobile), the authors propose new design elements: a) thermal and humidity sensors and cameras to record the cargo position and b) a telematics unit that receives and processes data from fuel level sensors, vehicle load, speed, etc. and sends information to an operator's computer. The developed methodology was tested on 306 trucks of the transport company "Technology of Movement," including 118 KAMAZ trucks, 64 SCANIA trucks, and 121 MERSEDES-BENZ ACTOROS trucks. The authors analyzed failures in all vehicles under consideration. Information about the vehicle fleet and data obtained from additional equipment installed on vehicles provided information necessary to describe the process and make an algorithm for optimizing indicators affecting the cost and quality of agricultural product transportation. A simulation model based on the JIT-system equipped with the Sapphire programming and computing suite will help improve the quality of transportation of agricultural products and reduce costs. The developed simulation model is applicable for the study and prediction of the development of the freight transportation system in the agricultural sector.

Keywords: optimization of transportation of agricultural products, transportation of agricultural products by road, simulation model, agro-industrial sector, quality of transportation, cost of transportation, quality of transportation of agricultural products

For citation: Nekrasov S.I., Shitikova A.V., Apatenko A.S. Optimization of transportation of agricultural products using simulation technologies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):36-43. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-36-43>

Введение

В условиях развития сельскохозяйственного производства и увеличения объема перевозок повышение производительности труда, сохранение качества, снижение себестоимости и потерь сельскохозяйственной продукции при транспортировке становятся особенно актуальными [1].

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. Новая стратегия нацелена на то, чтобы устранить недостатки транспортной сети, связать различные регионы России стабильными, надежными транспортными путями, организовать эффективную и быструю перевозку грузов.

Для бесперебойной работы сельскохозяйственного производителя необходимо иметь развитую транспортную сеть с рационально сформированной структурой имеющихся производственных запасов во избежание и минимизации возможных простоев^{1,2}. В АПК часто осуществляются перевозки сельскохозяйственной продукции автомобильным транспортом.

Применение метода имитационного моделирования позволяет получить решение при изменении входных параметров и детальный анализ динамики системы с учетом изменения в подсистемах и параметрах внешней среды, отслеживать все логические условия и нелинейность процессов. Преимуществом AnyLogic является привязка к GIS-картам для

моделирования в реальном времени и возможность комбинирования нескольких видов моделирования (системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования).

Цель исследований: оптимизировать процесс перевозки сельскохозяйственной продукции автомобильным транспортом с применением технологий имитационного моделирования.

Материалы и методы

Проведен теоретико-методологический анализ процесса перевозки сельскохозяйственной продукции. С помощью математического анализа обработаны характеристики транспортировки грузов, осуществлен подбор техники и методов доставки. С основой на разработанной с помощью программно-вычислительного комплекса «Сапфир» модели предложены рекомендации по принятию оптимальных решений, призванных повысить качество перевозки продукции и снизить затраты. Модель может применяться для анализа и предсказательной системы транспортировки продукции на предприятиях аграрного сектора, которую в последующем нейронная сеть сможет использовать для обучения.

Результаты и их обсуждение

По данным ФАО (FAO, 2022), в мире уровень потерь фруктов и овощей на стадии транспортировки составляет 3...18%. В России более 15...20% плодовоовощной продукции не доходит до потребителя по причине низкого качества перевозки и недостаточного уровня использования транспортных средств. Простои в пунктах погрузки и разгрузки, занимающие до 50% времени, ухудшают сохранность продукции. Ежегодные убытки от потерь составляют около 8 млрд руб., а транспортные издержки достигают 30...40% от себестоимости продукции [2].

¹ Организация агробизнеса. Цифровая трансформация: учебное пособие / Л.И. Хоружий, О.Г. Каратаева, А.В. Шитикова и др. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 189 с. EDN: YMVPNH.

² Трунов В.В., Шитикова А.В., Тевченков А.А. Цифровизация сельского хозяйства // В кн.: Инновационный вектор развития аграрной науки. М.: ООО «Русайнс», 2022. С. 66-68. EDN: GAENFV.

Промышленное производство овощей в России в 2023 г. составило 7,2 млн т, при этом большая часть продукции произведена в условиях открытого грунта (5,5 млн т). По данным Росстата, ежегодно наибольшие объемы производства приходятся на репчатый лук (113,0 тыс. т), капусту (101,0 тыс. т), морковь (39,3 тыс. т), столовую свеклу (22,5 тыс. т). В условиях открытого грунта лидируют по объемам выращенной продукции огурцы (870,5 тыс. т) и томаты (724,1 тыс. т).

