

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНО-ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ В ПНЕВМОЗАГРУЗОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРОТРАВЛИВАТЕЛЯ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2026 Нуруллин Э. Г. ✉, Файзуллин Р. А., Фасхиев Р. Ф.

Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ nureg@mail.ru

Реферат. Разработана математическая модель движения воздушно-зерновой смеси в загрузочном устройстве пневматического типа, впервые предложенного для оснащения протравливателей семян зерновых культур. Моделирование выполнено в режиме движения семян зерновых культур во взвешенном состоянии. Получено уравнение движения семян, позволяющее теоретически описать траекторию зерна в пневмосемяпроводе, которое в перспективе будет использовано для теоретического обоснования конструктивно-технологических параметров пневмосемяпровода, обеспечивающего качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости. Получены новые теоретические зависимости и определены параметры движения воздушно-зерновой смеси в наклонном пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства. Исследования проводились для семян зерновых культур со скоростями витания 5–20 м/с при углах наклона пневмосемяпровода 30–75° и диаметрах 0,05–0,25 м. Определено, что для семян с маленькой критической скоростью (5 м/с) при угле наклона пневмосемяпровода 30° минимальная скорость воздуха должна быть 10,0 м/с, при 45° – 7,1 м/с, при 60° – 5,8 м/с, при 75° – 5,2 м/с, а для семян с максимальной критической скоростью (20 м/с) при 30° – 40,0 м/с, при 45° – 28,3 м/с, при 60° – 23,1 м/с, при 75° – 20,8 м/с. Установлено, что для качественного перемещения семян с высокой критической скоростью (20 м/с) расход воздуха при увеличении диаметра от 0,05 м до 0,25 м при угле наклона пневмосемяпровода 45° возрастает от 0,08 до 0,99 м³/с, при 60° от 0,06 до 0,86 м³/с, при 75° от 0,05 до 0,76 м³/с. Полученные теоретические результаты будут использованы при конструировании пневмозагрузочного устройства для протравливателей семян.

Ключевые слова: машины для защиты растений, протравливатели семян зерновых культур, пневмозагрузочное устройство.

Для цитирования: Нуруллин Э.Г., Файзуллин Р.А., Фасхиев Р.Ф. Математическая модель движения воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве протравливателя семян зерновых культур // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 79–88. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-79-88

MATHEMATICAL MODEL OF AIR-GRAIN MIXTURE MOVEMENT IN PNEUMO-LOADING DEVICE OF GRAIN SEED TREATER

© 2026 Nurullin E.G. ✉, Fayzullin R.A., Faskhiev R.F.

Kazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)
✉ nureg@mail.ru

Abstract. Mathematical model of air-grain mixture movement in a pneumatic loading device, first proposed for use in grain seed treaters, has been developed. The modeling was performed for suspended grain seed movement. An equation for seed motion has been derived that allows for a theoretical description of the grain trajectory in a pneumatic seed tube. This equation will be used in the future to theoretically substantiate the design and technological parameters of a pneumatic seed tube, ensuring high-quality seed movement with the required throughput and minimal energy consumption. New theoretical dependencies were obtained and parameters of air-grain mixture movement in the inclined pneumatic seed pipeline of the pneumatic loading device were determined. The studies were conducted for grain crop seeds with hovering speeds of 5–20 m/s at pneumatic seed tube inclination angles of 30–75° and diameters of 0.05–0.25 m. It was determined that for seeds with a low critical speed (5 m/s) at a pneumatic seed tube inclination angle of 30°, the minimum air speed should be 10.0 m/s, at 45° – 7.1 m/s, at 60° – 5.8 m/s, at 75° – 5.2 m/s, and for seeds with a maximum critical speed (20 m/s) at 30° – 40.0 m/s, at 45° – 28.3 m/s, at 60° – 23.1 m/s, at 75° – 20.8 m/s. It was found that for high-quality seed movement at a high critical speed (20 m/s), the air flow rate increases from 0.08 to 0.99 m³/s with a diameter increasing from 0.05 m to 0.25 m at a pneumatic seed tube inclination of 45°, from 0.06 to 0.86 m³/s at 60°, and from 0.05 to 0.76 m³/s at 75°. Theoretical results obtained will be used in the design of a pneumatic loading device for seed treaters.

Key words: plant protection machines, grain seed treaters, pneumatic loading device.

For citation: Nurullin EG, Fayzullin RA, Faskhiev RF. [Mathematical model of air-grain mixture movement in pneumo-loading device of grain seed treater]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 79–88 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-79-88

Введение. Производство зерна наиболее эффективное направление сельскохозяйственного производства, которое обеспечивает стабильное и гарантированное получение востребованной внутренним и внешними рынками продукции [1, 2].

Одним из основных факторов, определяющих количество и качество производимого зерна является качество семян, главным из которых выступает генетический потенциал, формируемый в процессе селекции. Современные селекционные достижения в области зерновых культур гарантируют их устойчивость и адаптивность к различным рискам, возросших с изменениями природно-климатических и почвенных условий [3, 4, 5].

Однако в процессе технологии производства зерна и подготовки семян полная реализация генетического потенциала не достигается [6, 7]. Это обусловлено рядом производственных факторов, одним из которых является микротравмирование репродуктивных органов семян зерновых культур во время обработки в сельскохозяйственных машинах на всех этапах производства зерна и подготовки семян, что приводит к снижению количества и качества урожая [8].

Предпосевная обработка семян защитными средствами в зернопроизводстве является ключевым этапом [9, 10, 11]. Она преимущественно выполняется на мобильных протравочных машинах, оборудованных шнековыми загрузочными и разгрузочными устройствами, которые часто приводят к повреждению зерна. По нашим исследованиям микротравмирование семян на протравливателях с такими загрузчиками степень микротравмирования возрастает на 6...8 % [8].

