

Научная статья
УДК 664.143.72
doi: 10.55196/2411-3492-2025-2-48-76-86

Оптимизация процесса дражирования семян: моделирование и экспериментальная верификация

Артур Мухамедович Сохроков^{✉1}, Амур Григорьевич Фиапшев²,
Марат Мухамедович Хамоков³, Люда Зачиевна Шекихачева⁴

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

¹ya.kantik-2013@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0873-7715>

²energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>

³h-mm_1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>

⁴sh-ludmila-z@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5987-1500>

Аннотация. В статье проанализированы современные дражировочные аппараты, функционирующие на основе технологии нанесения на семена защитно-стимулирующей оболочки методом окатывания, сферы их эксплуатации и систематизированы ключевые эксплуатационные ограничения. На основании проведенной оценки установлено, что в сегменте рассматриваемого оборудования значительный потенциал демонстрируют комбинированные смесители-дражирователи, оснащенные спиральным механизмом. Исследование алгоритмов, описывающих формирование оболочек из сыпучих субстратов, выявило существенные ограничения современных подходов. Во-первых, большинство моделей требует трудоемкой калибровки с привлечением обширных экспериментальных данных. Во-вторых, их применимость ограничена процессами, где рост гранул (драже) с семенами обусловлен постепенным наслаиванием частиц мелких фракций наполнителя, что исключает описание систем с фиксированным распределением частиц по размерам. Дополнительными пробелами выступают: игнорирование динамики перемещения материала в рабочей зоне, недоучет разнородности фракционного состава, а также отсутствие учета сопутствующих эффектов (абразивный износ, термовоздействие). Наиболее адекватное описание кинетики гранулообразования демонстрируют стохастические методы, включающие вероятностные механизмы агломерации. При этом анализ моделей транспортировки сыпучих компонентов в барабанных установках с гладкой внутренней поверхностью позволил экстраполировать эти решения на спиральные аппараты – за счет декомпозиции спирали на цепь последовательных ячеек, имитирующих секции вращающегося барабана. Обоснована разработка гибридного алгоритма, объединяющего кинетику гранулообразования для барабанных и спиральных систем. Основой выбрана концепция «ресурс–потребитель», дополненная моделью прогнозирования оболочек для полидисперсных систем. Основное требование – учёт вариативности размеров гранул – «потребителей», что отразит зависимость роста слоя от исходного распределения частиц. Для верификации подхода проведен экспериментальный цикл: сравнение агломерации в аппаратах разного типа, мониторинг морфологии гранул и статистическая оценка отклонений модели от реальных данных. Решение этих задач повысит точность управления процессом дражирования в промышленных условиях.

Ключевые слова: барабанные дражирователи, семена сельскохозяйственных культур, формирование оболочек, гранулообразование, драже, адгезия покрытий, стохастические методы, кинетика гранулообразования

Для цитирования: Сохроков А. М., Фиапшев А. Г., Хамоков М. М., Шекихачева Л. З. Оптимизация процесса дражирования семян: моделирование и экспериментальная верификация // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 2(48). С. 76–86. doi: 10.55196/2411-3492-2025-2-48-76-86

Original article

Optimization of the process of coating seeds: modeling and experimental verification

Artur M. Sokhrokov^{✉1}, Amur G. Fiapshev²,
Marat M. Khamokov³, Lyuda Z. Shekikhacheva⁴

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

^{✉1}ya.kantik-2013@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0873-7715>

²energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6300-0947>

³h-mm_1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>

⁴sh-ludmila-z@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5987-1500>

Abstract. The article analyzes modern pelleting machines that operate on the basis of the technology of applying a protective and stimulating coating to seeds using the rolling method, their areas of operation, and systematizes key operational limitations. The areas of their operation are analyzed in detail and the key operational limitations are systematized. Based on the assessment, it was found that in the segment of the equipment under consideration, combined mixers-pellets equipped with a spiral mechanism demonstrate significant potential. Research of algorithms describing the formation of shells from bulk substrates revealed significant limitations of modern approaches. Firstly, most models require labor-intensive calibration using extensive experimental data. Secondly, their applicability is limited to processes where the growth of granules (pellets) with seeds is due to the gradual layering of particles of small fractions of the filler, which excludes the description of systems with a fixed particle size distribution. Additional gaps include: ignoring the dynamics of material movement in the working area, underestimating the heterogeneity of the fractional composition, and failing to take into account accompanying effects (abrasive wear, thermal effects). The most adequate description of the kinetics of granule formation is demonstrated by stochastic methods, including probabilistic mechanisms of agglomeration. At the same time, the analysis of models of transportation of bulk components in drum units with a smooth inner surface made it possible to extrapolate these solutions to spiral devices – due to the decomposition of the spiral into a chain of successive cells simulating sections of a rotating drum. The development of a hybrid algorithm combining the kinetics of granule formation for drum and spiral systems is substantiated. The concept of "resource-consumer" is chosen as a basis, supplemented by a model for predicting shells for polydisperse systems. The main requirement is to take into account the variability of the sizes of "consumer" granules, which will reflect the dependence of the layer growth on the initial distribution of particles. To verify the approach, an experimental cycle was conducted: comparison of agglomeration in different types of devices, monitoring of granule morphology and statistical assessment of deviations of the model from real data. The solution of these problems will increase the accuracy of control of the pelleting process in industrial conditions.

