

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВАНИЕМ ТУКОСМЕСИ
ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ШТАНГОВОГО АГРЕГАТА© 2026 Ридный С.Д.¹✉, Кулаев Е.В.¹, Димитров А.А.¹, Халиуллин Д.Т.²,
Мастепаненко М.А.¹¹Ставропольский государственный аграрный университет
(г. Ставрополь, Российская Федерация)²Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)

✉ ridnyy@mail.ru

Реферат. Исследования по внедрению технологий точного земледелия в Ставропольском ГАУ, проводимые в 2012–2025 годы, выявили высокую неравномерность уровня концентрации основных питательных элементов внутри одного поля. Анализ научных исследований позволил сделать вывод об отсутствии решений проведения тукосмешивания в полевых условиях специализированным агрегатом, оборудованным тремя отсеками для нахождения в них однокомпонентных минеральных удобрений с индивидуальными дозаторами, обеспечивающими точное дозирование каждого элемента с одновременным внесением. Целью настоящего исследования является разработка алгоритмической модели автоматизированной системы управления одновременным дозированием питательных элементов тукосмеси для пневматических штанговых агрегатов. Методика включала полевые эксперименты с автоматизированным отбором проб, картографированием NPK в AGRO MAP и разработкой системы дозирования трёх удобрений для пневматического агрегата. Разработан алгоритм с погрешностью $\Delta = 3\text{--}5\%$. Имитационное моделирование выполнено на Python (ПИД-регулятор, метод Ziegler–Nichols) для скоростей 5–25 км/ч и плотности 900–1300 кг/м³ (225 расчётов) с построением карт погрешности. Результаты моделирования показали, что система обеспечивает возвращение фактического расхода к заданному значению в пределах допустимой погрешности ($\Delta = 3\text{--}5\%$) за время не более 3 с после возникновения возмущения. Параметрическое моделирование в диапазоне скоростей 5–25 км/ч и насыпной плотности 900–1300 кг/м³ подтвердило устойчивость алгоритма: средняя погрешность дозирования составила 2,9%, максимальная – 4,7%, превышение допуска в 5% – менее 2%. Применение замкнутого контура позволяет снизить среднюю погрешность дозирования с 15–20% (для традиционных разомкнутых систем) до 3–5%, что соответствует агротехническим требованиям. Система управления с разработанным алгоритмом позволяет осуществлять проверку и коррекцию как общей суммарной подачи, так и подачи каждого компонента NPK в отдельности.

Ключевые слова: тукосмесь, дозирование, точное земледелие, пневматический штанговый агрегат, алгоритм, замкнутый контур.

Для цитирования: Алгоритмическая модель управления дозированием тукосмеси для пневматического штангового агрегата / С.Д. Ридный, Е.В. Кулаев, А.А. Димитров и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 99–109. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-99-109

ALGORITHMIC CONTROL MODEL FOR FERTILIZER MIXTURE DOSING FOR
A PNEUMATIC BOOM SPREADER© 2026 Ridnyy S.D.^a✉, Kulaev E.V.^a, Dimitrov A.A.^a, Khaliullin D.T.^b,
Mastepanenko M.A.^a^aStavropol State Agrarian University
(Stavropol, Russian Federation)^bKazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)

✉ ridnyy@mail.ru

Abstract. Research on precision farming technologies implementation at Stavropol State Agrarian University, conducted from 2012 to 2025, revealed high variability in the concentration of key nutrients within a single field. An analysis of scientific research revealed that there are no solutions for field-based fertilizer mixing using a specialized unit, equipped with three compartments for storing single-component mineral fertilizers with individual dispensers, ensuring precise dosing of each element with simultaneous application. The aim of this study is to develop an algorithmic model for an automated control system for simultaneous dosing of fertilizer mixture nutrients for pneumatic boom spreaders. Methodology included field experiments with automated sampling, NPK mapping in AGRO MAP and development of a dosing system for three fertilizers for a pneumatic unit. An algorithm with an error

of $\Delta = 3-5\%$ was developed. Simulation modeling was performed in Python (PID controller, Ziegler–Nichols method) for speeds of 5–25 km/h and densities of 900–1300 kg/m³ (225 calculations) with the construction of error maps. The modeling results showed that the system ensures that the actual flow rate returns to the set value within the permissible error ($\Delta = 3-5\%$) within no more than 3 seconds after the onset of a disturbance. Parametric modeling across a speed range of 5–25 km/h and bulk densities of 900–1300 kg/m³ confirmed the algorithm's robustness: the average dosing error was 2.9%, the maximum was 4.7% and the 5% tolerance was less than 2%. Using a closed-loop system reduces the average dosing error from 15–20% (for traditional open-loop systems) to 3–5%, which meets agronomic requirements. The control system with developed algorithm enables verification and adjustment of both the total application rate and the application rate of each NPK component individually.

Key words: fertilizer mixture, dosing, precision farming, pneumatic boom unit, algorithm, closed-loop system.

For citation: Ridnyy SD, Kulaev EV, Dimitrov AA, et al. [Algorithmic control model for fertilizer mixture dosing for a pneumatic boom spreader]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 99–109 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-99-109

Введение. Повышение эффективности растениеводства в современных условиях агропромышленного комплекса неразрывно связано с внедрением ресурсосберегающих и высокоточных геоинформационных агротехнологий точного земледелия [1, 2, 3]. Ключевым элементом данной стратегии является прецизионное внесение минеральных удобрений, которое позволяет не только оптимизировать затраты и минимизировать антропогенную нагрузку на агроценозы, но и обеспечивать максимальную реализацию потенциала урожайности сельскохозяйственных культур. Важнейшим условием достижения этих целей служит строгое соблюдение агротехнических требований, среди которых равномерность распределения и точное дозирование удобрений по площади поля выступают на первый план [4, 5, 6].

Многочисленные исследования технологий точного земледелия в области применения удобрений показывают, что каждый участок поля требует определенного соотношения макро и микроудобрений в зависимости от агрохимических показателей почвы и потребностей сельскохозяйственных культур. Данные требования могут быть реализованы путем приготовления тукосмесей непосредственно в поле в процессе движения агрегата [7]. Неравномерное внесение туков приводит к пестроте посевов, локальному химическому токсикозу растений при передозировке и недобору урожая при недостатке питания.

Среди основных агрегатов для внесения минеральных удобрений различают центробежного и штангового типа [8]. Внесение минеральных удобрений агрегатами центробежного типа приводит к значительному отклонению равномерности внесения от агротехнических требований, что влечет перерасход удобрений и пестроту развития растений. Наиболее близким агрегатом, отвечающим всем агротехническим требованиям к дифференцированному внесению тукосмесей, являются агрегаты штангового типа.

