

Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 1 (57). С. 69–77

Vestnik Kurganskoj GSNA. 2026; (1-57): 69–77

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 631.348

Код ВАК 4.3.1

DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_69_77

EDN: VNVWQX

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МОДУЛЯ-ПРИСТАВКИ ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН

Ильнар Айдарович Валиуллин¹, Булат Гусманович Зиганшин²✉, Дамир Тагирович Халиуллин³, Ренат Айратович Файзуллин⁴

^{1, 2, 3, 4} Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

¹ ilnarvaliullin1999@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4611-8489>

² zigan66@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8250-9403>

³ damirtag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1941-0013>

⁴ fayzullinrenat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8510-8639>

Аннотация. Масштабное использование биопрепаратов для предпосевной обработки семян зачастую сдерживается отсутствием технических решений, обеспечивающих минимальный временной интервал между обработкой и посевом, что критично для эффективности живых микроорганизмов. Цель исследования – разработка и обоснование математической модели для расчета секундного расхода рабочей жидкости в модуле-приставке, интегрируемой в посевной агрегат, с учетом его кинематических параметров. Исследования проводились в 2024–2025 гг. в Казанском ГАУ аналитическим методом. В основу модели положен кинематический анализ работы высевающего аппарата с учетом производительности агрегата, частоты вращения катушки (n), коэффициента буксования ($\epsilon = 0,03–0,1$) и конструктивных параметров. Выведено итоговое уравнение для определения секундной подачи вводимого биопрепарата. Расчеты выполнены для диапазона скоростей 5–20 км/ч и норм высева 100, 200 и 300 кг/га. В результате установлено, что секунднй расход препарата изменяется от 0,0023 л/с (при $V = 5$ км/ч, $Q = 100$ кг/га) до 0,028 л/с (при $V=20$ км/ч, $Q=300$ кг/га). На основе регрессионного анализа расчетных данных в Microsoft Excel получены уравнения прямых с коэффициентом детерминации $R^2 = 1,0$, что подтверждает детерминированную точность модели. Для нормы высева 100 кг/га зависимость описывается уравнением $q_n = 0,0023V - 6 \times 10^{-18}$; для 200 кг/га – $q_n = 0,0047V - 5 \times 10^{-5}$; для 300 кг/га – $q_n = 0,0071V - 0,0002$. Разработанная методика позволяет точно дозировать биопрепарат в реальном времени по сигналу датчика скорости, обеспечивая равномерность обработки и экономию вносимого препарата до 25–30 %. Выведенные уравнения являются готовым алгоритмом для программирования системы автоматического регулирования производительности насоса-дозатора. Результаты работы создают основу для проектирования интеллектуальных посевных комплексов и могут быть использованы в сельскохозяйственном машиностроении при разработке и модернизации оборудования для предпосевной обработки семян.

Ключевые слова: предпосевная обработка семян, биопрепараты, модуль-приставка, посевной агрегат, секунднй расход препарата, камера смешивания.

Благодарности: работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (регистрационный номер заявки №124 от 05.09.2025. Соглашение № 8 от 01.12.2025).

Для цитирования: Валиуллин И.А., Зиганшин Б.Г., Халиуллин Д.Т., Файзуллин Р.А. Исследование кинематических параметров модуля-приставки для предпосевной обработки семян // Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 1(57). С. 69–77. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_69_77. EDN: VNVWQX.

Scientific article

RESEARCH OF THE KINEMATIC PARAMETERS OF THE ATTACHMENT MODULE
FOR PRE-SOWING SEED TREATMENT

Ilnar A. Valiullin¹, Bulat G. Ziganshin²✉, Damir T. Khaliullin³, Renat A. Fayzullin⁴

^{1, 2, 3, 4} Kazan State Agricultural University, Kazan, Russia

¹ ilnarvaliullin1999@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4611-8489>

² zigan66@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8250-9403>

³ damirtag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1941-0013>

⁴ fayzullinrenat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8510-8639>

© Валиуллин И.А., Зиганшин Б.Г., Халиуллин Д.Т., Файзуллин Р.А., 2026

Abstract. The large-scale use of biological preparations for pre-sowing seed treatment is often hindered by the lack of technical solutions that ensure a minimum time interval between treatment and sowing, which is critical for the effectiveness of living microorganisms. The purpose of the study is to develop and substantiate a mathematical model for calculating the weight flow rate of an operating fluid in an attachment module integrated into a seed unit, taking into account its kinematic parameters. The research was conducted in 2024-2025 at the Kazan State Agrarian University using the analytical method. The model is based on a kinematic analysis of the seeding machine, taking into account the unit performance, the speed of rotation of the spool (n), the slip coefficient ($\epsilon = 0.03-0.1$) and the design parameters. The final equation for determining the weight flow rate of the injected biological preparations is derived. The calculations were performed for a speed range of 5-20 km/h and seeding rates of 100, 200 and 300 kg/ha. As a result, it has been found that the weight flow rate of the preparation varies from 0.0023 l/s (at $V = 5$ km/h, $Q = 100$ kg/ha) to 0.028 l/s (at $V = 20$ km/h, $Q = 300$ kg/ha). Based on the regression analysis of the calculated data in Microsoft Excel, straight line equations with a coefficient of determination $R^2 = 1.0$ are obtained, which confirms the deterministic accuracy of the model. For a seeding rate of 100 kg/ha, the dependence is described by the equation $q_n = 0,0023V - 6 \times 10^{-18}$, for 200 kg/ha – $q_n = 0,0047V - 5 \times 10^{-5}$, for 300 kg/ha – $q_n = 0,0071V - 0,0002$. The developed technique makes it possible to accurately dose the biological preparation in real time according to the signal of the speed sensor, ensuring uniformity of processing and saving in the applied preparation up to 25-30%. The derived equations are a ready-made algorithm for programming the automatic control system of the metering pump. The results of the study form the basis for designing intelligent sowing complexes and can be used in agricultural engineering in the development and modernization of equipment for pre-sowing seed treatment.