По нашей гипотезе одним из путей решения данной проблемы является создание и внедрение протравочных машин с пневмозагрузочными устройствами [12]. Анализ существующих конструкций протравочных машин и результаты выполненных патентных исследований показывает, что в настоящее время в мире отсутствуют конструкции, оснащённые загрузчиками семян пневматического типа.

Данная работа невозможна без теоретического обоснования основных конструктивно-технологических параметров новых загрузочных конструкций.

Цель данной работы – разработка теоретической основы для обоснования конструктивно-технологических параметров пневматической системы загрузки семян в протравливатель. Ключевым методом выступает математическое моделирование движения воздушно-зерновой смеси в его рабочей полости.

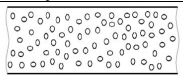
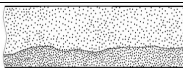
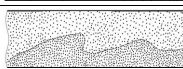
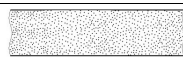
Условия, материалы и методы. На основе изучения состояния вопроса, патентных исследований, производственного опыта разработана новая конструктивно-технологическая схема пневмозагрузочного устройства для мобильных протравливателей зерновых культур, направленная на минимизацию механических повреждений зерна при обработке. Конструктивное решение обладает универсальной совместимостью с различными моделями передвижных протравочных агрегатов как российского, так и иностранного производства. Инновационный характер пневматических загрузочных систем для семян документально подтвержден серией из четырёх патентов Российской Федерации (2808241, 2762919, 2692642, 184960), что свидетельствует о наличии существенных отличий от известных аналогов.

Конструкция пневматического загрузочного устройства включает следующие ключевые компоненты: генератор воздушного потока, пневмосемяпровод по которому перемещается воздушно-зерновая смесь и бункер-разгрузитель для отделения семян от воздуха [12].

Для снижения травмирующего воздействия на семена и количества энергии, затрачиваемой на перемещение воздушно-зерновой смеси пневмосемяпровод представляет собой трубу с круглым сечением и гладкой внутренней поверхностью, изготовленный из упругого материала с высокой износостойкостью.

Перемещение семян в пневмосемяпроводе происходит в условиях пневмотранспорта твердых материалов, которые могут иметь несколько режимов (табл. 1).

Таблица 1 – Режимы пневмотранспорта твёрдых частиц
Table 1 – Modes of pneumatic transport of solid particles

Состояние потока	Рисунок потока
Взвешенное (применяется для зернистого и порошкового материала с эквивалентным диаметром (d_3) более 1 мм, т.е. $d_3 > 1$ мм)	
Осажденное (применяется для зернистого и порошкового материала, $d_3 \leq 1$ мм)	
Осажденное с дюнами (применяется для зернистого и порошкового материала, $d_3 \leq 1$ мм)	
Сплошной (аэрированный) (применяется для порошкового и мелкодисперсного материала)	
Импульсно-поршневой (применяется для порошкового материала)	
Поршневой (применяется для зернистого, порошкового и кускового материала ($d_3 = 1 \dots 15$ мм))	

Для точного моделирования движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства в протравливателе семян необходимо правильно определить режим пневмотранспорта. Анализ гидродинамических свойств потока показал, что они напрямую связаны с физико-механическими характеристиками и геометрическими параметрами семян, которые транспортируются. Для зерновых культур (пшеница, ячмень, овёс, горох, тритикале и др.), представляющих собой полидисперсные гранулированные среды с характерным размером частиц ($d_z > 1$ мм), оптимальным признаком режим движения семян во взвешенном состоянии.

Вторым немаловажным условием выступает обеспечение требуемой производительности с минимальными затратами энергии, которые зависят от концентрации воздушно-зерновой смеси и скорости движения семян.

Теоретически обоснованные параметры легли в основу компьютерного моделирования динамики воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства протравливателя семян.

Исследования велись с применением комплексного методического подхода, который включал использование общих методов математики, аэродинамики, теоретической механики, частных методов земледельческой механики, пневмотранспорта, а также специфические методы, и материалы, полученные при исследованиях пневматических и пневмомеханических рабочих органов сельскохозяйственных машин [13, 14]. Использованы также некоторые методические и теоретические подходы исследований двухфазных сред [15, 16, 17].

Объектом исследования является пневмозагрузочное устройство новых конструкций протравливателей семян зерновых культур (патенты Российской Федерации 2808241, 2762919, 2692642, 184960).

Предмет исследования – процесс движения воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве. Исследования проводились в Казанском государственном аграрном университете с 2018 по 2005 годы при выполнении работ по темам диссертаций и грантов Министерства сельского хозяйства и

продовольствия Республики Татарстан.

Исследования проводились в следующей последовательности: выявление повреждения семян в сельскохозяйственных машинах, что снижает урожайность зерновых культур; определение степени травмированности семян зерновых культур в протравочных машинах, в результате которой выявлено, что одним из основных рабочих органов приводящих к сильному микротравмированию репродуктивных анатомических частей являются шнековые загрузочные устройства; проведение патентного поиска конструкций протравливателей семян, по результатам которой разработана новая конструкция пневмозагрузочного устройства; теоретическое обоснование основных конструктивно-технологических параметров протравочных машин с пневмозагрузочным устройством, некоторые результаты которых представлены в данной работе.

Результаты и обсуждение. *Динамика движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе.*

В процессе транспортировки частиц в воздушной среде наблюдается взаимодействие двух доминирующих сил: силы тяжести и аэродинамического сопротивления воздушного потока. В восходящем вертикальном воздушном потоке эти силы направлены по одной линии в разные стороны. В случае горизонтального потока сила тяжести действует перпендикулярно направлению силы воздушного потока.