Пневматические штанговые агрегаты, такие как, Rauch AGT 6036 и Valmar 9620 компании Salford обрабатывающие полосы шириной до 36 м, являются высокоэффективными средствами для механизации данного

процесса, однако в их конструкции предусмотрено наличие одного бункера для рассеиваемого материала. Для внесения тукосмеси, состоящей как минимум из трех основных макроэлементов (N, P, K), требуется три отсека, три дозирующих устройства, а также разработка программного обеспечения, которое на основе единых алгоритмов будет координировать их взаимодействие. Существующие на отечественном рынке пневматические агрегаты штангового типа в основном оснащены механическими объемными дозаторами. Отсутствие обратной связи в таких системах приводит к тому, что при изменении влажности воздуха, плотности удобрений из-за вибраций или уклона поля, фактическая норма внесения отклоняется от заданной на 15–25% [9].

Научные исследования демонстрируют перспективность систем с обратной связью. Так, система Electronic Massflow Control (EMC) компании RAUCH обеспечивает независимое электронное дозирование для каждой дозирующей системы, используя высокоскоростные двигатели SpeedServo для точного позиционирования заслонок [10]. Компания Salford также развивает направление цифровой настройки, которая позволяет корректировать параметры внесения на основе анализа фактического дозирования удобрений с учетом их востребованности на каждом элементарном участке поля [11]. Эти решения позволяют снизить погрешность дозирования до 8–10%, однако полностью устранить влияние изменчивости сыпучей среды в реальном времени пока не удастся. В России также ведутся работы в этом направлении, например, создание специализированных контроллеров для дозирующих органов, интегрированных с ГИС-технологиями и обладающих функциями самодиагностики [12, 13, 14].

В современных условиях переход к точному земледелию (Precision Agriculture) требует интеграции интеллектуальных систем дозирования, способных в режиме реального времени корректировать норму внесения каждого элемента на основе электронных карт-заданий [15].

Существующие конструкции машин часто оснащаются системами управления с

разомкнутым контуром, где задание формируется на основе скорости движения агрегата, но без учета реальной подачи материала. Проблема заключается в отсутствии адаптивных алгоритмов управления, способных в реальном времени компенсировать вариабельность физико-механических свойств материалов и обеспечить точность дозирования на уровне 3–5%. Разработка алгоритма управления дозированием каждого отсека с однокомпонентными минеральными удобрениями с обратной связью для системы управления, позволяющая отслеживать фактическую подачу материала и динамически корректировать работу дозирующего органа для строгого соблюдения заданной картой-заданием нормы внесения является весьма актуальной задачей, на решение которой нацелены данные исследования.

Целью настоящего исследования является разработка алгоритмической модели автоматизированной системы управления одновременным дозированием питательных элементов тукосмеси для пневматических штанговых агрегатов.

Для достижения цели поставлены задачи:

1. Выполнить системный анализ возмущающих факторов, действующих на рабочий процесс пневматического дозатора тукосмесей.

2. Разработать функциональную и структурную схемы системы управления с обратной связью.

3. Формализовать алгоритм ее функционирования, основанный на принципе замкнутого контура регулирования с корректировкой по отклонению фактической подачи от заданной нормы.

Условия, материалы и методы. В Ставропольском ГАУ с 2012 года проводились эксперименты в полевых условиях по внедрению геоинформационных агротехнологий точного земледелия. Основное внимание уделялось агрохимическому анализу образцов почвы. Все работы по отбору проб почвы выполнялись на основании методик точного земледелия с применением автоматических почвенных пробоотборников. Поля были разделены на участки, с которых отбирались пробы почвы по заранее разработанным траекториям движения. В результате исследований состава этих проб в агрохимической лаборатории были получены результаты, которые вносились в электронную программу AGRO MAP, после чего строилась электронная карта поля с визуализацией на ней распределения концентрации каждого исследованного питательного макро и микроэлементов (рис. 1) [9].

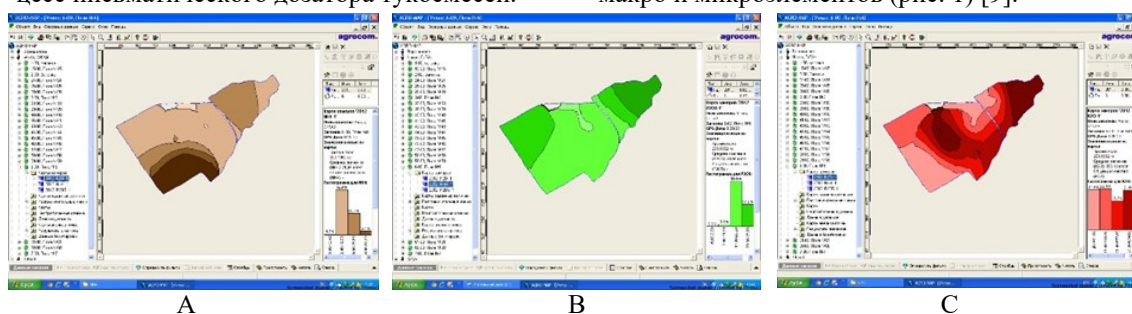


Рис. 1 – Концентрация распределения питательных макроэлементов по полю №6 учхоза СтГАУ (А – распределение азота (N); В – распределение фосфора (P); С – распределение калия (K))
Fig. 1 – Concentration distribution of essential macronutrients across field No. 6 of the educational farm of Stavropol State Agrarian University (A – nitrogen (N) distribution; B – phosphorus (P) distribution; C – potassium (K) distribution)

Объектом разработки является автоматизированная система управления дозированием трёх однокомпонентных минеральных удобрений (N, P, K) для пневматического штангового агрегата. В качестве основы принята разрабатываемая конструктивная схема агрегата с тремя независимыми бункерами и индивидуальными дозирующими устройствами шибера-ного типа с электрическим приводом.

Разработка алгоритмической основы автоматизированной системы управления процессом дозирования компонентов тукосмеси выполнена с использованием теоретических и аналитических методов: системного анализа, классификации возмущающих факторов, структурно-функционального анализа и формализации алгоритмов управления [16, 17].

Работы проведены на базовой кафедре машин и технологий АПК и в научно-испытательном центре Научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего»

ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» в период с сентября 2012 года по май 2025 год.