Keywords: pre-sowing seed treatment, biological preparations, attachment module, sowing unit, weight flow rate of the preparation, mixing chamber.

Acknowledgments: the work was carried out at the expense of a grant provided in 2025 by the Foundation for Science and Technology of the Republic of Tatarstan for fundamental and exploratory research in scientific and educational organizations, enterprises and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan (application registration number No. 124 dated 05.09.2025. Agreement No. 8 dated 01.12.2025).

For citation: Valiullin I.A., Ziganshin B.G., Khaliullin D.T., Fayzullin R.A. Research of the kinematic parameters of the attachment module for pre-sowing seed treatment // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2026; (1-57): 69–77. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_69_77. EDN: VNVWQX. (In Russ).

Введение. Подготовка семян к посеву представляет собой важный этап в агрономической практике, комплекс мероприятий которой направлен на улучшение всхожести и жизнеспособности посевного материала. Эффективность данного процесса влияет на формирование высокого урожая и устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды. Технология подготовки семян к посеву включает несколько последовательных операций, среди которых ключевыми являются очистка, калибровка и обработка посевного материала защитно-стимулирующими составами [1; 2]. Для защиты семян традиционно технология включает обработку химическими протравителями, однако их применение сопряжено с негативным воздействием на почвенную микрофлору и безопасность производимой продукции [3; 4].

В последние годы в аграрном производстве наблюдается устойчивая тенденция к расширению использования биопрепаратов для предпосевной обработки семян [5; 6]. Важнейшим преимуществом биопрепаратов является их способность стимулировать ростовые процессы растений. Формируемая препаратами микробиологическая защита подавляет развитие патогенных микроорганизмов и индуцирует системную устойчивость растений к заболеваниям. Это позволяет сократить объемы применения пестицидов, что положительно сказывается на экологической обстановке и безопасности продукции [7]. Однако их существенный недостаток – прямая зависимость эффективности от времени между обработкой семян и их попаданием в почву. Использование отдельной протравливающей техники увеличивает количество операций, а вынужденное нахождение семян в состоянии покоя снижает жизнеспособность нанесенных микроорганизмов [8; 9]. Решением указанных проблем является обработка семян непосредственно в процессе сева, что требует разра-

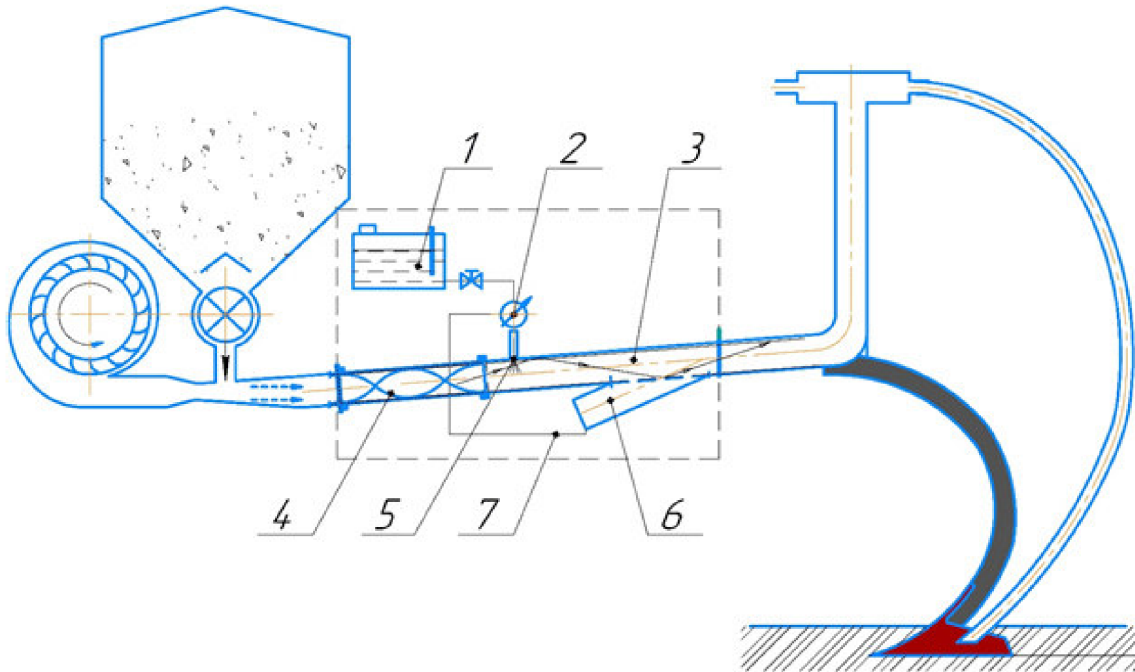
ботки новых технических средств, таких как модуль-приставка к посевным агрегатам.