Ключевым условием сохранности продукции является соблюдение режимов перевозки и хранения овощей и фруктов согласно СанПиН № 2.3.6.3668-20. Скоропортящиеся продукты (картофель, лук, чеснок, корнеплоды, яблоки, груши, цитрусовые, зелень, упакованная в контейнеры) с целью минимизации затрат на транспортировку часто перевозят в открытых грузовиках без холодильных систем, что приводит к механическим повреждениям и порче продукции. Применение рефрижераторов и соблюдение скоростного режима водителем помогают защитить продукцию от порчи и повреждений. Упаковка для перевозки овощей должна защищать плоды от трения и ударов и изготавливаться из экологичного материала. Овощи и фрукты, выделяющие этилен, должны транспортироваться и храниться отдельно с продукцией, подверженной вредному воздействию. В целях экономической целесообразности несовместимую продукцию часто транспортируют в одном рефрижераторе, размещая ее в противоположных частях кузова, увеличивая срок совместного хранения до двух суток.

В ходе анализа показателей, влияющих на качество и себестоимость транспортировки продукции АПК, выявлено, что, помимо условия транспортирования, а именно сезонности, режимов перевозки и хранения овощей и фруктов, необходимо учитывать эксплуатационные затраты на перевозку (продолжительность маршрута, тип кузова, расход топлива и ГСМ, затраты на техническое обслуживание и ремонт).

Для онлайн-мониторинга этих показателей в режиме реального времени и фиксирования условий перевозки в конструкцию транспортного средства (автомобиль) предлагается установить термодатчики и датчики влажности, камеры фиксирования положения груза и блок телематики, который будет получать и обрабатывать данные от стандартных (датчики уровня топлива, загрузки транспортного средства, скорости и др.) и дополнительных датчиков и отправлять информацию на компьютер оператора (рис. 1).

Одним из факторов доставки продукции является время безотказной работы транспортных средств, осуществляющих перевозку. В реальных условиях эксплуатации выход из строя транспортных средств происходит в результате возникновения случайных отказов. Одним из ключевых комплексных показателей работы парка машин является коэффициент технической готовности, который отражает работу машин в течение определенного периода [3-5].

В результате проводимых исследований под наблюдением находились 306 грузовых автомобилей транспортной компании «Технология движения», из них 118 ед. – KAMAZ (5490, 4389 F1, М 1840, М 1945,