Движение воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе имеет специфику, что обусловлено наклонной траекторией восходящего потока. Подобные условия транспортировки требуют пересмотра существующих теоретических моделей и разработки специализированного математического аппарата для описания движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе. Рассмотрим силы, действующие на зерно при движении в воздушном потоке в рабочей полости пневмосемяпровода установленным под некоторым углом к горизонту в плоской системе координат XOY, ось OX которой совпадает с осевой линией пневмосемяпровода и направлением воздушного потока (рис. 1).

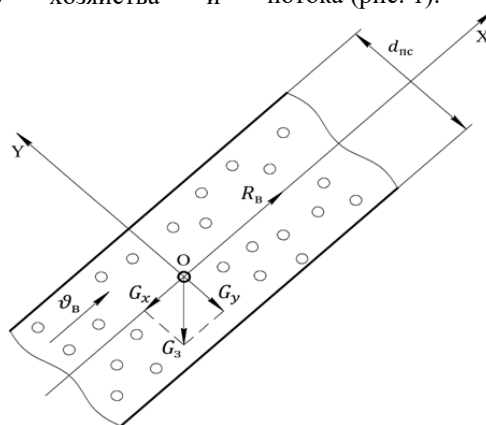


Рис. 1 – Силы, действующие на зерно при движении в пневмосемяпроводе
Fig. 1 – Forces acting on a grain during movement in a pneumatic seed duct

На зерно массой m_3 действуют сила воздушного потока R_b и сила тяжести G_3 , линии действия которых не совпадают. Рассмотрим дифференциальные уравнения движения зерна в координатной плоскости XOY, где ось OX совпадает с осевой линией пневмосемяпровода и направлением воздушного потока. При разложении силы тяжести на составляющие по осям OX и OY дифференциальные уравнения запишутся в следующих видах:

$$m_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = R_b - G_x, \quad (1)$$

$$m_3 \frac{d^2 y}{dt^2} = G_y, \quad (2)$$

где m_3 – масса одного зерна, кг.

Сила действия воздушного потока на зерно определяется по зависимости:

$$R_b = 0,5 m_3 k_n (\vartheta_b - \vartheta_3)^2, \quad (3)$$

где k_n – коэффициент парусности семян, $\frac{1}{m}$ (определяется экспериментально, значения k_n для многих видов семян зерновых культур также имеются в справочниках); ϑ_b – скорость воздушного потока, м/с; ϑ_3 – скорость движения семян в пневмосемяпроводе, м/с.

Составляющие силы тяжести $G_3 = m_3 g$ на оси OX и OY определяются по формулам:

$$G_{3x} = G_3 \sin \alpha = m_3 g \sin \alpha, \quad (4)$$

$$G_{3y} = G_3 \cos \alpha = m_3 g \cos \alpha, \quad (5)$$

где α – угол установки пневмосемяпровода относительно горизонта (угол наклона пневмосемяпровода), град.

Подставляя (3) и (4) в (1), также (5) в (2) получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих траекторию движения зерна в пневмосемяпроводе под воздействием воздушного потока:

$$m_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = 0,5 m_3 k_n (\vartheta_b - \vartheta_3)^2 - m_3 g \sin \alpha; \quad (6)$$

$$m_3 \frac{d^2 y}{dt^2} = m_3 g \cos \alpha. \quad (7)$$

Примем допущение, что скорость движения зерна остаётся постоянной. т.е. $\vartheta_3 = const$. Тогда после решения дифференциальных уравнений, получаем выражения описывающие координаты единичной зерновки при движении в пневмосемяпроводе в координатной плоскости XOY:

$$X = 0,5 k_n t^2 (\vartheta_b - \vartheta_3)^2 - g t^2 \sin \alpha; \quad (8)$$

$$Y = g t^2 \cos \alpha. \quad (9)$$

Выражая из уравнения (9) время ($t^2 = \frac{Y}{g \cos \alpha}$) и подставляя в уравнение (8) имеем:

$$X = 0,5 \frac{k_n Y}{g \cos \alpha} (\vartheta_b - \vartheta_3)^2 - Y \tan \alpha. \quad (10)$$

Полученное выражение позволяет определить теоретическую траекторию движения

зерна в пневмосемяпроводе. Оно также может быть использовано при теоретическом обосновании конструктивно-технологических параметров пневмосемяпровода, обеспечивающих качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости.

Уравнение (10) включает в себя скорости: зерна – ϑ_3 и воздушного потока – ϑ_b , которые являются важными параметрами определяющими пропускную способность пневмосемяпровода.

Скорость движения семян в пневмосемяпроводе.

Скорость движения семян является основным фактором, определяющим главный технологический параметр пневмосемяпровода – его пропускную способность по зерну, которая должна обеспечить производительность протравливателя. Наряду со скоростью движения семян пропускная способность пневмосемяпровода зависит от массы зерна в нём и от площади сечения его рабочей полости. Скорость зерна зависит от его аэродинамических свойств и скорости воздушного потока.

Масса зерна, транспортируемого в пневматическом канале определяется тремя ключевыми факторами: натурой (объёмная масса), объёмной концентрацией (степень заполнения единицы объема полости пневмосемяпровода) и режимом потока воздушно-зерновой смеси.

Единица объема семян, движущихся в пневмосемяпроводе за одну секунду – «секундный объем» рассчитывалась как произведение площади рабочего сечения канала умноженной на линейную скорость перемещения частиц и на плотность транспортируемой среды.