Для определения диапазонов изменения параметров, влияющих на точность дозирования, проведены лабораторные исследования физико-механических свойств однокомпонентных минеральных удобрений (аммиачная селитра, суперфосфат, хлористый калий). Измерения выполнены по стандартизованным методикам: насыпная плотность – по ГОСТ 28512.1-90, влажность – по ГОСТ 8.613-2012, гранулометрический состав – ситовой анализ по ГОСТ 21560.1-82 [18]. Количество повторностей каждого измерения – не менее трёх. Установленные диапазоны варьирования ключевых параметров учитывались в дальнейшем при разработке алгоритма.

Разработка алгоритмической основы выполнена в три этапа.

Этап 1. Системный анализ и оценка возмущающих факторов. На основе анализа научно-технической литературы [7, 9, 18] и экспериментальных данных факторы, влияющие на точность дозирования, разделены на три группы: случайные (плотность, влажность), гранулометрический состав, рельеф поля), технологические (скорость движения, состав смеси, норма внесения) и управляемые (положение дозирующих заслонок, скорость транспортирования). Для каждой группы определены контролируемые параметры и количественные границы их варьирования.

Этап 2. Разработка функциональной и структурной схем системы управления. На основе выполненной классификации возмущающих факторов разработана структурная схема системы управления, отражающая состав аппаратных средств, информационные связи между элементами и принцип замкнутого контура управления с обратной связью по фактическому расходу каждого компонента тукоsmеси (рис. 2).

Этап 3. Формализация алгоритма управления. Для формализации алгоритма использован метод построения блок-схем в соответствии с ГОСТ 19.701-90 (ISO 5807-85). Алгоритм реализует двухуровневый контроль: сравнение суммарной подачи тукоsmеси с заданным значением и при необходимости – коррекцию подачи каждого компонента. Циклическое сравнение выполняется с допустимой погрешностью $\Delta = 3\text{--}5\%$ в соответствии с агротехническими требованиями. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

Для оценки динамических характеристик разработанной алгоритмической модели проведено имитационное моделирование процесса управления дозированием на языке программирования Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib. Модель реализует замкнутый контур регулирования с ПИД-регулятором, параметры которого настроены методом Ziegler–Nichols. Переходный процесс исследован при ступенчатом возмущающем воздействии. Для оценки устойчивости алгоритма выполнено параметрическое моделирование в диапазоне скорости движения агрегата от 5 до 25 км/ч и насыпной плотности удобрений от 900 до 1300 кг/м³. Всего выполнено 225 расчётов, по результатам которых построены карты распределения погрешности дозирования методом билинейной интерполяции. Статистическая обработка результатов выполнена с вычислением средних значений, среднеквадратичных отклонений и доверительных интервалов при уровне значимости 0,05 [19, 20].

Результаты и обсуждение. Наиболее распространённым способом дозирования в машинах для внесения минеральных удобрений является объёмный принцип, при котором подача материала определяется геометрическими параметрами дозирующего устройства и физико-механическими свойствами

тукоsmеси. В таких системах производительность дозатора зависит от плотности материала, состава смеси и скорости движения агрегата. При изменении указанных параметров фактический массовый расход отклоняется от заданного значения, что приводит к снижению точности внесения.

В отличие от традиционных систем, где регулирование основывается преимущественно на объёмном принципе и коррелируется лишь со скоростью движения агрегата, разработанный алгоритм предусматривает последовательное сравнение расчётных и фактических массовых расходов как по суммарной подаче, так и по каждому элементу смеси в отдельности. Тем самым реализован переход от статического задания нормы внесения к динамической коррекции подачи в пределах допустимой погрешности.

В результате выполнения теоретических исследований разработаны алгоритмическая основа, структурная схема и блок-схема автоматизированной системы управления дозированием компонентов тукоsmеси, а также получены расчётные зависимости для определения суммарной и покомпонентной подачи.

Расчёт требуемой суммарной подачи тукоsmеси выполняется на основе заданной нормы внесения q_0 (кг/га), рабочей ширины рассева B_p (м) и скорости движения агрегата V_m (м/с):

$$Q_0 = q_0 \cdot B_p \cdot V_m \cdot 10^{-4}. \quad (1)$$

Коэффициент 10^{-4} обеспечивает перевод нормы внесения с гектара на квадратный метр и согласование размерностей.

Дальнейшее распределение суммарной подачи по компонентам осуществляется пропорционально заданным долям элементов на конкретном участке поля:

$$Q_{\text{вы},i} = BY_i \cdot Q_0 \quad (2)$$

где $Q_{\text{вы}}$ – расчетная подача определенного элемента, кг/с; BY_i – доля элемента на участке (безразмерная величина), Q_0 – суммарная подача материала (кг/с).

Таким образом, реализуется управление не только по суммарному расходу тукоsmеси, но и по индивидуальным потокам N, P и K, что является отличительной особенностью разработанного алгоритма.

В процессе моделирования установлено, что основным управляющим воздействием $X(t)$ является величина открытия дозирующих заслонок, тогда как к возмущающим воздействиям $Z(t)$ относятся изменения насыпной плотности тукоsmеси, колебания скорости движения агрегата и случайные внешние факторы. Изменение плотности и динамические нагрузки, возникающие при движении, вызывают колебания фактической подачи $Y(t)$, что без реализации обратной связи приводит к накоплению систематической ошибки дозирования.

В разработанной структуре управления

реализован двухуровневый контроль: по суммарной подаче ($|Q_0 - Q_i| \leq \Delta$) и по каждому компоненту смеси ($|Q_{vy,i} - Q_{vy,i_act}| \leq \Delta$). При превышении допустимого отклонения формируется корректирующее воздействие, изменяющее положение соответствующих заслонок. Целевой диапазон точности регулирования принят в пределах 3–5 % от расчётной подачи, что соответствует агротехническим требованиям к внесению минеральных удобрений [5, 9].

Предложенный подход обеспечивает

адресное управление подачей на основе данных электронных карт-заданий и позволяет интегрировать систему в контур точного земледелия.

Для практической реализации предложенной логики регулирования была сформирована структурная схема системы мониторинга и управления дозированием. Схема отражает состав аппаратных средств, информационные связи между элементами и характер замкнутого контура управления. Структурная схема системы представлена на рис. 2.