Keywords: coating drum, seeds, shell formation, granulation, dragees, coating adhesion, stochastic methods, kinetics of granulation

For citation: Sokhrokov A.M., Fiapshev A.G., Khamokov M.M., Shekikhacheva L.Z. Optimization of the process of coating seeds: modeling and experimental verification. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;2(48):76–86. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2025-2-48-76-86

Введение. Методология моделирования процессов дражирования семян формируется под влиянием двух взаимосвязанных аспектов. Первый аспект обусловлен технико-эксплуатационными характеристиками оборудования (например, скоростью вращения ба-

рабана, температурным режимом) и параметрами технологического цикла (время обработки, влажность) [1–4]. Второй аспект, вытекающий из первого, концентрируется на идентификации доминирующего механизма массопереноса при формировании защитных слоев,

что требует учёта как адгезии частиц оболочки к семенам, так и их разрушения под действием абразивных и термических факторов [5].

Для решения этих задач в рамках исследования разработана гибридная модель «ресурс–потребитель», объединяющая процессы адгезии частиц оболочки к субстрату и их разрушения. Модель, относящаяся к категории непрерывных стохастических систем, оптимизирована для инженерных расчётов за счёт трёх ключевых особенностей:

– двусторонняя параметризация – учёт не только наращивания слоя, но и обратных процессов потери материала – позволяет моделировать динамический баланс ресурсов;

– адаптивность к гранулометрии – возможность корректировки под полидисперсные смеси с широким распределением частиц по размерам через введение фракционных весов;

– масштабируемость алгоритмов – совместимость с цифровыми платформами для динамического прогнозирования – упрощает интеграцию модели в промышленные системы управления.

Основным преимуществом подхода является его способность воспроизводить нелинейные эффекты взаимодействия частиц в гетерогенных средах [2].

Цель исследования – разработка и экспериментальная верификация математической модели нанесения защитно-стимулирующих оболочек на мелкоразмерные семена сельскохозяйственных культур в барабанных и спиральных дражировочных установках на основе теории «ресурс–потребитель».

Материалы, методы и объекты исследования. Материалы исследования включают следующие исходные компоненты: сыпучий материал-наполнитель оболочки «ресурс» – высушенная бентонитовая глина, измельчённая до фракции 0,06 мм, и «потребителя» – семена сельскохозяйственных культур. В качестве теплоносителя использовался воздух, обеспечивающий сушку гранул. Параметры моделирования охватывали начальную загрузку компонентов, скорость подачи ресурса, температурный градиент, влажность, угол откоса слоя и размеры частиц, что позволило учесть ключевые факторы процесса гранулирования.

Экспериментальная установка состоит из барабанного дражировочного аппарата с регулируемой угловой скоростью вращения (рис. 1) и измерительных систем для контроля диаметра гранул, температуры и влажности. Эти инструменты обеспечили воспроизведение условий, близких к промышленным.