Для определения скорости движения зерна была установлена пропускная способность пневмосемяпровода и на основе вышеизложенных суждений формализованы полученные зависимости в виде уравнения:

$$q_{nc} = S_{nc} \vartheta_3 \gamma_3 \mu_m, \quad (11)$$

где q_{nc} – пропускная способность пневмосемяпровода, кг/с; S_{nc} – площадь поперечного сечения рабочей полости пневмосемяпровода, м²; ϑ_3 – скорость движения семян в пневмосемяпроводе, м/с; γ_3 – объёмная (насыпная) масса зерна, кг/м³; μ_m – коэффициент массовой концентрации воздушно-зерновой смеси.

Выражая из этой зависимости скорость зерна ϑ_3 и имея ввиду, что

$$S_{nc} = \frac{\pi d_{nc}^2}{4} = 0,8 d_{nc}^2$$

(где d_{nc} – диаметр рабочей полости пневмосемяпровода, м), также вычисляя числовую константу получаем:

$$\vartheta_3 = \frac{4 q_{nc}}{\pi d_{nc}^2 \gamma_3 \mu_m}. \quad (12)$$

Проанализируем полученное выражение. Пропускная способность пневмосемяпровода q_{nc} должна обеспечить семенами

максимальную производительность протравочной машины с определённым запасом. Тогда можно записать:

$$q_{\text{пс}} = k_3 \frac{Q_{\text{пм}}}{3,6}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{пм}}$ – технологическая производительность протравливателя семян, т/ч; k_3 – коэффициент запаса пропускной способности пневмосемяпровода.

В технологических линиях по подготовке семян зерновых культур производительность предыдущих машин должна быть больше на 10-15% производительности последующей машины. Исходя из этого, для нашего случая примем, что $k_3 = 1,1$. После подстановки (13) в (12) и вычисляя общую числовую константу получим:

$$\vartheta_3 = 0,4 \frac{Q_{\text{пм}}}{d_{\text{пс}}^2 \gamma_3 \mu_0}. \quad (14)$$

Таким образом, в результате теоретического обоснования скорости движения зерна в пневмосемяпроводе получена математическая зависимость, связывающая основные технологические (скорость движения семян, производительность протравливателя, коэффициент массовой концентрации семян в пневмосемяпроводе), конструктивные параметры (диаметр рабочей полости пневмосемяпровода), также включающая технологические свойства протравливаемых семян (объёмная масса). Полученная зависимость позволяет рассчитать скорость движения семян, для обеспечения требуемой пропускной способности при заданных и (или) известных значениях других параметров, входящих в неё.

Скорость воздуха в пневмосемяпроводе.

Важным параметром является скорость воздушного потока, которая влияет на скорость зерна. Она может быть использована при теоретическом обосновании конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости.

Характер движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе зависит от скорости и характера потока (ламинарный или турбулентный) транспортирующего воздуха. Характер потока оценивается по числу Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{\vartheta_{\text{в}} d_{\text{пс}}}{\nu}, \quad (15)$$

где $\vartheta_{\text{в}}$ – скорость воздуха в пневмосемяпроводе, м/с; $d_{\text{пс}}$ – диаметр рабочей полости пневмосемяпровода, м; ν – кинематическая вязкость воздуха при температуре 30°C и давлении 760 мм.рт.ст. (101323,2 Па), $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5}$.

При $Re < 2320$ поток ламинарный. В нашем случае поток турбулентный, т.к. $Re > 10^5$ даже при минимально приемлемых, с точки зрения работоспособности конструкции, значениях скорости воздуха и диаметра пневмосемяпровода ($\vartheta_{\text{в}} = 1$ м/с, $d_{\text{пс}} = 0,1$ м). При турбулентном режиме возникают поперечные составляющие скорости и происходит интенсивное перемешивание потока воздуха. При турбулентном режиме течения в пневмосемяпроводе распределение скоростей воздушного потока описывается усечённой параболической зависимостью, при этом минимальные значения скорости наблюдаются в приграничном слое вблизи стенок. В рамках теоретического анализа в качестве расчетного параметра принималось среднее значение скорости потока $\vartheta_{\text{в}} = \vartheta_{\text{вср}}$ (рис. 2).

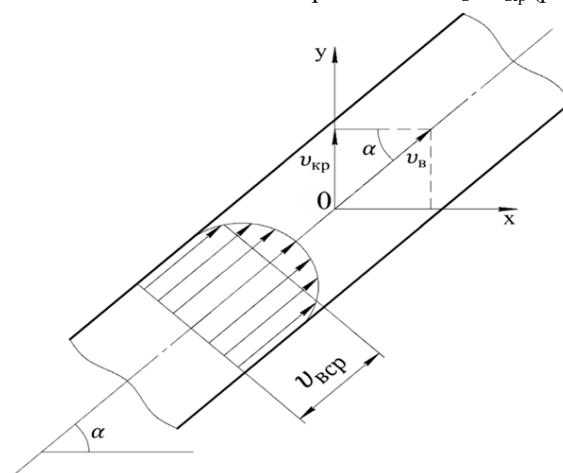


Рис. 2 – Схема составляющих скоростей воздушного потока в пневмосемяпроводе
Fig. 2 – Diagram of air flow velocity components in a pneumatic seed duct

Обоснование скорости воздушного потока проведем без учёта сопротивлений, (соответственно перепада давления) возникающих при движении воздуха в пневмосемяпроводе, т.к. длина его маленькая и имеется всего один изгиб при соединении с входящим патрубком пылеотделителя.

Для возможного перемещения семян, скорость движения воздуха должна быть больше составляющей проекции скорости витания $\vartheta_{\text{кр}}$ семян, на направление вектора скорости воздушного потока (рис. 2):

$$\vartheta_{\text{в}} > \frac{\vartheta_{\text{кр}}}{\sin \alpha}, \quad (16)$$

где α – угол наклона пневмосемяпровода относительно горизонта, град.; $\vartheta_{кр}$ – критическая скорость зерна, при которой они находятся в витающем состоянии в вертикальном воздушном потоке, м/с.