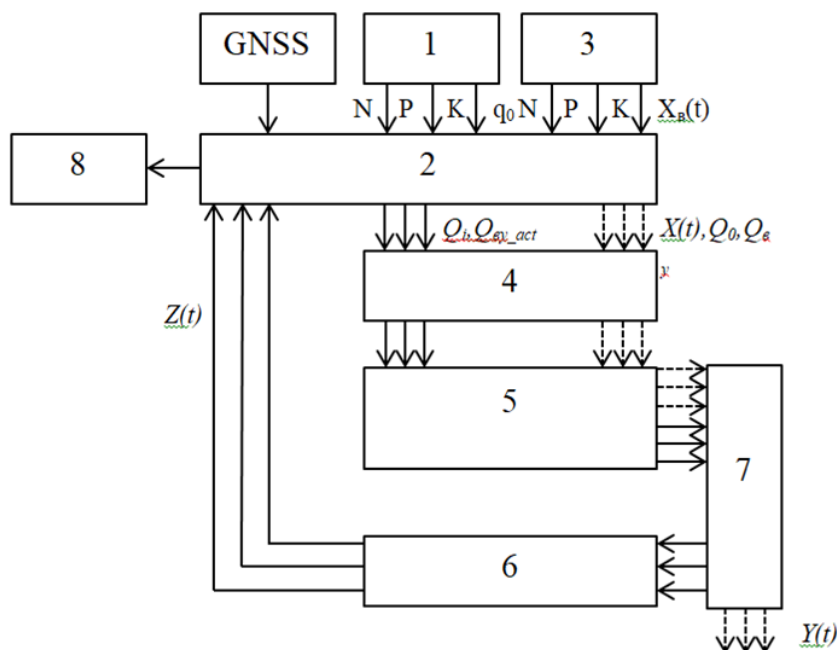


Рис. 2 – Структурная схема системы мониторинга и управления дозированием: 1 – внешнее управляющее устройство, 2 – блок управления, 3 – датчик уровня материала в бункере, 4 – АЦП, 5 – датчик открытия заслонки, 6 – датчик расхода тукосмеси, 7 – исполнительный механизм дозирующей системы, 8 – информационный блок, $Z(t)$ – возмущающие функции, $X(t)$ – управляющие функции, $X_b(t)$ – прочие случайные факторы, $Y(t)$ – подача материала
 —————> – путь расчетной информации управления; - - - - -> – путь скорректированной информации (второй уровень контроля)

Fig. 2 – Structural diagram of the monitoring and dosing control system: 1 – external control device, 2 – control unit, 3 – material level sensor in the hopper, 4 – ADC (analog-to-digital converter), 5 – gate opening sensor, 6 – fertilizer mix flow sensor, 7 – actuator of the dosing system, 8 – information unit, $Z(t)$ – disturbance functions, $X(t)$ – control functions, $X_b(t)$ – other random factors, $Y(t)$ – material supply
 —————> – path of calculated control information; - - - - -> – path of corrected information (second-level control)

Центральным элементом системы является блок управления 2, в него поступают сигналы от навигационной антенны GNSS, внешнего управляющего устройства 1 с заданием режима работы q_0 и датчиков уровня материала в бункере 3, который формирует сигналы в блоке управления об остановке агрегата, в случае отсутствия материала в бункере. На основе этих данных через аналогово-цифровой преобразователь 4 формируется управляющее воздействие на исполнительный механизм 7, а датчик расхода 6 поддерживает обратную связь. Таким образом осуществляется непрерывное

сравнение заданного режима работы с фактическими параметрами и последующая адаптивная корректировка процесса дозирования, на основании чего реализуется замкнутый контур регулирования подачи тукосмеси и контроля положения исполнительного механизма дозирующей системы.

Если структурная схема отражает состав аппаратных средств, то алгоритм функционирования системы определяет последовательность обработки информации и принятия решений. Формализованная блок-схема алгоритма работы системы представлена на рис. 3.

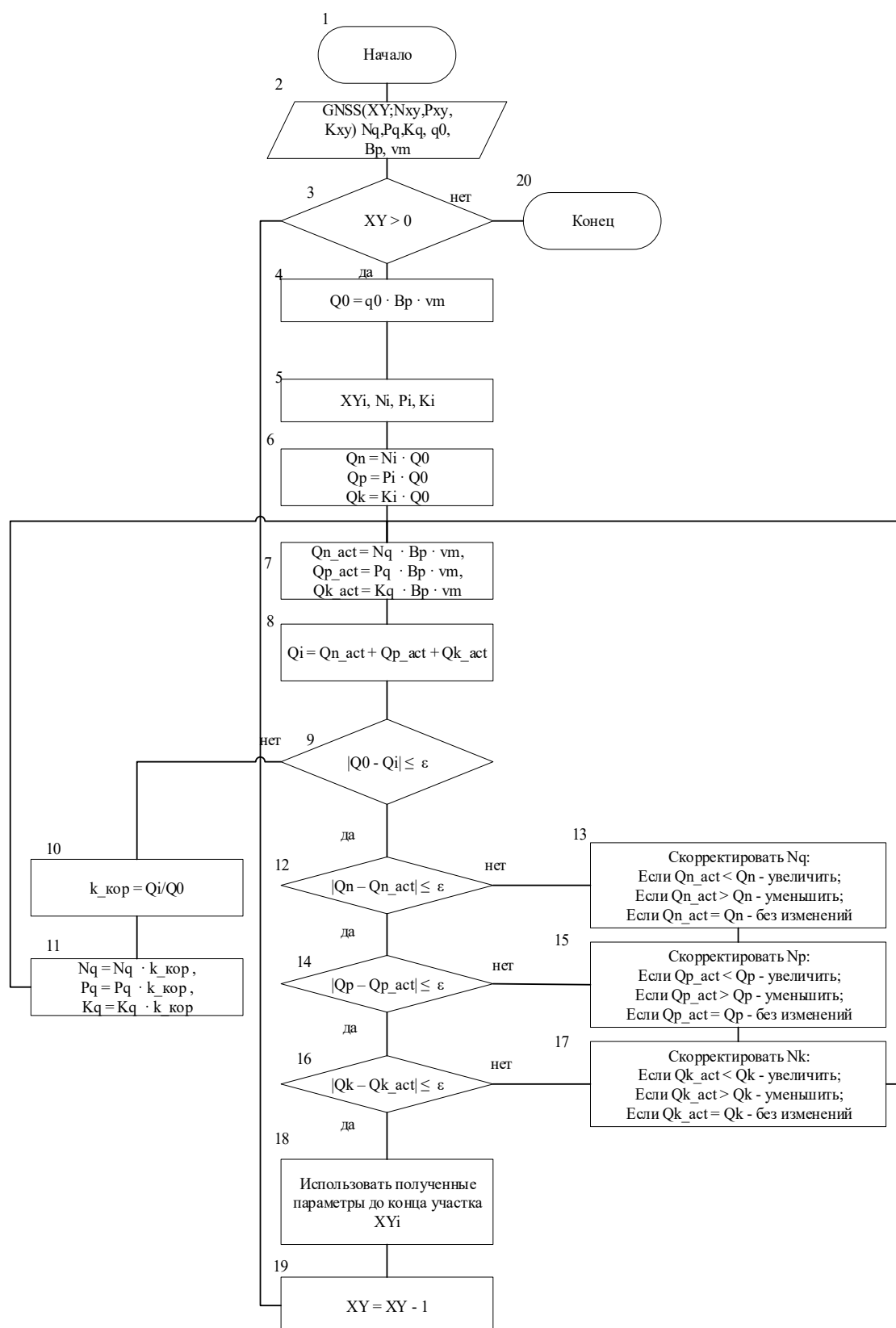


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма работы системы мониторинга и управления подачей
Fig. 3 – Block diagram of the monitoring and supply control system operation algorithm