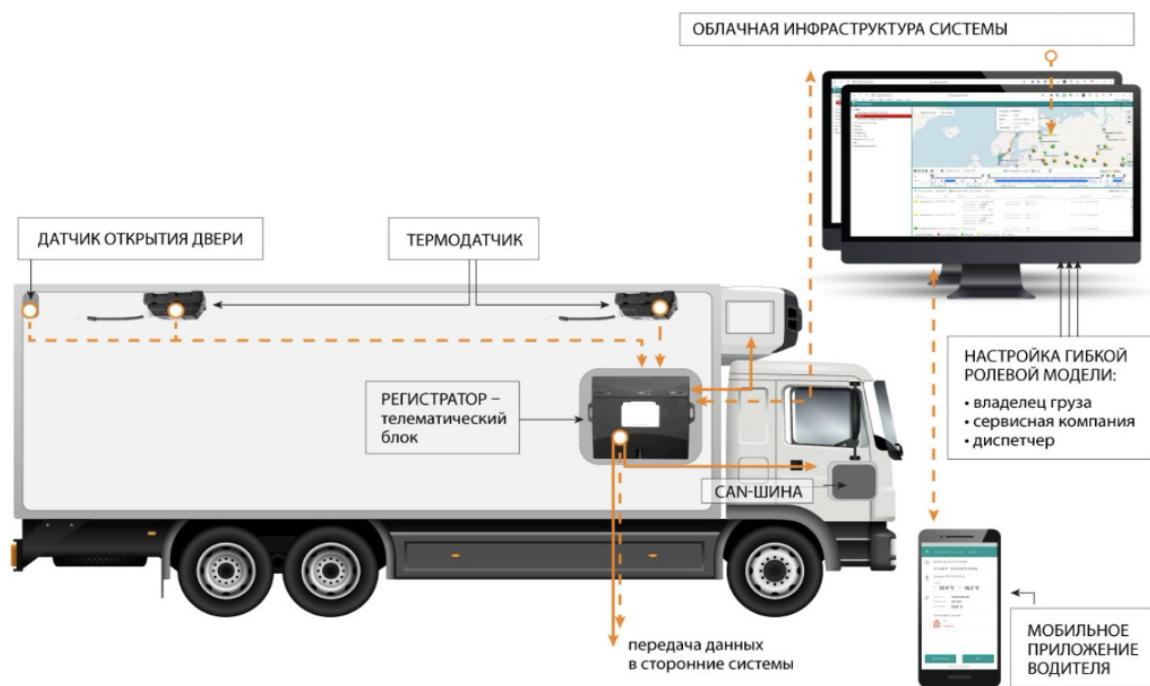


Рис. 1. Архитектура программно-аппаратного комплекса

Fig. 1. Architecture of the hardware and software system

Т 2640), 64 ед. – SCANIA (G400, R400, R440), 121 ед. – MERSEDES-BENZ ACTROSS (1836, 1841LS, 1844LS, 1845LS, 1846LS, 1848LS, 1853LS, 1840L) и др. Средний пробег машин с момента начала эксплуатации составил около 700 тыс. км. Для оценки влияния показателей безотказности на эффективность работы парка машины собраны и систематизированы статистические данные о количестве ремонтно-технических воздействий относительно марок транспортных средств (рис. 2, 3).

Анализ отказов всех рассмотренных машин показал пиковое количество отказов при пробеге 320...600 тыс. км. Характерными отказами автомобилей SCANIA являются неисправности в двигателе (36,7%), электрооборудовании (22,5%) и трансмиссии (8,1%); у KAMAZ – в тормозной системе (18,6%), электрооборудовании (13,3%) и трансмиссии (13,3%); у MERSEDES – в ходовой части (17,2%), электрооборудовании (17,7%) и тормозной системе (13,9%). Оценка отказов и времени их устранения позволяет определить наименее надежные узлы и агрегаты

автомобилей, требующие особого внимания при подготовке транспортного средства к выпуску в рейс.

Информация о парке машин и данные, полученные от дополнительного оборудования, установленного нами на транспортных средствах, позволили собрать информацию, необходимую для описания процесса, и разработать алгоритм оптимизации показателей, влияющих на себестоимость и качество транспортировки сельскохозяйственной продукции.

В настоящее время многие российские предприятия, адаптируя зарубежный опыт, внедряют в свою производственно-хозяйственную деятельность различные подходы к управлению материально-техническим обеспечением на базе систем MRP, MRPII, ERP, DRP и др. Наиболее интересной является система типа «Точно в срок» (just-in-time) – JIT-система, которая характеризуется точными сроками перевозки и учета производственной мощностью предприятия. Степень достижения основной цели JIT-системы зависит от достижения следующих вспомогательных