Эффективность работы такого модуля, обеспечивающего равномерное покрытие и экономичный расход препарата, в значительной степени определяется кинематическими и режимными величинами. Ключевым технологическим параметром является секундный расход рабочей жидкости. Его неверный расчет приводит к перерасходу препарата или к недостаточному покрытию семян, что снижает защитный эффект [10].

В связи с этим целью исследований является разработка и теоретическое обоснование математической модели для расчета секундного расхода рабочей жидкости в модуле-приставке, интегрируемой в посевной агрегат, с учетом его кинематических параметров.

Материалы и методы. Теоретические и аналитические исследования проводились в 2024–2025 гг. на базе Казанского государственного аграрного университета. Объектом исследования служил экспериментальный образец модуля-приставки, разработанный на кафедре «Машины и оборудование в агробизнесе» (рисунок 1) [11]. Исследования выполнялись для семян сельскохозяйственных культур и биопрепаратов, реологические характеристики которых накладывают ограничение на максимальный перепад давления в системе распыления, не превышающий 0,2 МПа.

Устройство предназначено для интеграции в пневмосистему посевного агрегата с целью обработки семян защитно-стимулирующими препаратами непосредственно в процессе посева. Конструкция модуля-приставки включает следующие основные элементы: емкость для рабочей жидкости (1), насос-дозатор (2), камеру смешивания (3) со встроенной винтовой поверхностью (4), распылитель (5), сборник излишка рабочей жидкости (6) и отводной патрубок (7).



1 – емкость для рабочей жидкости; 2 – насос-дозатор; 3 – камера смешивания; 4 – винтовая поверхность (шнек); 5 – распылитель; 6 – сборник излишка рабочей жидкости; 7 – отводной патрубкок
 Рисунок 1 – Экспериментальный образец модуль-приставки, установленный в пневмосистему посевного агрегата

1 – tank for operating fluid; 2 – metering pump; 3 - mixing chamber; 4 – screw surface (auger conveyor); 5 – sprayer; 6 – collector of excess operating fluid; 7 – outlet pipe

Figure 1 – Prototype of the attachment module installed in the pneumatic system of the sowing unit

Технологический процесс работы устройства заключается в следующем. Семена, дозируемые высевальной системой пневматической сеялки, транспортируются воздушным потоком в камеру смешивания. Одновременно насос-дозатор подает рабочий раствор из емкости к распылителю, который формирует аэрозоль. В камере смешивания восходящий поток семян и аэрозоля закручивается винтовой поверхностью, что обеспечивает интенсивное и равномерное покрытие поверхности семян препаратом. Часть рабочей жидкости, не осаждаемая на семенах, улавливается в сборнике и через отводной патрубок рециркулирует обратно в зону распыления [11; 12].

В основу исследования положен аналитический метод. На первом этапе исследования проведен системный анализ технологического процесса, который описывается последовательностью операций: дозированная подача семян высевальным аппаратом сеялки, подача и распыление рабочей жидкости, смешивание компонентов в камере с винтовой поверхностью, осаждение и рециркуляция неизрасходованного препарата [13; 14].

На следующем этапе выполнено обоснование конструктивных и режимных параметров устройства: диаметр камеры смешивания принят равным 160 мм, что соответствует стандартизированным размерам семяпроводов современных посевных

агрегатов; количество и расположение распылителей обоснованы необходимостью обеспечения полного охвата поперечного сечения камеры, а давление в системе ограничено значением 0,2 МПа в соответствии с реологическими характеристиками биопрепаратов.

Завершающим этапом стало математическое моделирование рабочих процессов [15; 16]. За основу была принята производительность посевной машины, определяемая по формуле:

$$W_M = \frac{V_M \times B \times 10^3}{10^4} = 0,1V_M \times B, \quad (1)$$

где W_M – производительность посевного агрегата, га/час;

V_M – скорость агрегата, км/час;

B – ширина захвата посевного агрегата, м.

На основе производительности W_M и заданной агротехнической нормы высева Q (кг/га) определяется секундный расход семян q_c (кг/с), характеризующий массу семян, поступающих в систему обработки в единицу времени, и является первичным для расчета потребления рабочей жидкости:

$$q_c = \frac{Q \times W_M}{3,6 \times 10^4} = \frac{Q \times V_M \times B}{3,6 \times 10^5}, \quad (2)$$

где Q – заданная норма высева семян, кг/га.

С учетом нормы высева Q (кг/га) и требуемого соотношения препарата к семенам (10 л/т) была предложена расчетная формула для секундной подачи препарата [17]:

$$q_{\text{п}} = \frac{Q \times V_{\text{м}} \times B}{3,6 \times 10^7}, \quad (3)$$

где Q – расчетная норма высева, кг/га;
 $q_{\text{п}}$ – секундная подача препарата, л/сек.

Для точного расчета нормы высева семян, необходимо учитывать физико-механические свойства обрабатываемых семян. В таблице приведены основные характеристики семян различных сельскохозяйственных культур, оказывающие влияние на процесс высева и дозирования рабочей жидкости.

При учете поправочных коэффициентов расчетная норма высева будет определяться по следующей формуле:

$$Q = \frac{F \times lp \times j \times i \times K_{\text{зап}} \times K_{\text{в}} \times K_{\text{с}}}{\pi \times D \times a(1 + K_{\text{т}})}, \quad (4)$$

где F – площадь желобков катушки, см²;
 lp – длина рабочей части катушки, мм;
 j – объемный вес зерна, т;
 i – передаточное отношение от колеса к катушке (дозатору) (0,5–1,5 для зерновых и 0,12–2,2 для овощных сеялок);

$K_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения желобка (0,85–0,98);

$K_{\text{в}}$ – поправка на влажность;

$K_{\text{с}}$ – коэффициент сыпучести;

D – диаметр приводного колеса, м;

a – ширина междурядья, м;

$K_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий температурные условия.