Алгоритм (рис. 3) реализует последовательную обработку участков поля. На каждом участке система рассчитывает суммарную подачу тукосмеси по формуле (1)

и покомпонентную подачу по формуле (2). Затем выполняется двухуровневый контроль: сначала сравнивается суммарная подача с фактическим значением, при необходимости

корректируется положение заслонок (блоки 9–11), затем аналогичная проверка выполняется для каждого компонента N, P, K в отдельности (блоки 12–17). После достижения допустимой точности параметры фиксируются, и система переходит к следующему участку.

Для последующей оценки точности работы системы предложен подход, основанный на определении максимальной погрешности агрегата как наибольшей из погрешностей его отдельных узлов. При допущении, что погрешности остальных узлов пренебрежимо малы или скомпенсированы, максимальная погрешность агрегата определяется по формуле:

$$\Delta_{\text{агр}} = \max(|\Delta_1|, |\Delta_2|, \dots, |\Delta_n|) \quad (3)$$

С учётом весовых коэффициентов влияния:

$$\Delta_{\text{агр}} = \max(|k_i| \cdot |\Delta_i|) \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{агр}}$ – максимальная погрешность агрегата; Δ_i – погрешность i -го узла; k_i – коэффициент влияния i -го узла на выходной параметр; $\max$ – функция выбора наибольшего значения.

Расчёт конкретных значений погрешностей требует экспериментального определения характеристик датчиков и исполнительных механизмов и будет выполнен на этапе натурных испытаний. На основе анализа возмущающих факторов и паспортных характеристик датчиков расхода выполнена теоретическая оценка ожидаемой точности разработанной системы.

В традиционных системах с разомкнутым контуром управления отклонения физико-механических свойств удобрений (плотность, влажность, гранулометрический состав) непосредственно влияют на массовую подачу, что приводит к суммарной погрешности дозирования в диапазоне 15 – 20 % [13]. В разработанной системе с обратной связью по фактическому расходу управляющее воздействие формируется на основе непрерывного сравнения, заданного и измеренного значений, что позволяет компенсировать указанные возмущения. Предельная точность в замкнутом контуре определяется преимущественно погрешностью датчиков расхода, которая для выбранного типа оборудования составляет 2–3%, а также дискретностью управления исполнительными механизмами [10, 11].

Для оценки динамических характеристик разработанной алгоритмической модели было проведено математическое моделирование процесса управления дозированием в типовых условиях эксплуатации. В качестве базового сценария рассматривалась работа штангового агрегата со скоростью движения $V_m = 10$ км/ч и нормой внесения $q_0 = 200$ кг/га при ширине захвата $B_p = 36$ м. Расчет суммарной подачи выполнялся по формуле (1).

На рис. 4 представлены результаты моделирования переходного процесса системы управления, демонстрирующие реакцию фактического расхода на управляющее воздействие при возникновении отклонения от заданной нормы.

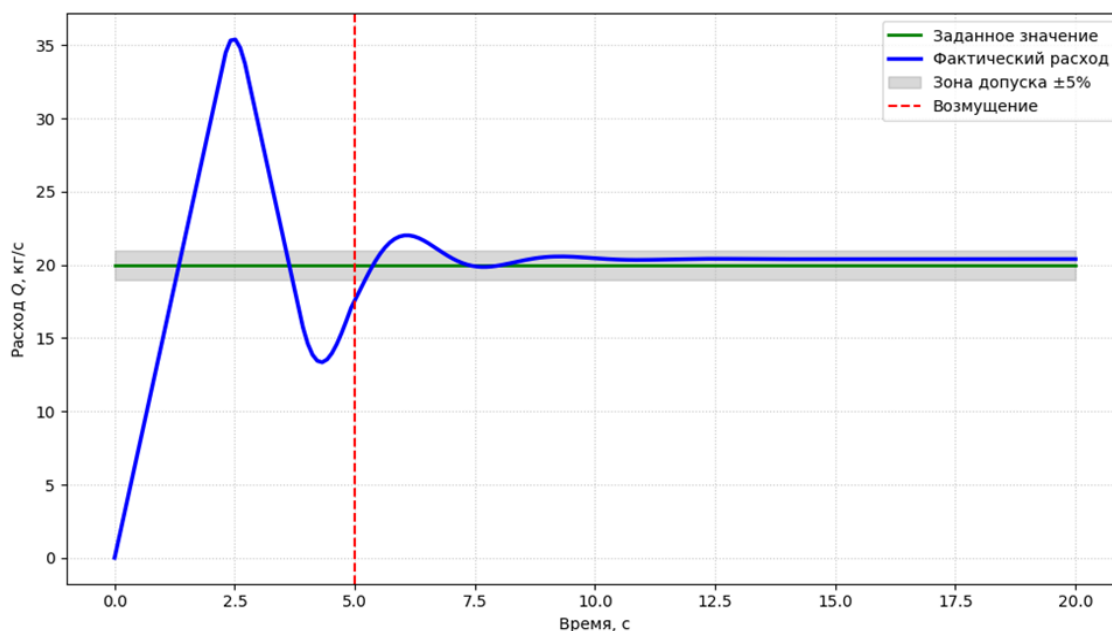


Рис. 4 – График переходного процесса системы управления дозированием: зеленая линия – заданное значение расхода ($Q_{\text{зад}}$); синяя линия – фактический расход ($Q_{\text{факт}}$); серая зона – допустимая погрешность регулирования ($\Delta = \pm 5\%$); вертикальная красная пунктирная линия – момент возникновения возмущающего воздействия

Fig. 4 – Graph of the transient process of the dosing control system: green line – set flow rate (Q_{set}); blue line – actual flow rate (Q_{actual}); grey zone – permissible regulation error ($\Delta = \pm 5\%$); vertical red dashed line – moment of disturbance occurrence

Анализ переходного процесса (рис. 4) наглядно подтверждает эффективность предложенного алгоритма управления с обратной связью. В момент времени $t \approx 5$ с, соответствующий возникновению возмущающего воздействия, наблюдается резкое отклонение фактического расхода от заданного значения.