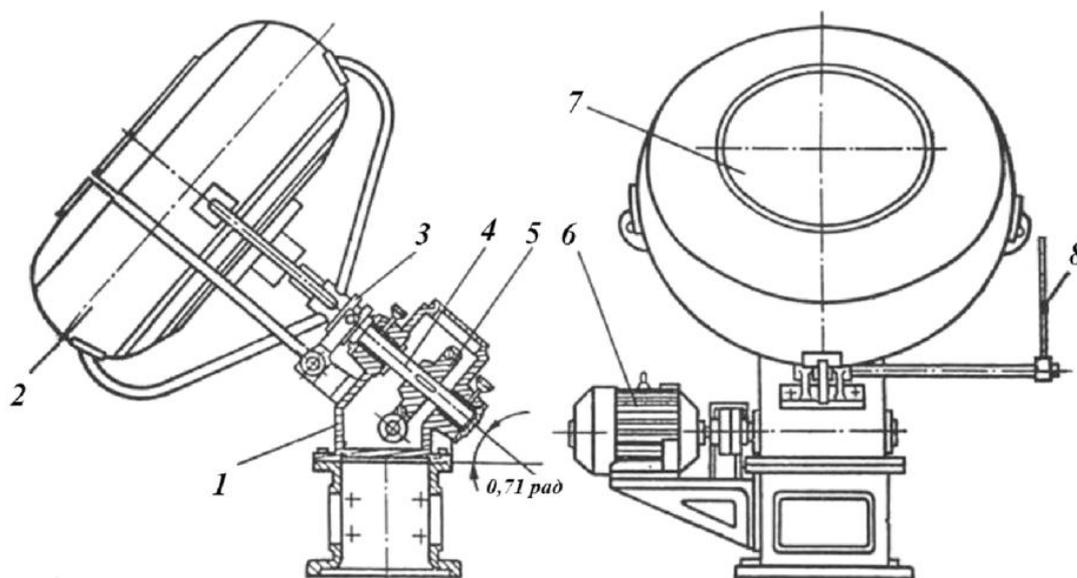


Рисунок 1. Дражировочная установка с гладкой внутренней поверхностью рабочего барабана: 1 – станина; 2 – рабочий барабан; 3 – муфта сцепления; 4 – наклонный вал; 5 – редуктор; 6 – электродвигатель; 7 – загрузочное отверстие; 8 – рукоятка для переключения частоты вращения вала

Figure 1. A coating machine with a smooth inner surface of the working drum: 1 – bed; 2 – working drum; 3 – clutch; 4 – inclined shaft; 5 – gearbox; 6 – electric motor; 7 – loading hole; 8 – handle for switching the shaft speed

Методы исследования объединили математическое моделирование и экспериментальные подходы. На первом этапе была разработана стохастическая модель «ресурс–потребитель», учитывающая динамику роста и разрушения оболочек, влияние влажности (через гауссов множитель) и температуры (линейная зависимость скорости сушки), а также вероятностные механизмы контакта частиц в зонах регулярного и стохастического движения. Для адаптации модели к спиральным дражираторам проведена декомпозиция спирали на элементарные ячейки, что упростило анализ сложной геометрии.

Экспериментальные методы включали измерение среднего диаметра гранул при варьировании угловой скорости вращения барабана, температуры сушки, объёма загрузки материала и дисперсности компонентов. Полученные данные сопоставлялись с теоретическими прогнозами модели, что обеспечило проверку её адекватности.

Объектами исследования выступили технологические системы – барабанные и спиральные дражираторы (рис. 1), движение сыпучего материала в их поперечном сечении, а также гранулированные материалы. Последние включали семена сельскохозяйственных культур (томат, лук, морковь, капуста, свекла) с полидисперсными оболочками из смеси бентонитовой глины и низинного торфа (10:1). В качестве связующего компонента применялся водный раствор Na-КМЦ и карбамида в соотношении 10:0,25.

Результаты исследования. Математический аппарат, описывающий локальную кинетику двухфазной системы «ресурс–потребитель» в дражираторе, базируется на уравнениях баланса масс с учетом взаимодействующих процессов адгезии и разрушения оболочек [3]. Согласно концепции динамического перераспределения вещества система дифференциальных уравнений для моделирования процесса дражирования, где учитывается баланс между свободным и связанным ресурсом, а также влияние внешних факторов (подача ресурса, рост и разрушение оболочек), принимает вид:

$$\frac{dQ_{free}}{dt} = G - k_{growt} \cdot Q_{free} + k_{decay} \cdot Q_{bound}; \quad (1)$$

$$\frac{dQ_{bound}}{dt} = k_{growt} \cdot Q_{free} - k_{decay} \cdot Q_{bound}, \quad (2)$$

где

$$\frac{dQ_{free}}{dt} - \text{производная по времени от количества свободного ресурса (скорость изменения свободного ресурса), кг/с;}$$

G – скорость подачи свободного ресурса (внешний приток), кг/с;

$$\frac{dQ_{bound}}{dt} - \text{производная по времени от количества связанного ресурса (скорость изменения связанного ресурса), кг/с;}$$

k_{growt} – коэффициент скорости формирования оболочки, функционально зависящий от вектора параметров \vec{P} (геометрия аппарата, свойства материалов, режимные факторы), $k_{growt} = f(\vec{P})$, с⁻¹;

k_{decay} – коэффициент деградации (разрушения) оболочки, определяемый вектором дестабилизирующих факторов \vec{D} (трение, вибрации, термоциклирование), $k_{decay} = f(\vec{D})$, с⁻¹;

Q_{free} – количество свободного ресурса (материала оболочки), кг;

Q_{bound} – количество связанного ресурса (нанесенной оболочки), кг.