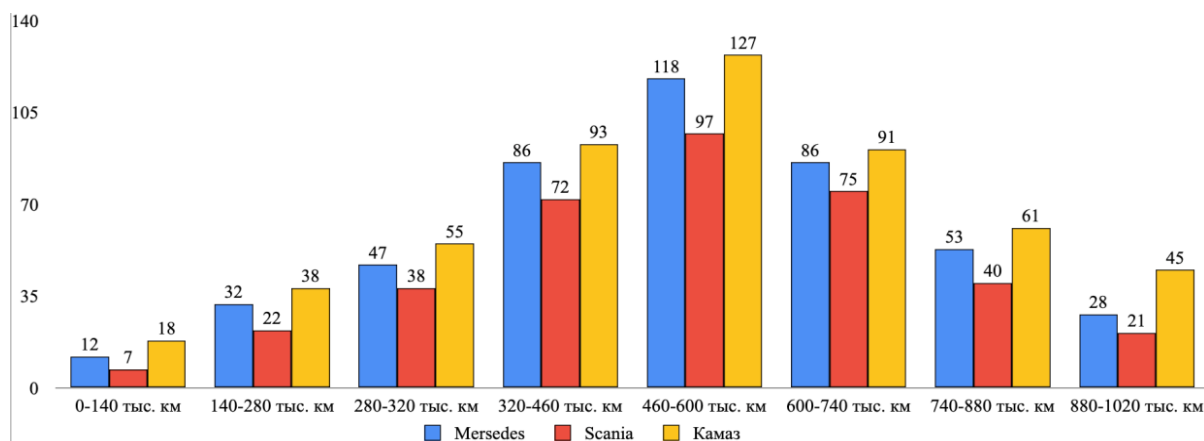


Рис. 2. Распределение отказов транспортных средств в зависимости от пробега

Fig. 2. Distribution of vehicle failures depending on mileage

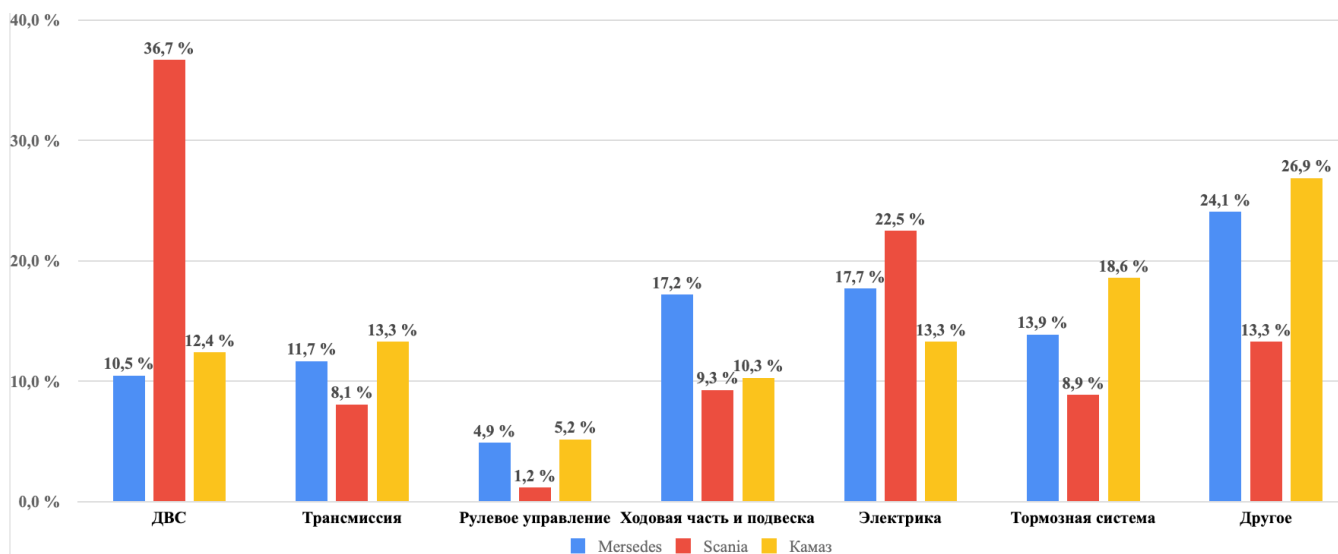


Рис. 3. Сравнительная гистограмма распределения отказов транспортных средств

Fig. 3. Comparative histogram of the distribution of vehicle failure rates

целей: исключение сбоев и нарушений в процессе производства; гибкость и адаптивность самой системы; сокращение производственных сроков и времени подготовки к процессу; сведение к минимуму материальных запасов; устранение необоснованных затрат.

В рамках текущего исследования разработка модели выполнена и настроена в соответствии особенностями ЛТ-системы.

Для определения значения показателей оперативного планирования перевозки сельскохозяйственной продукции построена и исследована модель в среде имитационного моделирования AnyLogic [6, 7]. Имитационная модель разработана программно-вычислительным комплексом «Сапфир».

Структура модели состоит из нескольких взаимосвязанных блоков, которые описывают поведение транспортных средств при выполнении процесса перевозки сельскохозяйственной продукции (рис. 4). Под агентом мы понимаем звено модели, которое способно иметь кэш (память), поведение, контакты и т.п. При формировании заявки основными условиями являются местоположение, объем и тип груза, который необходимо доставить. Создав первую заявку, модель определяет оптимальный маршрут и количество необходимых транспортных средств для перевозки. При добавлении новой заявки происходит перерасчет. С помощью сформированной базы MySQL задаются входные параметры: тип, объем груза, технический паспорт транспортного средства (тип кузова, марка, уровень загрузки, периодичность технического обслуживания и ремонта, указание дополнительных условий, влияющих на расход топлива в процессе эксплуатации). Если перестроение маршрута не может быть реализовано имеющимися транспортными средствами, то добавляется новая заявка и выполняется проверка других сочетаний. Поиск решения осуществляется пошаговым спуском с постоянным шагом, равным заданной погрешности определения коэффициентов.

Программирование блоков модели сводится к математическому описанию рабочих циклов транспортных средств с привязкой к системному времени моделируемого процесса с учетом параметров. Функциональное описание агента транспортного средства можно представить математически:

$$F_i = T_i + t_{\text{бес}} + t_{\text{отк.}} + K_{\text{сез.}} + \tau_i + N_{\text{куз}} + N_{\text{груз}} + t_{\text{то}} + Q_i, \quad (1)$$

где T_i – время выполнения перевозки, ч; $t_{\text{бес}}$ – время безотказной работы транспортного средства во время перевозки, ч; $t_{\text{отк.}}$ – время устранения отказа в рейсе, ч; $K_{\text{сез.}}$ – коэффициент сезонности; τ_i – температурный режим внутри кузова, °C; $N_{\text{куз}}$ – тип кузова; $N_{\text{груз}}$ – тип груза; $t_{\text{то}}$ – время на техническое обслуживание, ч; Q_i – расход топлива на 100 км, л.