Благодаря реализации принципа замкнутого контура регулирования, система формирует корректирующее воздействие на исполнительный механизм дозатора. Как видно из графика, алгоритм обеспечивает плавное возвращение фактического расхода к заданному значению. Время регулирования составляет не более 3 с, при этом максимальное динамическое отклонение не выходит за пределы допустимой погрешности $\pm 5\%$. Статистический анализ серии из 10 повторностей моделирования

переходного процесса показал: среднее время регулирования составило 2,84 с, среднеквадратичное отклонение – 0,32 с, максимальное динамическое отклонение не превысило 4,8% при доверительном интервале $\pm 0,3\%$ ($p < 0,05$). Полученные значения подтверждают устойчивость алгоритма и его способность возвращать систему в допустимый диапазон за время, не превышающее агротехнологически приемлемого.

Для оценки устойчивости разработанного алгоритма к изменению внешних условий была построена карта распределения погрешности дозирования (рис. 5). Моделирование проводилось в диапазоне рабочих скоростей движения агрегата от 5 до 25 км/ч и при изменении насыпной плотности удобрений в пределах от 900 до 1300 кг/м³.

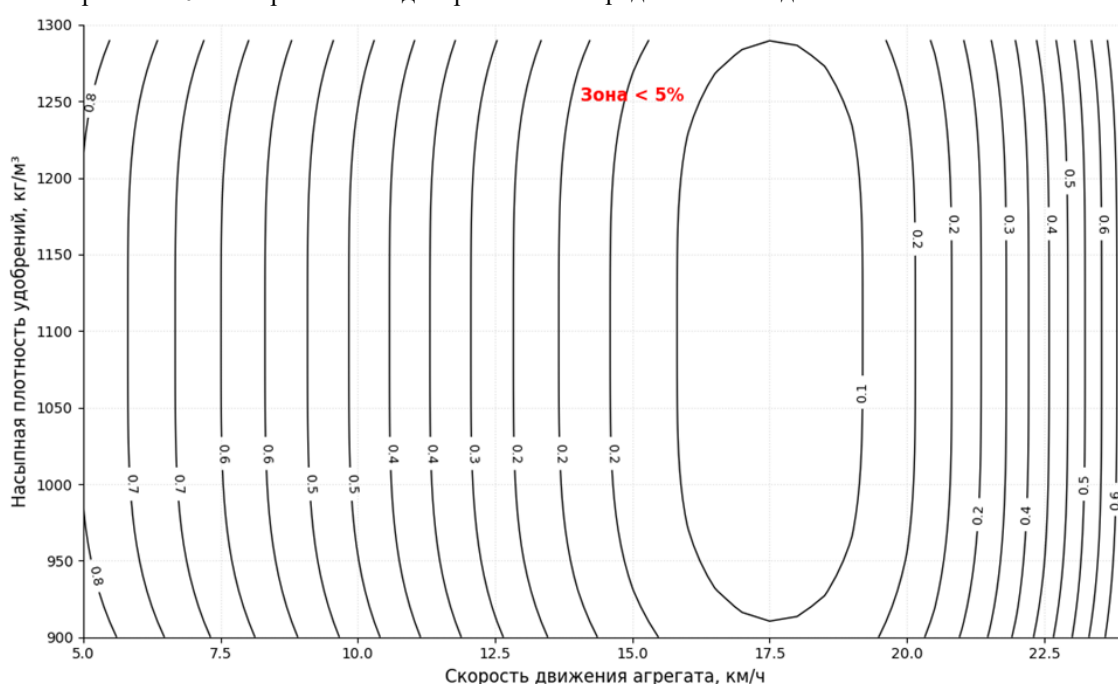


Рис. 5 – График распределения погрешности дозирования
Fig. 5 – Graph of dosing error distribution

Результаты параметрического моделирования представлены на карте распределения погрешности дозирования (рис. 5), где ось абсцисс соответствует скорости движения агрегата (V_m , км/ч), ось ординат – насыпной плотности материала (ρ , кг/м³), а замкнутые контуры отображают относительную погрешность дозирования Δ , %.

Статистическая обработка результатов 225 расчётных сценариев показала, что средняя погрешность дозирования во всём исследованном диапазоне составила 2,9%, при этом максимальная погрешность (4,7%) зафиксирована в зоне сочленения минимальной скорости (5 км/ч) и минимальной плотности (900 кг/м³). В диапазоне скоростей 8 – 22 км/ч и плотности 950–1250 кг/м³ погрешность не превышает 3,5%. Доля сценариев, в которых погрешность превысила установленный агротехнический допуск в 5%, составила менее 2%.

Контуры с изолиниями на графике выделяют зоны устойчивой работы системы, где итоговая погрешность дозирования не превышает установленного допуска. Как следует из представленной визуализации, алгоритм обеспечивает требуемую точность во всём диапазоне рабочих скоростей и для материалов с типичными значениями плотности.

Таким образом, теоретически достижимая точность дозирования в разработанной системе оценивается в диапазоне, соответствующей агротехническим требованиям к внесению минеральных удобрений. Разработанная алгоритмическая основа обеспечивает:

- замкнутый контур управления с обратной связью по фактическому расходу;
- двухуровневый контроль суммарной подачи и подачи каждого компонента (N, P, K) в отдельности;
- возможность компенсации возмущающих

факторов (изменение плотности, влажности, гранулометрического состава, скорости движения, уклонов поля), что недоступно традиционным объёмным системам.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на натурную верификацию предложенных алгоритмических решений в полевых условиях с использованием разработанного комплекса аппаратных средств.

Выводы. 1. По результатам системного анализа возмущающих факторов выполнена классификация факторов, влияющих на точность дозирования компонентов тукоосмеси в пневматических штанговых агрегатах. Факторы разделены на три группы: случайные (плотность, влажность, гранулометрический состав, рельеф поля), технологические (скорость движения, состав смеси, норма внесения) и управляемые (положение дозирующих заслонок, скорость транспортирования). Для каждой группы определены контролируемые параметры и установлены количественные диапазоны их варьирования (насыпная плотность 900–1300 кг/м³, скорость движения 5–25 км/ч), что позволило обосновать структуру системы управления с обратной связью.

2. В результате достижения цели исследования разработана алгоритмическая модель, представленная структурной схемой автоматизированной системы управления дозированием, реализующей замкнутый контур регулирования с обратной связью по фактическому расходу каждого компонента (N, P, K). Схема включает блок управления, датчики уровня и расхода, исполнительные механизмы, а также информационные связи, обеспечивающие двухуровневый контроль суммарной подачи и подачи каждого элемента в отдельности.