Критическая скорость зерна – это значение скорости воздуха, при котором зерно находится в воздушном потоке во взвешенном состоянии т.е. отсутствуют его направленное движение вверх или вниз. При такой скорости ускорение равно нулю

$$\left(\frac{dv_z}{dt} = 0\right)$$

и сила воздушного потока, действующая на зерновку равна её силе тяжести ($G_z = m_z g$). Критическая скорости семян основных зерновых культур находятся в широких пределах ($\vartheta_{кр} = 5 \dots 20$ м/с).

Анализ математической зависимости (16) выявил прямую связь между скоростью воздушного потока и критической скоростью витания семян, одновременно показывая обратную зависимость от угла наклона транспортного канала относительно

горизонта.

Для эффективной подготовки всех видов зерновых культур к посеву на пневматической протравочной машине необходимо точно подобрать параметры воздушного потока, обеспечивающего надежную бесперебойную транспортировку семян. Оптимальный диапазон скоростей воздушного потока для этого процесса следует определить с помощью расчетов по уравнению (16), которые должны учитывать критические скорости семян, варьирующиеся от 5 до 20 м/с, при разных углах наклона транспортного канала.

При расчете рабочих углов наклона от 30° до 75° были учтены конструктивные параметры современных сепараторов, в которых традиционные механические загрузчики действуют в диапазоне $30^\circ \dots 60^\circ$. Графический анализ, выполненный с учетом габаритов оборудования и условий забора семян, выявил потенциал для увеличения угла действия пневмосистемы, устанавливаемой на бункере машины. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчётные значения скорости воздуха в пневмосемяпроводе
Table 2 – Calculated values of air velocity in a pneumatic seed duct

$\vartheta_{кр}$, м/с	5				20			
α , °	30	45	60	75	30	45	60	75
$\vartheta_{вп}$, м/с	10	7,1	5,8	5,2	40	28,3	23,1	20,8

Анализ табличных данных показывает, что расчетные значения скорости воздушного потока варьируются от 5,2 до 40 м/с. Для выявления закономерностей

изменения скоростных показателей были составлены графические зависимости, отображающие данные, представленные на рисунке 3.

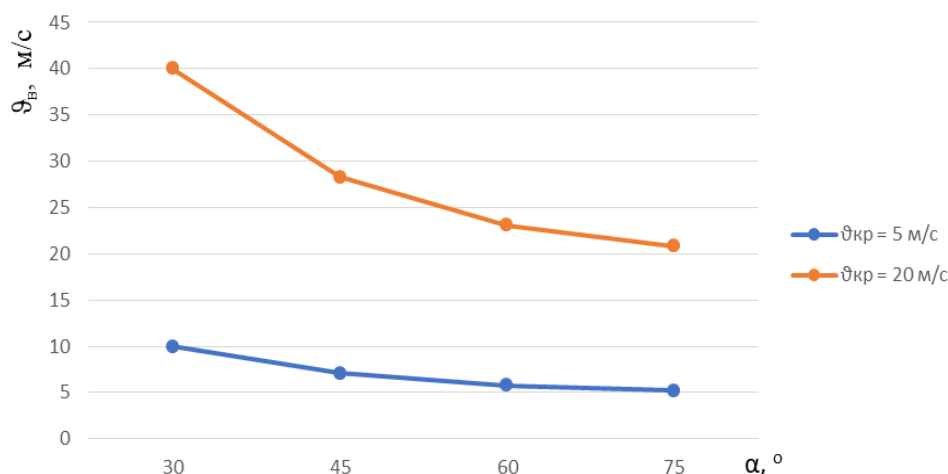


Рис. 3 – Графики изменения скорости воздуха в пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства

Fig. 3 – Graphs of air velocity changes in the pneumatic loading device's pneumatic seed duct

Графические зависимости показывают устойчивую корреляцию между скоростью воздушного потока и оптимальным углом наклона пневмотранспортного канала, что является ключевым фактором для бесперебойной транспортировки разных видов семян.

Выявленная зависимость позволяет сделать вывод о том, что оптимальные скорости воздушного потока для перемещения семян основных зерновых культур при одинаковых углах наклона пневмосемяпровода лежат в диапазоне, находящемся между

значениями, представленными графическими зависимостями.

При разработке пневмозагрузочной системы необходимо учитывать, что сила воздушного потока создается вентилятором, и поэтому характеристики вентилятора должны быть подобраны с учетом максимальных расчетных значений скорости потока, соответствующих самым требовательным видам семян (см. верхний график). Такое решение обеспечивает эффективную транспортировку всех видов семян, даже тех, у которых низкие критические скорости витания, при сохранении тех же углов наклона транспортного канала. Чтобы минимизировать энергопотребление при обработке семян с низкими критическими скоростями, целесообразно оснастить систему регулируемым приводом вентилятора, что позволит настраивать его работу под каждую разновидность зерновых культур.

Анализ графических зависимостей показывает обратную пропорциональность между углом наклона транспортного канала и требуемой скоростью воздушного потока для эффективной транспортировки семян. Данная закономерность обосновывает техническую целесообразность максимально возможного увеличения угла установки пневмосемяпровода при проектировании конструкции, что позволит оптимизировать энергопотребление системы без ущерба для качества перемещения семенного материала.

Проведенные теоретические исследования позволили установить, что скорость перемещения семян в пневмотранспортном канале определяется критической скоростью витания частиц и углом наклона семяпровода по отношению к горизонтальной плоскости. Полученные результаты демонстрируют существенное влияние этих параметров на динамику движения зернового материала в условиях воздушного потока.