В условиях рассматриваемого транспортно-технологического процесса количество возможных уникальных сочетаний ($N_{\text{ком}}$, ед.) определяется по формуле:

$$N_{\text{ком}} = N_{\text{тс}} \cdot (N_{\text{тс}} - 1), \quad (2)$$

где $N_{\text{тс}}$ – количество транспортных средств, ед.

Время на моделирование всего эксперимента ($T_{\text{мод}}$, с) и необходимые затраты времени на реализацию расчета определяются по выражению:

$$T_{\text{мод}} = N_{\text{ком}} \cdot ((t_{\text{пр}} \cdot n_{\text{прог}}) \cdot t_{\text{обм}} + t_{\text{зап}}), \quad (3)$$

где $(t_{\text{пр}} \cdot n_{\text{прог}})$ – время моделирования одного комплекса, с; $n_{\text{прог}}$ – количество прогонов эксперимента, ед.; $t_{\text{обм}}$ – общее время на загрузку (выгрузку) данных в (из) модели, с; $t_{\text{зап}}$ – потери времени на повторный запуск модели, с.

В среде AnyLogic можно проводить ряд экспериментов: простой эксперимент; варьирование параметров; оптимизацию; сравнение «прогонов»; Монте-Карло; анализ чувствительности; калибровку; обучение ИИ; нестандартный. Поскольку в модели существуют некоторые переменные величины, то наиболее корректно в данном исследовании применить метод Монте-Карло.

Процесс оптимизации представляет собой итеративный процесс, в котором оптимизатор выбирает допустимые значения оптимизационных параметров и запускает модель с этими значениями. После завершения «прогона» модели оптимизатор вычисляет значение целевой функции и анализирует полученное значение, далее изменяет значения оптимизационных параметров в соответствии с алгоритмом оптимизации, и процесс повторяется заново.

Перед началом эксперимента пользователю предоставляется возможность настроить входные параметры имитационной модели (рис. 5).

Для поиска оптимального решения при организации перевозки сельскохозяйственной продукции был выбран критерий минимального значения топливных затрат. Результаты моделирования технологического процесса грузоперевозки с использованием различных вариантов машин, направлений и протяженности приведены на рисунке 6.

С помощью разработанной модели происходит корректировка маршрута, подбор транспортного средства с учетом специфики перевозимого груза и показателей надежности транспортного средства. Сравнение результатов моделирования с данными, полученными в процессе эксплуатации, показывает снижение продолжительности маршрута SCANIA G-series с 1175 до 1139 км, MERSEDES-BENZ ACTROSS – с 653 до 630 км, KAMAZ – с 169 до 134 км. В зависимости от маршрута перевозки

данный эффект составил в среднем 20...60 км. Объем перевозимого груза увеличился: для SCANIA G-series – с 16 до 17,55 т; у MERSEDES-BENZ ACTROSS – с 16,7 до 17,8 т; у KAMAZ – с 16,9 до 18,1 т. Затраты на топливо снизились: у SCANIA G-series – с 21337 до 19828 руб.; у MERSEDES-BENZ ACTROSS – с 11610 до 10595 руб.; у KAMAZ – с 2621 до 2180 руб.

Апробация разработанной методики при эксплуатации парка машин в транспортной компании «Технология движения» показала снижение времени на устранение отказов на 7%, уменьшение затрат, связанных с их устранением, на 5%, экономию средств в размере 10299 тыс. руб. Данный экономический эффект позволяет ТК «Технология Движения» получить дополнительные ресурсы для дальнейшего развития.