Для учета изменения рабочей скорости агрегата в модель введена зависимость частоты вращения высевающей катушки от скорости движения агрегата:

$$n = \frac{V_{\text{м}} \times i \times 60}{\pi \times D(1 - \varepsilon)}, \quad (5)$$

где n – частота вращения катушки высевающего агрегата, мин⁻¹;

$V_{\text{м}}$ – скорость движения посевного агрегата, м/сек;

ε – коэффициент скольжения колес по почве, равный (0,03–0,1).

Путем подстановки преобразованного выражения для скорости в формулу расхода получено итоговое уравнение для определения секундной подачи препарата:

$$q_{\text{п}} = \frac{Q \times n \times \pi \times D(1 - \varepsilon) \times B}{2,16 \times 10^7 \cdot i}. \quad (6)$$

Обработка данных, регрессионный анализ и визуализация результатов выполнены в программе Microsoft Excel. Параметры линейных зависимостей определялись методом наименьших квадратов. Качество аппроксимации оценивалось по коэффициенту детерминации (R^2).

Результаты исследований и их обсуждение. На основе математической модели (формула 2) были рассчитаны секундные расходы семян ($q_{\text{с}}$) для диапазона рабочих скоростей 5–20 км/ч и трех практических норм высева: $Q_1 = 100$ кг/га, $Q_2 = 200$ кг/га, $Q_3 = 300$ кг/га. Данные зависимости визуализированы на графиках (рисунок 2), которые служат наглядным инструментом для оперативной оценки параметров.

Анализ данных, представленных на рисунке 2,

Таблица – Физико-механические свойства семян и поправочные коэффициенты

Table – Physical and mechanical properties of seeds and correction factors

Культура	Объемный вес j , т/м ³	Натура, г/л	Коэффициент заполнения $K_{\text{зап}}$	Поправка на влажность $K_{\text{в}}$	Коэффициент сыпучести $K_{\text{с}}$	Коэффициент трения о сталь
Пшеница	0,75 – 0,85	750 – 850	0,95	1,00	1,00	0,35 – 0,45
Ячмень	0,65 – 0,75	650 – 750	0,92	0,98	0,98	0,38 – 0,48
Овес	0,50 – 0,60	500 – 600	0,88	0,95	0,95	0,42 – 0,52
Кукуруза	0,70 – 0,80	700 – 800	0,96	1,02	1,02	0,30 – 0,40
Подсолнечник	0,40 – 0,50	400 – 500	0,85	0,90	0,90	0,45 – 0,55
Рапс	0,60 – 0,65	600 – 650	0,82	0,88	0,88	0,50 – 0,60
Соя	0,70 – 0,75	700 – 750	0,90	0,94	0,94	0,40 – 0,50
Горох	0,75 – 0,85	750 – 850	0,93	0,97	0,97	0,35 – 0,45
Рис	0,55 – 0,65	550 – 650	0,89	0,93	0,93	0,48 – 0,58
Гречиха	0,60 – 0,65	600 – 650	0,84	0,91	0,91	0,52 – 0,62

позволяет количественно оценить необходимость точной синхронизации между скоростью передвижения агрегата и дозированием семян для достижения равномерности густоты посева.

Расчет секундного расхода препарата (q_n), выполненный по формуле (6), выявил синхронную динамику (рисунок 3). Как и в случае с семенами, расход рабочей жидкости линейно зависит от скорости и нормы высева, что является фундаментальным условием для точного соблюдения

агротехнического соотношения «препарат/семена» (10 л/т) в изменяющихся условиях работы агрегата.

Анализ представленных графиков показывает, что для поддержания заданной агротехнической нормы высева (Q) увеличение скорости движения агрегата (V) линейно повышает требуемую производительность высевающего аппарата и, как следствие, расход семян (q_c). Поскольку расход рабочей жидкости (q_n) нормативно привязан к массе семян, наблюдается синхронная, пропор-