В результате проведенных исследований была выведена расчетная формула, которая определяет минимальную скорость воздушного потока, необходимую для поддержания семян в взвешенном состоянии внутри наклонного пневмотранспортного канала. Анализ полученной зависимости показывает обратную корреляцию между углом наклона семяпровода и требуемой интенсивностью воздушного потока - с увеличением угла отклонения от горизонтальной плоскости уменьшается необходимая скорость воздуха для обеспечения устойчивого взвешенного состояния частиц и предотвращения их осаждения.

На основании проведенных теоретических изысканий, посвященных определению оптимальных параметров воздушного потока в пневмотранспортной системе, получены практические рекомендации по подбору вентиляционного оборудования и определению

рационального угла монтажа на протравочном агрегате. Эти данные, учитывающие конструктивные особенности машины, позволяют обеспечить эффективное перемещение семенного материала во взвешенном состоянии по всему сечению транспортного канала без риска образования застойных зон и заторов.

Расход воздуха в пневмозагрузочном устройстве.

В пневмозагрузочном устройстве для генерации воздушного потока используется центробежный вентилятор. Для качественного перемещения заданного количества зерна генератор воздуха должен создать устойчивый поток определённого количества воздуха – расход воздуха. В нашем случае важно определение расхода воздуха необходимого для транспортировки семян с заданной концентрацией.

Расход воздуха в пневмосемяпроводе согласно уравнению неразрывности, определяется по зависимости:

$$Q_v = S_{nc} \vartheta_v, \quad (17)$$

где Q_v – расход воздуха в пневмосемяпроводе, м³/с; S_{nc} – площадь поперечного сечения рабочей полости пневмосемяпровода, м²; ϑ_v – скорость воздушного потока, м/с.

После подстановки в зависимость (17) формулу (16) и имея ввиду, что

$$S_{nc} = \frac{\pi d_{nc}^2}{4} = 0,8 d_{nc}^2$$

(где d_{nc} – диаметр рабочей полости пневмосемяпровода, м), получаем:

$$Q_v = 0,8 \frac{d_{nc}^2 \vartheta_{кр}}{\sin \alpha} \quad (18)$$

Выражение 18 позволяет определить минимальное количество воздуха, при котором семена будут перемещаться в воздушном потоке во взвешенном состоянии, т.е. позволяет рассчитать расход воздуха в пневмозагрузочном устройстве учитывая его диаметр и угол наклона пневмосемяпровода к горизонту, при обработке семян с разными скоростями витания.

Чтобы определить оптимальные конструктивные и технологические параметры пневмозагрузочного устройства, были проведены теоретические расчеты, целью которых было определение минимально необходимого количества воздуха, обеспечивающего надежную транспортировку семян в пневмозагрузочном устройстве. Расчёты выполнены для различных значений диаметра пневмосемяпровода с учётом результатов исследований, приведенных выше, т.е. при наибольших значениях скорости витания семян зерновых культур ($\vartheta_{кр} = 20$ м/с) и разных углах установки пневмосемяпровода относительно горизонтальной плоскости.

Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта расхода воздуха
Table 3 – Results of air consumption calculation

$d_{пс}, \text{ м}$	Расход воздуха $Q_{в}, \text{ м}^3/\text{с}$		
	при $\alpha = 45^\circ$	при $\alpha = 60^\circ$	при $\alpha = 75^\circ$
0,05	0,08	0,06	0,05
0,1	0,23	0,19	0,17
0,15	0,49	0,42	0,37
0,2	0,76	0,66	0,58
0,25	0,99	0,86	0,76

На основе этих расчётов построены графические зависимости, наглядно показывающие изменение расхода воздуха, которые представлены на рисунке 4.

По графикам видно, что наблюдается очевидная закономерность увеличения расхода воздуха с увеличением диаметра рабочей полости пневмосемяпровода.

Полученные данные согласуются с теоретическими исследованиями изменений скорости воздушного потока в пневмосемяпроводе

(рис. 3), показывая, что увеличение угла наклона способствует снижению необходимой скорости и расхода воздуха для эффективной транспортировки семян. Это уменьшение положительно влияет на снижение энергозатрат всей системы пневмозагрузки и, следовательно, всей протравочной машины. Таким образом, при проектировании конструкции целесообразно стремиться к увеличению угла расположения пневмосемяпровода относительно горизонтальной плоскости.

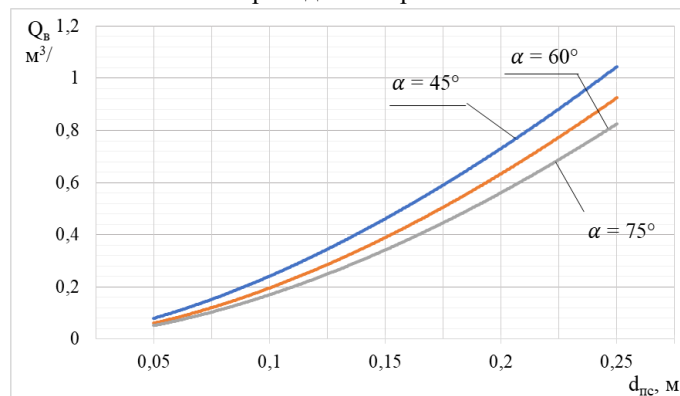


Рис. 4 – Графики изменения расхода воздуха в пневмозагрузочном устройстве в зависимости от диаметра рабочей полости пневмосемяпровода

Fig. 4 – Graphs of air consumption changes in the pneumatic loading device depending on the diameter of the working chamber of the pneumatic seed duct

Полученные графические зависимости являются основой для разработки номограммы по определению конструктивно-технологических параметров пневмозагрузочного устройства.