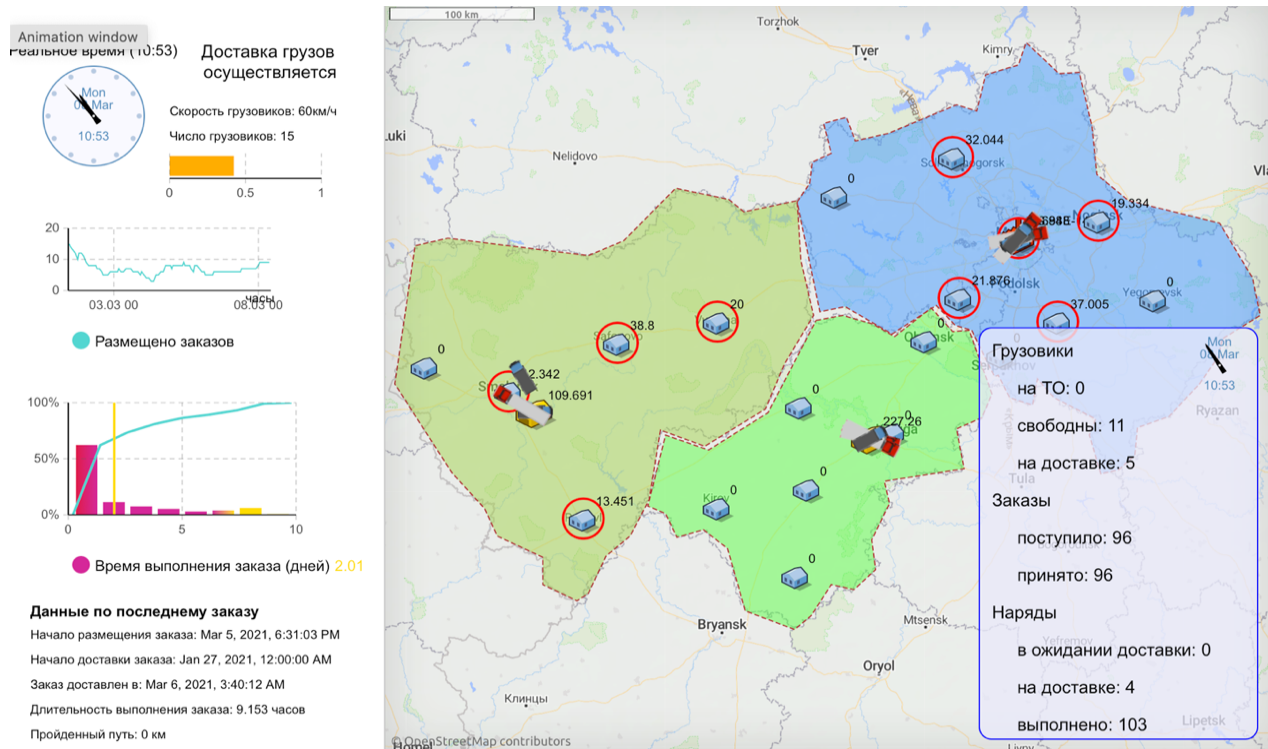


Рис. 4. Структура имитационной модели

Fig. 4. Structure of the simulation model

Model1 : Optimization

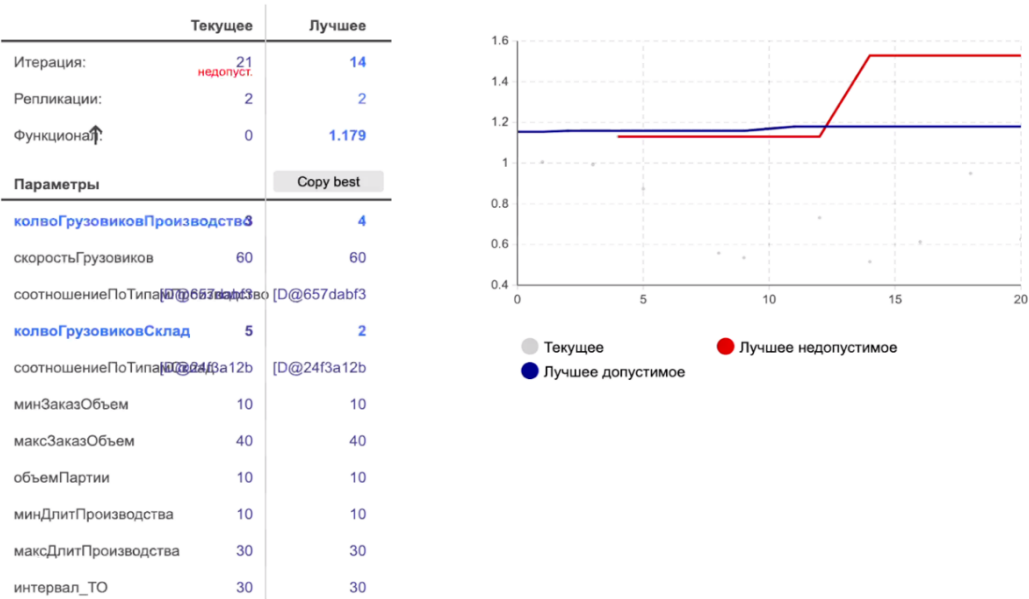


Рис. 5. Оптимизационный эксперимент

Fig. 5. Optimization experiment

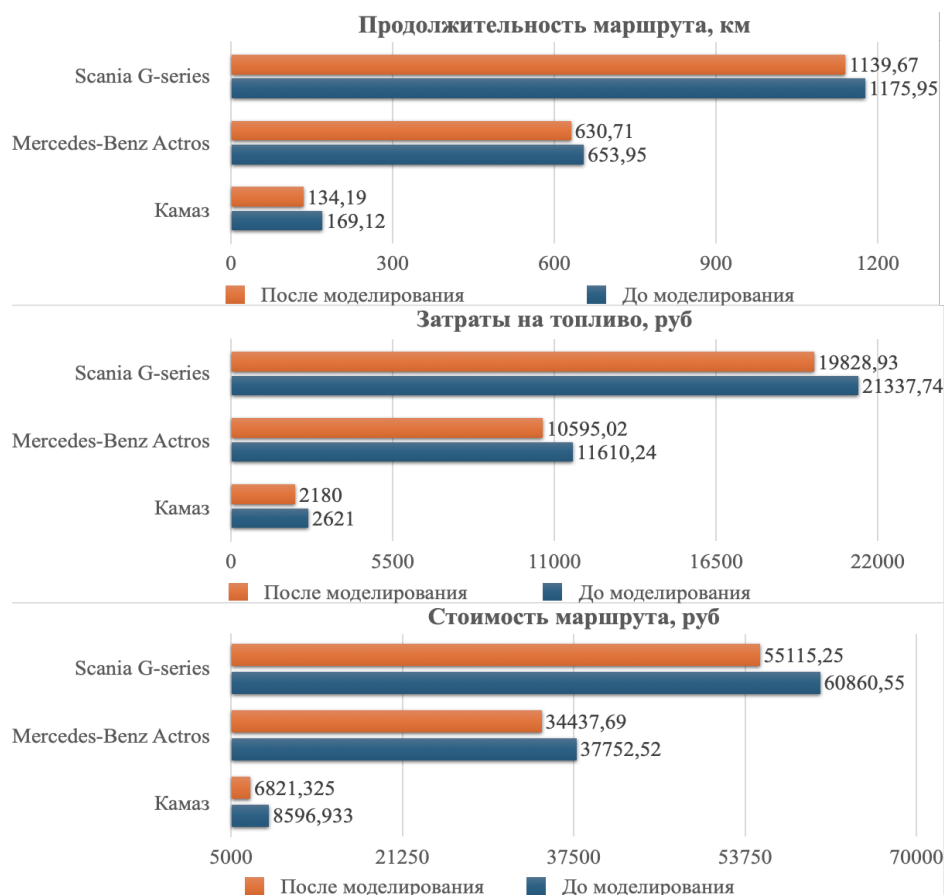


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования перевозки сельскохозяйственной продукции по основным экономическим показателям эффективности

Fig. 6. Comparison of the results of modeling transportation of agricultural products based on main economic performance indicators

Выводы

Уровень потерь овощей и фруктов при перевозке в мире составляет 3...18%. В России около 15...20% плодоовощной продукции не доходит до потребителя по причине низкого качества перевозки. Простои в пунктах погрузки и разгрузки, занимающие до 50% времени, ухудшают сохранность продукции.

Для контроля условий транспортирования и безотказной работы транспортного средства во время перевозки сельскохозяйственной продукции достаточно в конструкцию транспортного средства интегрировать контрольно-информационную систему и вспомогательные датчики контроля, а также настроить

логику построения алгоритма передачи и приема информации о состоянии транспортного средства.