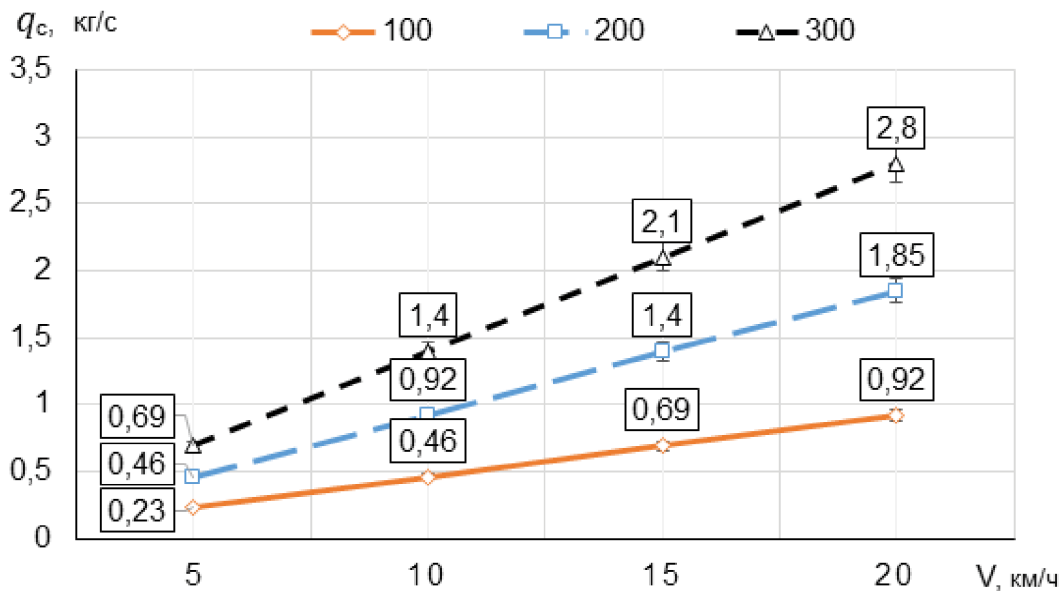


Рисунок 2 – Зависимости расхода семян от скорости движения посевного агрегата, построенные в Microsoft Excel

Figure 2 – Dependences of seed flow rate on the travel speed of sowing unit, built in Microsoft Excel

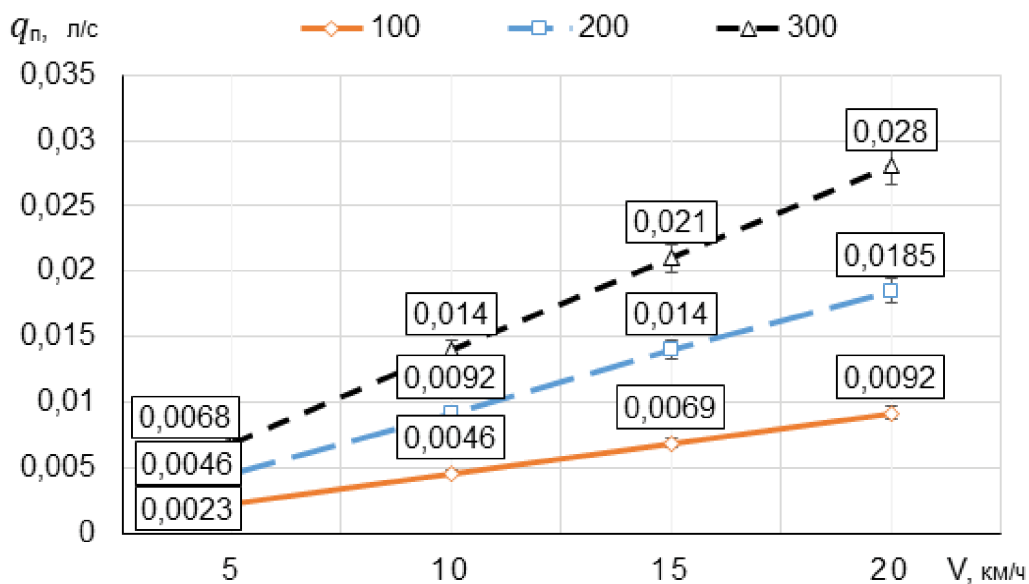


Рисунок 3 – Линейные зависимости секундного расхода препарата от скорости движения агрегата, построенные в Microsoft Excel

Figure 3 – Linear dependences of the weight flow rate of the preparation on the unit speed, built in Microsoft Excel

циональная динамика обоих параметров. Например, при норме высева 200 кг/га увеличение скорости с 5 до 15 км/ч приводит к росту секундного расхода семян с 0,46 до 1,4 кг/с, а расхода препарата – с 0,0046 до 0,014 л/с.

На основе расчетных данных методом наименьших квадратов в Microsoft Excel получены уравнения линейной регрессии.

Для секундного расхода семян:

$$\text{Для } Q_1 = 100 \text{ кг/га:} \\ q_c = 0,23V. \quad (7)$$

$$\text{Для } Q_2 = 200 \text{ кг/га:} \\ q_c = 0,465V - 0,005. \quad (8)$$

$$\text{Для } Q_3 = 300 \text{ кг/га:} \\ q_c = 0,703V - 0,0002. \quad (9)$$

Для секундного расхода препарата:

$$\text{Для } Q_1 = 100 \text{ кг/га:} \\ q_n = 0,0023V - 6 \times 10^{-18}. \quad (10)$$

$$\text{Для } Q_2 = 200 \text{ кг/га:} \\ q_n = 0,0047V - 5 \times 10^{-5}. \quad (11)$$

$$\text{Для } Q_3 = 300 \text{ кг/га:} \\ q_n = 0,0071V - 0,0002. \quad (12)$$

Полученные уравнения являются формализованным аналитическим решением, выведенным из теории рабочих процессов посевных машин. Такой результат подтверждает, что в рамках принятых допущений модель обладает абсолютной предсказательной силой, а вариация расхода полностью определяется изменением скорости и нормы высева. Это принципиально важно для создания систем управления, основанных на детерминированных алгоритмах, а не на статистических корреляциях.

Полученные диапазоны удельного расхода препарата (0,023 – 0,093 л/т в пересчете на секундные значения) соответствуют агротехническим рекомендациям для биопрепаратов [10], а также данным других авторов по эффективному расходу рабочей жидкости [12]. Однако, в отличие от многих существующих моделей, ориентированных на стационарные протравители [13] или общие зависимости производительности [15], предложенная модель впервые в явном виде интегрирует кинематический параметр высевающего аппарата – частоту вращения катушки (n). Именно учет этого параметра через формулу (5) обеспечивает фундаментальную возможность жесткой синхронизации процесса обработки с процессом посева, что является критическим требованием для работы с биопрепаратами. Данный подход позволяет перейти от регулирования по косвенному параметру (площади) к прямому управлению по параметру, непосредственно связанному с массовым расходом семян.