Таким образом, в результате математического моделирования движения воздушно-зерновой смеси получены численные значения скорости воздуха, обеспечивающие перемещение семян с различными аэродинамическими характеристиками при разных углах наклона пневмосемяпровода. Рассчитаны также значения расхода воздуха при разных диаметрах и углах наклона пневмосемяпровода.

Выводы. В результате математического моделирования воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве пневматического типа для протравливателей семян зерновых культур семян получены новые теоретические зависимости, позволяющие определить основные параметры движения семян и воздуха в наклонном пневмосемяпроводе.

Исследования проводились для семян зерновых культур со скоростями витания 5–20 м/с при углах наклона пневмосемяпровода 30–75° и диаметрах 0,05–0,25 м.

Определено, что для семян с маленькой критической скоростью (5 м/с) при угле наклона пневмосемяпровода 30° минимальная скорость воздуха должна быть 10,0 м/с, при 45°–7,1 м/с, при 60°–5,8 м/с, при 75°–5,2 м/с, а для семян с максимальной критической скоростью (20 м/с) при 30°–40,0 м/с, при 45°–28,3 м/с, при 60°–23,1 м/с, при 75°–20,8 м/с.

Установлено, что для качественного перемещения семян с высокой критической скоростью (20 м/с) расход воздуха при увеличении диаметра от 0,05 м до 0,25 м при угле наклона пневмосемяпровода 45° возрастает от 0,08 до 0,99 м³/с, при 60° от 0,06 до 0,86 м³/с, при 75° от 0,05 до 0,76 м³/с.

Выведено уравнение движения семян, позволяющее теоретически описать траекторию зерна в пневмосемяпроводе разной длины и диаметра.

Полученные результаты в перспективе будут использованы для теоретического обоснования конструктивно-технологических параметров пневмосемяпровода, обеспечивающего качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости.

Литература

1. Современное состояние зернового производства в Российской Федерации / Файзрахманов Д. И., Валиев А. Р., Зиганшин Б. Г. и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 2(62). С. 138-142. doi:10.12737/2073-0462-2021-138-142.
2. Приоритетная технология создания новых высокоурожайных сортов яровой мягкой пшеницы на Среднем Урале / Н. Н. Зезин, В. А. Воробьев, А. В. Воробьев и др. // Зерновое хозяйство России. 2022. Т. 14. № 6. С. 59-63. – doi: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-59-63.
3. Захаров В. Г., Мишенкина О. Г. Адаптивные свойства новых сортов овса в условиях Средневолжского региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4(52). С. 100-107. doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-100-107.
4. Зезин Н. Н., Митин А. Н. О необходимости ускорения внедрения современных технологий, влияющих на повышение эффективности сельскохозяйственного производства // Агропродовольственная политика России. 2024. № 5(112). С. 18-25. doi: 10.35524/2227-0280_2024_05_18.
5. Элементы структуры урожая и продуктивность зерна сортов ярового ячменя / Блохин В. И., Никифорова И. Ю., Ганиева И. С. и др. // Зернобобовые и крупяные культуры. 2023. № 4(48). С. 123-130. doi: 10.24412/2309-348X-2023-4-123-130.
6. Организация семеноводства сельскохозяйственных культур на орошении и техника полива / Валиев А. Р., Хисматуллин М. М., Сержанов И. М. и др. // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 3. С. 7-15.
7. Физико-механические свойства зерна сортов ярового ячменя в условиях Татарстана / Блохин В. И., Никифорова И. Ю., Ганиева И. С. и др. // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16. № 1. С. 19-25. doi: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-19-25
8. Нуруллин Э. Г., Файзуллин Р. А. Экспериментальное исследование травмирования семян в сельскохозяйственных машинах // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 2(66). С. 99-105. doi: 10.12737/2073-0462-2022-99-105.
9. Прогнозирование влияния физических факторов на жизнеспособность микроорганизмов биопрепаратов для защиты растений / Сабиров Р. Ф., Валиев А. Р., Сафин Р. И. и др. // Техника и оборудование для села. 2020. № 4(274). С. 29-33. doi: 10.33267/2072-9642-2020-4-29-32.
10. Influence of spring wheat seed treatment with low-temperature plasma on growth processes / Khuzina R. R., Nafikov M. M., Nafikov M. M. et al. // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2024), Kazan, 28–29 ноября 2024 года. Kazan: EDP Sciences, 2025. P. 00060.
11. Оценка эффективности предпосевной обработки семян и посевов биологически активными веществами на яровой пшенице в условиях Предкамья Республики Татарстан / Амиров М. Ф., Сафиуллин А. Я., Гилязов М. Ю. и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 2(70). С. 5-12. doi: 10.12737/2073-0462-2023-5-12.
12. Нуруллин Э. Г., Зайнутдинов И. Р., Файзуллин Р. А. Пневмоагрегатное устройство для мобильных протравливателей семян зерновых культур // Нива Поволжья. 2021. № 3(60). С. 142-151. doi: 10.36461/NP.2021.60.3.019.
13. Specifying Two-Phase Flow in Modeling Pneumatic Systems Performance of Farm Machines / Mudarisov S., Khasanov E., Rakhimov Z. et al. // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 2017, vol. 40, № 4, p.706-715. doi: 10.7508/jmerd.2017.04.018.
14. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / Badretdinov I., Mudarisov S., Tuktarov M. et al. // Journal of Applied Engineering Science, 2019, vol. 17, article 641, p. 529-534.
15. Ибятков Р. И., Зиганшин Б. Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1(65). С. 50-55. – doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.
16. Ибятков Р.И., Ахмадиев Ф.Г. Математическое моделирование течения двухфазных сред в сепараторах с криволинейными вставками // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57. № 4. С. 419-426. – doi: 10.31857/S0040357123040036.
17. Ибятков Р.И., Ахмадиев Ф.Г. Математическое моделирование течения неньютоновской двухфазной среды в канале сложной геометрической формы // Инженерно-физический журнал. 2024. Т.97. №5. С.1231-1239.