Разработанная имитационная модель для автоматизированного распределения транспортных средств между производителями сельскохозяйственной продукции и потребителем позволила рассчитать экономические показатели перевозки сельскохозяйственной продукции на примере функционирования транспортной компании «Технология движения»: снижение времени на устранение отказов на 7% и уменьшение затрат, связанных с их устранением, на 5%, экономию средств в размере 10 299 тыс. руб. без снижения качества перевозимой сельскохозяйственной продукции.

Список источников

1. Пискачев И.А. Перевозка картофеля с использованием прицепной и съемной транспортной техники в сельском хозяйстве // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: Материалы Международной очно-заочной научно-технической конференции, Тула, 22-23 декабря 2016 г. Вып. 1. Тула: Тульский государственный университет, 2017. С. 126-129. EDN: YLADZV
2. Facchini F., Silvestri B., Digiesi S., Lucchese A. Agri-food loss and waste management: Win-win strategies for edible discarded fruits and vegetables sustainable

References

1. Piskachev I.A. Transportation of potatoes using trailed and detachable transport equipment in agriculture. *Problems of research of systems and means of road transport: Proceedings of the International full-time scientific and technical conference*, Tula, December 22-23, 2016. Issue 1. Tula: Tula State University, 2017. Pp. 126-129. (In Russ.)
2. Facchini F., Silvestri B., Digiesi S., Lucchese A. Agri-food loss and waste management: Win-win strategies for edible discarded fruits and vegetables sustainable