Полученные уравнения вида $q_n = K \times V + B$ пред-

ставляют собой готовый алгоритмический блок для системы управления. На их основе может быть реализована структурная схема системы автоматического регулирования (САР) разомкнутого типа по возмущению. В такой системе контроллер, получая сигнал о текущей скорости движения (V) от GPS-приемника или датчика частоты вращения колеса и зная заданную норму высева (Q), по соответствующему уравнению (10–12) в реальном времени, вычисляет управляющее воздействие для шагового или сервоуправляемого насоса-дозатора. Это обеспечивает автоматическое поддержание заданного соотношения «препарат/семена» при любых изменениях скорости в поле. Для повышения надежности и компенсации возможных возмущений (засорение форсунок, изменение вязкости) в перспективе предлагается дополнить контур обратной связью по фактическому расходу жидкости с помощью датчика расхода, создавая таким образом более точную замкнутую САР.

Необходимо подчеркнуть, что значение $R^2 = 1,0$ достигнуто для теоретических расчетов в рамках идеализированной модели. В реальных полевых условиях могут проявляться факторы, внесившие в модель возмущения: динамическое изменение коэффициента буксования (ϵ), неидеальность дозирования семян, вариабельность их физико-механических свойств. Это может привести к статистическому разбросу фактических данных относительно расчетной линии. Поэтому следующим логичным этапом являются натурные испытания экспериментального образца, целью которых станет верификация модели в полевых условиях, оценка степени влияния возмущающих факторов и адаптация алгоритмов управления для работы в контуре обратной связи.

Таким образом, в работе не только количественно установлены и строго обоснованы детерминированные зависимости расхода препарата от режимных параметров агрегата, но и предложена конкретная методологическая основа для перехода к созданию интеллектуальных систем точного земледелия, обеспечивающих максимальную эффективность применения биопрепаратов.

Заключение. В результате проведенного исследования достигнута поставленная цель – выполнен анализ ключевых параметров конструкции модуля-приставки для улучшения качества обработки семян биопрепаратами непосредственно в процессе посева. Решены все поставленные задачи: выведены формулы, устанавливающие взаимосвязь расхода препарата со скоростью движения посевного агрегата; проведены расчеты секундного расхода препарата для диапазона рабочих скоростей 5–20 км/ч и норм вы-

сева 100, 200 и 300 кг/га; полученные данные систематизированы и проанализированы с построением регрессионных уравнений. Разработана математическая модель и получены конкретные регрессионные зависимости (10–12) для расчета секундного расхода биопрепарата в модуле-приставке, ключевым отличием которых является учет кинематического параметра – частоты вращения высевающей катушки, что обеспечивает принципиальную возможность синхронного управления процессом обработки с процессом посева.

Практическая значимость работы подтверждена конкретными расчетными показателями: установлено, что при скорости 5 км/ч и норме высева 100 кг/га, расход составляет 0,0023 л/с, а при скорости 20 км/ч и норме высева 300 кг/га – 0,028 л/с. Выведенные математические зависимости могут быть применены для подбора комплектующих экспериментального образца. Полученные результаты могут быть использованы в сельскохозяйственном машиностроении при проектировании оборудования, а также в агропромышленном комплексе для точной настройки модуля-приставки для обработки семян на посевном комплексе.

Полученные уравнения вида $q_n = K \times V + B$ являются формализованным алгоритмом и готовым техническим решением для программирования системы автоматического регулирования производительности насоса-дозатора в реальном времени по сигналу датчика скорости. Это позволяет перейти от проектирования механического модуля к созданию интеллектуального агротехнического комплекса.

Для дальнейшего развития исследований целесообразно провести полевые испытания экспериментального образца для верификации теоретических расчетов, разработать на основе полученных уравнений алгоритм для системы автоматического регулирования расхода препарата в режиме реального времени, а также исследовать влияние других конструктивных параметров модуля-приставки на качество обработки семян.

Список источников

1. Магомедова Д.С., Курбанов С.А. Эффективность применения препарата Биостим зерновой в технологии возделывания озимой мягкой пшеницы // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 3. С. 11-15. DOI: 10.31857/S2500208224030025. EDN: YYTBFU.

2. Агроэкологические аспекты предпосевной подготовки семян в технологии возделывания чернотравника многобрачного (*Poterium Polygamum* Waldst) сорта СУЛТАН / С.А. Кшникаткин [и др.] // Нива Поволжья. 2022. № 4 (64). С. 1011. DOI: 10.36461/NP.2022.64.4.016. EDN: YIGEDN.

3. Кекало А.Ю. Экологизированный способ защиты семян пшеницы от фитопатогенов // Аграрная наука. 2021. № 11-12. С. 129-133. DOI: 10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-129-133. EDN: XHULOC.

4. Прогнозирование влияния физических факторов на жизнеспособность микроорганизмов биопрепаратов для защиты растений / Р.Ф. Сабиров [и др.] // Техника и оборудование для села. 2020. № 4 (274). С. 29-33. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-4-29-32. EDN: XQFTEO.