References

1. Fayzrakhmanov DI, Valiev AR, Ziganshin BG. [Current state of grain production in the Russian Federation]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 2(62). 138-142 p. doi:10.12737/2073-0462-2021-138-142.
2. Zezin NN, Vorobev VA, Vorobev AV. [Priority technology for creating new high-yielding varieties of spring soft wheat in Middle Urals]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2022; Vol.14. 6. 59-63 p. – doi: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-59-63.
3. Zakharov VG, Mishenkina OG. [Adaptive properties of new oat varieties in the conditions of Middle Volga region]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2020; 4(52). 100-107 p. doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-100-107.
4. Zezin NN, Mitin AN. [On the need to accelerate the implementation of modern technologies that affect the increase in the efficiency of agricultural production]. Agroprodovolstvennaya politika Rossii. 2024; 5(112). 18-25 p. doi: 10.35524/2227-0280_2024_05_18.
5. Blokhin VI, Nikiforova IYu, Ganieva IS. [Elements of crop structure and grain productivity of spring barley varieties]. Zernobobovye i krupyanye kultury. 2023; 4(48). 123-130 p. doi: 10.24412/2309-348X-2023-4-123-130.
6. Valiev AR, Khismatullin MM, Serzhanov IM. [Organization of seed production of agricultural crops on irrigation and watering technology]. Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. 2024; 3. 7-15 p.
7. Blokhin VI, Nikiforova IYu, Ganieva IS. [Physical and mechanical properties of spring barley grain varieties in the conditions of Tatarstan]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2024; Vol.16. 1. 19-25 p. doi: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-19-25

8. Nurullin EG, Fayzullin RA. [Experimental study of seed injury in agricultural machinery]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 2(66). 99-105 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-99-105.
9. Sabirov RF, Valiev AR, Safin RI. [Forecasting the influence of physical factors on the viability of microorganisms of biological products for plant protection]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2020; 4(274). 29-33 p. doi: 10.33267/2072-9642-2020-4-29-32.
10. Khuzina RR, Nafikov MM, Nafikov MM. Influence of spring wheat seed treatment with low-temperature plasma on growth processes. BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2024), Kazan, 28-29 noyabrya 2024 goda. Kazan: EDP Sciences. 2025; 00060 p.
11. Amirov MF, Safiullin AY, Gilyazov MYu. [Evaluation of the efficiency of pre-sowing treatment of seeds and crops with biologically active substances on spring wheat in the conditions of Kama region of the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 2(70). 5-12 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-5-12.
12. Nurullin EG, Zaynutdinov IR, Fayzullin RA. [Pneumatic loading device for mobile seed treaters of grain crops]. Niva Povolzhya. 2021; 3(60). 142-151 p. doi: 10.36461/NP.2021.60.3.019.
13. Mudarisov S, Khasanov E, Rakhimov Z. Specifying two-phase flow in modeling pneumatic systems performance of farm machines. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2017; Vol.40. 4. 706-715 p. doi: 10.7508/jmerd.2017.04.018.
14. Badretdinov I, Mudarisov S, Tuktarov M. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. Journal of Applied Engineering Science. 2019; Vol.17. article 641. 529-534 p.
15. Ibyatov RI, Ziganshin BG. [On modeling random processes in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 1(65). 50-55 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.
16. Ibyatov RI, Akhmadiev FG. [Mathematical modeling of two-phase media flow in separators with curved inserts]. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii. 2023; Vol.57. 4. 419-426 p. – doi: 10.31857/S0040357123040036.
17. Ibyatov RI, Akhmadiev FG. [Mathematical modeling of the flow of a non-Newtonian two-phase medium in a channel of complex geometric shape]. Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2024; Vol.97. 5. 1231-1239 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Нуруллин Эльмас Габбасович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: nureg@mail.ru, ORCID 0000-0002-8074-6050

Файзуллин Ренат Айратович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: fayzullinrenat@mail.ru, ORCID 0009-0005-8510-8639

Фасхиев Равиль Фаилевич – инженер Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: faskhiev98.98@gmail.com, ORCID 0009-0009-1842-8906

Вклад авторов:

Э.Г. Нуруллин – руководство, концептуализация, методология, разработка математических моделей, написание – рецензирование и редактирование;

Р.А. Файзуллин – аналитические исследования, разработка математических моделей, написание – подготовка первоначального варианта, проверка расчётов и графиков, работа с литературой;

Р.Ф. Фасхиев – анализ литературы, разработка математических моделей, выполнение расчётов и их визуализация (составление графиков).

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 26.05.2025; одобрена после рецензирования 22.02.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Nurullin Elmas Gabbasovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: nureg@mail.ru, ORCID 0000-0002-8074-6050

Fayzullin Renat Ayratovich – Ph.D. of Technical Sciences, senior lecturer of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: fayzullinrenat@mail.ru, ORCID 0009-0005-8510-8639

Faskhiev Ravil Failevich – an engineer Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: faskhiev98.98@gmail.com, ORCID 0009-0009-1842-8906

Contribution of the authors:

E.G. Nurullin – Supervision, Conceptualization, Methodology, Development of mathematical models, Writing – review and editing;

R.A. Fayzullin – Analytical research, Development of mathematical models, Writing – original draft preparation, Verification of calculations and graphs, Literature review;

R.F. Faskhiev – Literature review, Development of mathematical models, Performing calculations and their visualization (graph preparation).

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 26.05.2025; revised 22.02.2026; accepted 01.04.2026.