2. Facchini F., Silvestri B., Digiesi S., Lucchese A. Agri-food loss and waste management: Win-win strategies for edible discarded fruits and vegetables sustainable reuse. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023;83:103235. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103235>

3. Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Интеграция профилей цифровых двойников технологических машин в сфере эксплуатации и сопровождения // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции, р.п. Правдинский, Московская обл., 8 июня 2023 г. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. С. 84-91. EDN: BTHBCT

4. Golubev I.G., Severyugina N.S., Apatenko A.S., Fomin A.Yu. Modernizing Machines to Extend Their Life. *Russian Engineering Research*. 2023;43(3):258-263. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23040111>

5. Severyugina N.S., Apatenko A.S., Kozhukhova N.I. Methods for reducing the uncertainty of risks of failures of elements in technological machines. *Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;173:77-84. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_11

6. Nekrasov S.I., Gornostaev V.I. Use of simulation modeling techniques in solving optimization problems of transport support. *Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community*. Stavopol: AIP PUBLISHING, 2021;2661:040007. EDN: OPRZVB

7. Некрасов С.И. Разработка программно-аппаратного комплекса для рационального распределения и контроля целевого использования производственных ресурсов в АПК // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: Сборник статей 26-й Московской Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 12-13 мая 2022 г. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. С. 373-376. EDN: KPKUTI

Сведения об авторах

Сергей Игоревич Некрасов^{1✉}, ассистент;
sergej.nekrasov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>;
Scopus Author ID: 57934708400; Researcher ID: AAE-6385-2022

Александра Васильевна Шитикова², д-р с.-х. наук, профессор;
plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>
Scopus Author ID: 57212139251; Researcher ID: A-2946-2016

Алексей Сергеевич Апатенко³, д-р техн. наук, доцент;
a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>;
Scopus Author ID: 57216908465; Researcher ID: AAN-9862-2020.

^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

С.И. Некрасов – программное обеспечение, создание окончательной версии;
А.В. Шитикова – информационные ресурсы и аналитика;
А.С. Апатенко – концептуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила в редакцию 16.09.2024; поступила после рецензирования и доработки 14.10.2024; принята к публикации 16.10.2024

2. Facchini F., Silvestri B., Digiesi S., Lucchese A. Agri-food loss and waste management: Win-win strategies for edible discarded fruits and vegetables sustainable reuse. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023;83:103235. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103235>

3. Severyugina N.S., Apatenko A.S. Integration of the profiles of digital twins of technological machines in operation and maintenance. *Scientific and Information Support of Innovative Development of Agroindustrial Sector: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*, Pravdinskiy, Moscow region, June 8, 2023, Moscow: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of Agroindustrial Sector, 2023. Pp. 84-91. (In Russ.)

4. Golubev I.G., Severyugina N.S., Apatenko A.S., Fomin A.Yu. Modernizing Machines to Extend Their Life. *Russian Engineering Research*. 2023;43(3):258-263. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23040111>

5. Severyugina N.S., Apatenko A.S., Kozhukhova N.I. Methods for reducing the uncertainty of risks of failures of elements in technological machines. *Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;173:77-84. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_11

6. Nekrasov S.I., Gornostaev V.I. Use of simulation modeling techniques in solving optimization problems of transport support. *Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community*. Stavopol: AIP PUBLISHING, 2021;2661:040007.

7. Nekrasov S.I. Development of hardware and software suite for rational distribution and control of the target use of production resources in the agro-industrial sector. Materials-handling and transporting, construction, road, track, reclamation machines and robotic systems: Proceedings of the 26th Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists, Moscow, May 12-13, 2022, Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2022. Pp. 373-376. (In Russ.)

Author Information

Sergey I. Nekrasov^{1✉}, Assistant Professor;
sergej.nekrasov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>;
Scopus Author ID: 57934708400; Researcher ID: AAE-6385-2022

Aleksandra V. Shitikova², DSc (Ag), Professor;
plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>
Scopus Author ID: 57212139251; Researcher ID: A-2946-2016

Aleksei S. Apatenko³, DSc (Eng), Associate Professor;
a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>;
Scopus Author ID: 57216908465; Researcher ID: AAN-9862-2020.

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation

Author Contribution

S.I. Nekrasov – software, writing – finalizing (revising and editing) of the manuscript;
A.V. Shitikova – information resources and analytics;
A.S. Apatenko – conceptualization.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 16.09.2024; Revised 14.10.2024; Accepted 16.10.2024.