3. Выполнена формализация алгоритма работы системы в виде блок-схемы в соответствии с ГОСТ 19.701-90 (ISO 5807-85). Алгоритм предусматривает циклическое сравнение заданного и фактического расхода с допустимой погрешностью и формирование корректирующих воздействий на исполнительные механизмы при превышении установленного порога.

4. Получены расчётные зависимости для

определения суммарной подачи тукоосмеси и её распределения по компонентам в зависимости от нормы внесения, скорости движения агрегата и заданных долей элементов на элементарном участке поля (формулы 1 и 2). Предложен подход к оценке предельной погрешности системы на основе максимальной погрешности отдельных узлов (формулы 3 и 4).

5. Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность и устойчивость разработанного алгоритма. Система обеспечивает возвращение фактического расхода к заданному значению в пределах допустимой погрешности ($\Delta = 3\text{--}5\%$) за время не более 3 с после возникновения возмущения (рис. 4) и сохраняет высокую точность дозирования во всём диапазоне эксплуатационных скоростей (5–25 км/ч) и вариаций насыпной плотности материала (900–1300 кг/м³) (рис. 5). Доля сценариев, в которых погрешность превысила установленный агротехнический допуск в 5%, составила менее 2%.

6. Применение предложенного алгоритма позволяет снизить среднюю погрешность дозирования с уровня 15–20% (характерного для разомкнутых систем) до уровня 3–5%, что подтверждено теоретической оценкой на основе анализа возмущающих факторов и паспортных характеристик датчиков расхода (погрешность 2–3%).

7. Дальнейшие исследования должны быть направлены на натурную верификацию предложенных алгоритмических решений в полевых условиях с использованием разработанного комплекса аппаратных средств.

Сведения о финансировании. Настоящая статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ, утверждённой протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию Российской Федерации от 29 мая 2025 года № 3.

Литература

1. The path to smart farming: innovations and opportunities in precision agriculture / Karunathilake EMBM, Le AT, Heo S, et al. // Agriculture. 2023. Vol. 13(8). P. 2-26. doi: 10.3390/agriculture13081593.
2. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications / Shafi U, Mumtaz R, García-Nieto J, et al. // Sensors. 2019. Vol. 19:17. P. 2-25. doi:10.3390/s19173796.
3. Dhoubhadel SP. Precision agriculture technologies and farm profitability. // Journal of Agricultural and Resource Economics. 2021. Vol. 46(2). P. 256–268. doi: 10.22004/ag.econ.303598.
4. Monteiro A, Santos S, Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. // Animals. 2021. Vol. 11(8). P. 23-45. doi:10.3390/ANI11082345.
5. Влияние удобрений на урожайность кукурузы в Ставропольском крае / В. Н. Багринцева, И. Н. Ивашенко, В. В. Дригидер и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 29-33. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_29.
6. Сухаева А.Р., Бодякина Т.В., Балданов М.Б. К вопросу механизации внесения удобрений // Научный журнал молодых ученых. 2025. № 2(42). С. 51-55.
7. Сиднева И. Е., Курдюмов В. И., Павлушин А. А. Теоретическое обоснование параметров рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3(59). С. 6-11. doi: 10.18286/1816-4501-2022-3-6-11.
8. Димитров А. А. Типы агрегатов для внесения минеральных удобрений // Современные проблемы АПК: сборник научных статей Института механики и энергетики, приуроченный к 90-й

научно-практической конференции «Аграрная наука – Северо-Кавказскому федеральному округу». – Ставрополь, 2025. № 1. С. 205-208.

9. Разработка агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукоسمесей в ресурсосберегающих геоинформационных агротехнологиях точного земледелия / С.Д. Ридный, Е.В. Кулаев, Д.И. Грицай, и др. // Агроинженерия. 2025. № 6 (27). С. 60-66. doi: 10.26897/2687-1149-2025-6-60-66

10. Grift T. E. Mass Flow Measurement of Granular Materials in Aerial Application – Part 1: Simulation and Modeling // Transactions of the ASAE. – 2001. – Т. 44. – №. 1. – Pp. 19-26. doi: 10.13031/2013.2299

11. Grift T. E., Walker J. T., Hofstee J. W. Materials in Aerial Application – Part 2: Experimental Model Validation // Transactions of the ASAE. 2001. Т. 44. – №. 1. Pp. 27-34. doi: 10.13031/2013.2300

12. Макаров В.А., Темников В.Н., Темников К.В. Система приборного обеспечения дифференцированного внесения минеральных удобрений в ГИС-технологиях // Нива Поволжья. 2011. №1(18). С. 46-49.

13. Research and Design of Precision Fertilizer Application Control System Based on PSO-BP-PID Algorithm / Meng, Z., Zhang, L., Wang, H., et al. // Agriculture 2022, 12, 1395. doi: 10.3390/agriculture12091395

14. Новикова К.В. Автоматическое управление технологическими процессами в сельскохозяйственной технике // Научное Образование. 2024. № 3(24). С. 115-117.

15. Обоснование параметров пневмотранспортной системы пневматического типа с разделяющимися потоками в посевных комплексах и агрегатах для внесения твердых минеральных удобрений / С.Д. Ридный, Е. В. Кулаев, А.А. Димитров и др. // Аграрный научный журнал. 2025. № 12. С. 181–186. doi: 10.28983/asj.y2025i12pp181-186.

16. Бухмиров В.В., Родионов Г.А. Математическое моделирование двухфазных потоков в установках пневмотранспорта мелкодисперсных материалов // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 5. С. 24-28.

17. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Моделирование работы пневмотранспорта в импульсно-поршневом режиме // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2018. №3(45). С. 6-9.

18. Попенко А. Ю. Теоретические исследования движения частицы удобрения в закрытом наклонном воздушном канале // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. №. 2 (88). С. 118-122.

19. Разработка алгоритмов для системы анализа и обработки информации / А.А. Соколов, Ф.В. Чихтисова, А.М. Коломыщ и др. // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. №6 (25). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritmov-dlya-sistemy-analiza-i-obrabotki-informatsii> (Дата обращения 26.12.2025).

20. Разработка интеллектуальных алгоритмов для оптимизации автоматизации технологических операций / Василевский А.В., Хомченко А.Е., Макаров В.М. и др. // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 4А. С. 190-199.

References

1. Karunathilake EMBM, Le AT, Heo S. The path to smart farming: innovations and opportunities in precision agriculture. Agriculture. 2023; Vol.13(8). 2-26 p. doi: 10.3390/agriculture13081593.