5. Айтбаева А.Т., Айтбаев Т.Е., Бурибаева Л.А. Әсімдіктердің өсуін үдеткіш жаңа биопрепараттардың көкөністік тамыржемістілердің тұқымдарының сапалық көрсеткіштеріне әсері // Почвоведение и агрохимия. 2025. No. 3. P. 82-94. DOI: 10.51886/1999-740X_2025_3_82. EDN: SGGPUR.

6. Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies / E.K. Mitter [et al.] // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021. Vol. 5. P. 606815. DOI: 10.3389/fsufs.2021.606815. EDN: YPZQZD.

7. Seed coating: a tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops / I. Rocha [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. Art. No. 1357. DOI: 10.3389/fpls.2019.01357.

8. Эффективность предпосевной обработки семян яровой пшеницы биопрепаратами «Спорекс» и «Цитогумат Старт» на фоне внесения минеральных удобрений / В.С. Курсакова [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 1 (243). С. 41-49. DOI: 10.53083/1996-4277-2025-243-1-41-49. EDN: LPINJV.

9. Воронцов В.А., Скорочкин Ю.П. Влияние основной обработки почвы, удобрений и средств защиты растений на продуктивность озимой пшеницы // Зернобобовые и крупяные культуры. 2021. № 4 (40). С. 53-58. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-4-53-58. EDN: MYLQCC.

10. Bio-priming of seeds: Plant stress management and its underlying cellular, biochemical and molecular mechanisms / S. Chakraborti [et al.] // Plant Stress. 2022. Vol. 3. P. 100052. DOI: 10.1016/j.stress.2021.100052. EDN: HWEJMR.

11. Модуль-приставка к пневматическим сеялкам для обработки семян защитно-стимулирующими препаратами: пат. 230935 Рос. Федерация. № 2024119853 / И.А. Валиуллин [и др.]; заявл. 15.07.2024; опубл. 25.12.2024.; Бюл. № 36. 5 с. EDN: NAHREI.

12. Новые технические средства для протравливания семян / Д.Т. Халиуллин [и др.] // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность:

технологии, инновации, рынки, кадры: научные труды II Международной научно-практической конференции. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2020. С. 115-120. EDN: UWCCUO.

13. Applications of plant growth-promoting rhizobacteria for increasing crop production and resilience / S. Hyder [et al.] // *Journal of Plant Nutrition*. 2023. Vol. 46. No. 10. P. 2551-2580. DOI: 10.1080/01904167.2022.2160742. EDN: EZHSUT.

14. Шепелев С.Д., Пятаев М.В., Кравченко Е.Н. Разработка технологии и технического средства прямого посева для условий засушливого земледелия // *Техника и оборудование для села*. 2025. № 2(332). С. 16-20. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-2-16-20. EDN: QUBZAP.

15. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований / В.Л. Баденко [и др.] // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 3. С. 437-445. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.437rus. EDN: YZKVEZ.

16. Несмиян А.Ю., Дубина К.П., Жигайлова А.П. Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного посева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника // *Инженерные технологии и системы*. 2023. Т. 33. № 1. С. 21-36. DOI: 10.15507/2658-4123.033.202301.021-036. EDN: VHRCTI.

17. Исаев А.Ю. Оценка качества прямого посева // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2017. № 4 (80). С. 33-38. EDN: ZEGBKD.

References

1. Magomedova D.S., Kurbanov S.A. Ehffektivnost' primeneniya preparata Biostim zernovoi v tekhnologii vzdelyvaniya ozimoi myagkoi pshenitsy [Efficiency of using the Biostim grain preparation in the cultivation technology of winter soft wheat]. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2024; (3): 11-15. DOI: 10.31857/S2500208224030025. EDN: YYTBFU. (In Russ).

2. Kshnikatkin S.A. [et al.] Agroekologicheskie aspekty predposevnoi podgotovki semyan v tekhnologii vzdelyvaniya chernogolovnika mnogobrachnogo (Poterium Polygamum Waldst) sorta SULTAN [Agroecological aspects of pre-sowing seed preparation in cultivation technology of Poterium Polygamum Waldst variety SULTAN]. *Volga Region Farmland*. 2022; 4(64): 1011. DOI: 10.36461/NP.2022.64.4.016. EDN: YIGEDN. (In Russ).

3. Kekalo A.Yu. Ehkologizirovannyi sposob zashchity semyan pshenitsy ot fitopatog-

enov [An environmentally friendly method for protecting wheat seeds from phytopathogens]. *Agrarian science*. 2021; (11-12): 129-133. DOI: 10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-129-133. EDN: XHULOC. (In Russ).

4. Sabirov R.F. [et. al.] Prognozirovaniye vliyaniya fizicheskikh faktorov na zhiznesposobnost' mikroorganizmov biopreparatov dlya zashchity rastenii [Prediction of the influence of physical factors on the viability of microorganisms in plant protection biopreparations]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020; 4(274): 29-33. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-4-29-32. EDN: XQFTEO. (In Russ).

5. Aitbaeva A.T., Aitbaev T.E., Buribaeva L.A. Əsimdikterdiң əsuiñ ydetkish zhaңa biopreparattardıñ kəkenistik tamyrzhemistilerdiң tūqumdarınyñ sapalyқ kəsetkishterine əseri [The effect of new plant growth promoters on the quality indicators of vegetable and root crop seeds]. *Pochvovedenie i agrokimiya*. 2025; (3): 82-94. DOI: 10.51886/1999-740X_2025_3_82. EDN: SGGPUR. (In Russ).

6. Mitter E.K. [et al.] Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021; (5): 606815. DOI: 10.3389/fsufs.2021.606815. EDN: YPZQZD.

7. Rocha I. [et al.] Seed coating: a tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10: 1357. DOI: 10.3389/fpls.2019.01357.

8. Kursakova V.S. [et al.] Ehffektivnost' predposevnoi obrabotki semyan yarovoi pshenitsy biopreparatami «Sporex» i «Tsitogumat StarT» na fone vneseniya mineral'nykh udobrenii [The effectiveness of pre-sowing treatment of spring wheat seeds with the biopreparations «Sporex» and «Cytohumate Start» against the background of the application of mineral fertilizers]. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2025; 1(243): 41-49. DOI: 10.53083/1996-4277-2025-243-1-41-49. EDN: LPINJV. (In Russ).

9. Vorontsov V.A., Skorochkin Yu.P. Vliyanie osnovnoi obrabotki pochvy, udobrenii i sredstv zashchity rastenii na produktivnost' ozimoi pshenitsy [The influence of primary tillage, fertilizers and plant protection products on the productivity of winter wheat]. *Zernobovoye i krupyanye kul'tury*. 2021; 4(40): 53-58. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-4-53-58. EDN: MYLQCC. (In Russ).

10. Chakraborti S. [et al.] Bio-priming of seeds: Plant stress management and its underlying cellular, biochemical and molecular mechanisms. *Plant Stress*. 2022; (3): 100052. DOI: 10.1016/j.stress.2021.100052. EDN: HWEJMR.

11. Modul'-pristavkak pnevmaticheskimi seyalkami dlya obrabotki semyan zashchitno-stimuliruyushchimi preparatami [Attachment module for pneumatic seeders for treating seeds with protective and stimulating preparations]: Pat. 230935 Rus. Federation. No 2024119853 / I.A. Valiullin [et al.]; dec. 15.07.2024; publ. 25.12.2024.; Bul. № 36. 5 с. EDN: NAHREI. (In Russ).

12. Khaliullin D.T. [et al.] Novye tekhnicheskie sredstva dlya protravlivaniya semyan [New technical means for seed treatment]. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technologies, Innovations, Markets, Personnel». Kazan: Kazanskii GAU; 2020: 115-120. EDN: UWCCUO. (In Russ).

13. Hyder S. [et al.] Applications of plant growth-promoting rhizobacteria for increasing crop production and resilience. *Journal of Plant Nutrition*. 2023; 46(10): 2551-2580. DOI: 10.1080/01904167.2022.2160742. EDN: EZHSUT.

14. Shepelev S.D., Pyataev M.V., Kravchenko E.N. Razrabotka tekhnologii i tekhnicheskogo sredstva pryamogo poseva dlya uslovii zasushlivogo zemledeliya [Development of technology and technical means for direct seeding for dryland farming conditions]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025; 2(332): 16-20. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-2-16-20. EDN: QUBZAP. (In Russ).

15. Badenko V.L. [et al.] Imitatsionnaya model' agroekosistemy kak instrument teoreticheskikh issledovaniy [Simulation model of agroecosystem as a tool for theoretical research]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*. 2017; 52(3): 437-445. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.437rus. EDN: YZKVEZ. (In Russ).

16. Nesmiyan A.Yu., Dubina K.P., Zhigailova A.P. Vliyanie diametra prisasyvayushchikh otverstii apparata tochnogo vyseva na kharakteristiki podachi semyan kukuruzy i podsolnechnika [The influence of the diameter of the suction holes of the precision seeding apparatus on the feeding characteristics of corn and sunflower seeds]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2023; 33(1): 21-36. DOI: 10.15507/2658-4123.033.202301.021-036. EDN: VHRCTI. (In Russ).

17. Isaev A.Yu. Otsenka kachestva pryamogo poseva [Evaluation of the quality of direct seeding]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet imeni V.P. GoryachkinA»*. 2017; 4(80): 33-38. EDN: ZEGBKD. (In Russ).

ВКЛАД АВТОРОВ

Валиуллин И.А. – сбор и анализ данных; написание исходного текста; обзор литературы по теме; итоговые выводы.

Зиганшин Б.Г. – концепция исследования; систематизация теоретической базы; научное редактирование текста.

Халиуллин Д.Т. – научное руководство; идея исследования; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Файзуллин Р.А. – сбор и анализ данных; интерпретация полученных результатов; доработка текста.

AUTHOR CONTRIBUTION

Valiullin, I.A. – data collection and analysis; writing the original text; literature review on the topic; final conclusions.

Ziganshin, B.G. – research concept; systematization of the theoretical base; scientific text editing.

Khaliullin, D.T. – scientific guidance; research idea; development of methodology; revision of the text; final conclusions.

Fayzullin, R.A. – data collection and analysis; interpretation of the results; revision of the text.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

И.А. Валиуллин – аспирант; AuthorID 1240439.
Б.Г. Зиганшин – доктор технических наук; AuthorID 326952.

Д.Т. Халиуллин – кандидат технических наук; AuthorID 548034.

Р.А. Файзуллин – кандидат технических наук; AuthorID 1183863.

Information about the author

I.A. Valiullin – graduate student; AuthorID 1240439.

B.G. Ziganshin – Doctor of Technical Sciences; AuthorID 326952.

D.T. Khaliullin – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 548034.

R.A. Faizullin – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 1183863.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 22.01.2026; approved after reviewing 27.02.2026; accepted for publication 20.03.2026.