2. Shafi U, Mumtaz R, Garcia-Nieto J. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. Sensors. 2019; Vol.19:17. 2-25 p. doi: 10.3390/s19173796.

3. Dhoubhadel SP. Precision agriculture technologies and farm profitability. Journal of Agricultural and Resource Economics. 2021; Vol.46(2). 256-268 p. doi: 10.22004/ag.econ.303598.

4. Monteiro A, Santos S, Goncalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. Animals. 2021; Vol.11(8). 23-45 p. doi: 10.3390/ANI11082345.

5. Bagrintseva VN, Ivashenko IN, Dridiger VV. [Influence of fertilizers on corn yield in Stavropol Krai]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023; Vol.37. 7. 29-33 p. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_29.

6. Sukhaeva AR, Bodyakina TV, Baldanov MB. [On the issue of mechanization of fertilizer application]. Nauchnyy zhurnal molodykh uchenykh. 2025; 2(42). 51-55 p.

7. Sidneva IE, Kurdyumov VI, Pavlushin AA. [Theoretical substantiation of working unit parameters of mineral fertilizer spreader]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2022; 3(59). 6-11 p. doi: 10.18286/1816-4501-2022-3-6-11.

8. Dimitrov AA. [Types of units for applying mineral fertilizers. Modern problems of agro-industrial complex]. Sbornik nauchnykh statey Instituta mekhaniki i energetiki, priurochenny k 90-i nauchno-prakticheskoy konferentsii “Agrarnaya nauka – Severo-Kavkazskomu federalnomu okrugu”. Stavropol. 2025; 1. 205-208 p.

9. Ridnyy SD, Kulaev EV, Gritsay DI. [Development of a boom-type unit with a pneumatic transport system for differentiated application of fertilizer mixtures in resource-saving geoinformation agricultural technologies of precision farming]. Agroinzheneriya. 2025; 6 (27). 60-66 p. doi: 10.26897/2687-1149-2025-6-60-66

10. Grift TE. Mass flow measurement of granular materials in aerial application – Part 1: simulation and modeling. Transactions of the ASAE. 2001; Vol.44. 1. 19-26 p. doi: 10.13031/2013.2299

11. Grift TE, Walker JT, Hofstee JW. Materials in aerial application – Part 2: experimental model validation. Transactions of the ASAE. 2001; Vol.44. 1. 27-34 p. doi: 10.13031/2013.2300

12. Makarov VA, Temnikov VN, Temnikov KV. [Instrumentation system for differentiated application of mineral fertilizers in GIS technologies]. Niva Povolzhya. 2011; 1(18). 46-49 p.

13. Meng Z, Zhang L, Wang H. Research and design of precision fertilizer application control system based on PSO-BP-PID algorithm. Agriculture. 2022; 12. 1395 p. doi:10.3390/agriculture12091395

14. Novikova KV. [Automatic control of technological processes in agricultural machinery]. Nauchnoe obrazovanie. 2024; 3(24). 115-117 p.

15. Ridnyy SD, Kulaev EV, Dimitrov AA. [Justification the parameters of pneumatic transport system of a pneumatic type with dividing flows in seeding complexes and units for applying solid mineral fertilizers]. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2025; 12. 181-186 p. doi: 10.28983/asj.y2025i12pp181-186.

16. Bukhmirov VV, Rodionov GA. [Mathematical modeling of two-phase flows in pneumatic transport units for finely dispersed materials]. Vestnik IGÉU. 2013; Issue 5. 24-28 p.

17. Velikanov NL, Naumov VA, Koryagin SI. [Modeling of pneumatic transport operation in pulse-piston mode]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2018; 3(45). 6-9 p.
18. Popenko AYU. [Theoretical research of fertilizer particle motion in a closed inclined air channel]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021; 2 (88). 118-122 p.
19. Sokolov AA, Chikhtisova FV, Kolomyts AM. [Development of algorithms for an information analysis and processing system]. [Internet]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2014; 6 (25). [cited 2025, December 26]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritmov-dlya-sistemy-analiza-i-obrabotki-informatsii>.
20. Vasilevskiy AV, Khomchenko AE, Makarov VM. [Development of intelligent algorithms for optimizing technological operations automation]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*. 2025; Vol.15. 4A. 190-199 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Ридный Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент базовой кафедры машин и технологий АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: ridnyy@mail.ru, ORCID 0009-0004-5187-029X

Кулаев Егор Владимирович – кандидат технических наук, доцент базовой кафедры машин и технологий АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: bratinsa@gmail.com, ORCID 0000-0003-4152-6239

Димитров Анатолий Анатольевич – ассистент кафедры электротехники, физики и охраны труда Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: diagryp@gmail.com, ORCID 0009-0001-8321-4180

Халиуллин Дамир Тагирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: damirtag@mail.ru, ORCID 0000-0002-1941-0013

Мастепаненко Максим Алексеевич – кандидат технических наук, директор института механики и энергетики Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: [mma_26@inbox.ru](mailto:mmma_26@inbox.ru), ORCID 0000-0002-8684-118X

Вклад авторов:

С.Д. Ридный – поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии;

Е.В. Кулаев — теоретические исследования;

А.А. Димитров – редактирование текста, создание изображений;

Д.Т. Халиуллин – редактирование текста, финальное утверждение рукописи;

М.А. Мастепаненко – формальный анализ, администрирование данных.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 07.10.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Authors:

Ridnyy Sergey Dmitrievich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Basic Department of Agroindustrial Complex Machines and Technologies Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: ridnyy@mail.ru, ORCID 0009-0004-5187-029X

Kulaev Egor Vladimirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Basic Department of Agroindustrial Complex Machines and Technologies Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: bratinsa@gmail.com, ORCID 0000-0003-4152-6239

Dimitrov Anatoliy Anatolevich – Assistant Professor of Electrical Engineering, Physics and Occupational Safety Department Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: diagryp@gmail.com, ORCID 0009-0001-8321-4180

Khaliullin Damir Tagirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Agribusiness Machinery and Equipment Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: damirtag@mail.ru, ORCID 0000-0002-1941-0013

Mastepanenko Maksim Alekseevich – Ph.D. of Technical Sciences, Director of Mechanics and Power Engineering Institute Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: [mma_26@inbox.ru](mailto:mmma_26@inbox.ru), ORCID 0000-0002-8684-118X

Contribution of the authors:

S.D. Ridnyy – Search for publications on the article's topic, manuscript writing, expert review, approval of final version;

E.V. Kulaev – Theoretical research;

A.A. Dimitrov – Text editing, image creation;

D.T. Khaliullin – Text editing, final approval of the manuscript;

M.A. Mastepanenko – Formal analysis, data administration.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 07.10.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.