Уравнения (1) и (2) описывают динамику ресурсов в системе «ресурс–потребитель».

Для анализа нестационарных режимов в процессе дражирования, когда происходят одновременно рост и разрушение оболочек, используем следующее выражение [6]:

$$k_{growt} \cdot Q_{free} = k_{decay} \cdot Q_{bound} + \frac{dQ_{bound}}{dt}, \quad (3)$$

где

k_{growt} – коэффициент скорости роста оболочки (потребления ресурса), с⁻¹;

Q_{free} – количество свободного ресурса (материала оболочки), кг;

k_{decay} – коэффициент скорости разрушения оболочки, с⁻¹;

Q_{bound} – количество связанного ресурса (нанесенной оболочки), кг;

$\frac{dQ_{bound}}{dt}$ – производная по времени от количества связанного ресурса (скорость изменения оболочки), кг/с.

Уравнение (3) отражает баланс массы в системе «ресурс–потребитель», где левый член уравнения ($k_{growt} \cdot Q_{free}$) – скорость потребления свободного ресурса, идущего на рост оболочки, а правый ($k_{decay} \cdot Q_{bound} + \frac{dQ_{bound}}{dt}$) – скорость разрушения оболочки ($k_{decay} \cdot Q_{bound}$) и скорость изменения связанного ресурса ($\frac{dQ_{bound}}{dt}$).

Таким образом, уравнение (3) описывает динамику накопления/убыли связанного ресурса в зависимости от процессов: рост оболочки увеличивает Q_{bound} за счет Q_{free} ; разрушение оболочки уменьшает Q_{bound} , возвращая ресурс в свободное состояние.

Главная особенность модели – описание процесса как не являющегося стационарным, но проявляющего свойства стационарного состояния в течение достаточно малых промежутков времени, где доминирование механизмов роста или разрушения определяется мгновенными значениями k_{growt} и k_{decay} . Это позволяет имитировать нелинейную динамику системы при изменении внешних условий (например, при вариациях влажности, скорости вращения барабана).

Методика калибровки коэффициентов в кинетических уравнениях (мультипликативная модель) базируется на интеграции параметров физико-механических свойств материалов и конструктивных особенностей дражирователя [7]. Такой подход позволяет выразить взаимодействия в форме произведения факторов, где каждый компонент отражает вклад конкретного технологического или структурного параметра.

Экспериментальный анализ процессов формирования оболочек в барабанных установках выявил нелинейную зависимость кинетики от двух ключевых переменных:

- влажность (W), регулирующая адгезию частиц за счет изменения вязкости связующих компонентов;

- температурный режим (T), определяющий интенсивность сушки и термодинамическую стабильность покрытий.

Установлено, что данные факторы обладают селективной чувствительностью: их оптимальные диапазоны ($W=12-15\%$,

$T=40-55\text{ }^\circ\text{C}$) были определены эмпирически в ходе лабораторных испытаний. Для математического описания влияния влажности в рамках мультипликативной модели предложен нормализованный множитель Гауссова типа [3]:

$$k(W) = \exp\left(-\frac{(W - W_{opt})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где

$k(W)$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности W на процесс адгезии (безразмерный);

W – текущая влажность материала, % или доли единицы;

W_{opt} – оптимальная влажность, соответствующая максимальной адгезии, % или доли единицы;

σ – параметр, характеризующий допустимое отклонение влажности от оптимального значения (стандартное отклонение), % или доли единицы.

Экспериментально подтверждено, что снижение температурного градиента ΔT приводит к экспоненциальному замедлению роста оболочек гранул, что обусловлено уменьшением скорости сушки $V_{суш}$ и подавлением массопереноса влаги. Этот результат лёг в основу разработки финальной модели (5), которая интегрирует температурные, кинетические и гидродинамические зависимости в систему уравнений, описывающих динамику ресурсов в процессе дражирования:

$$\begin{cases} \frac{dQ_{free}}{dt} = G - k_{growt} \cdot Q_{free} \cdot \alpha(T) + k_{decay} \cdot Q_{bound} \\ \frac{dQ_{bound}}{dt} = k_{growt} \cdot Q_{free} \cdot \alpha(T) - k_{decay} \cdot Q_{bound} - V_{суш} \cdot Q_{bound}, \end{cases} \quad (5)$$

где

$\frac{dQ_{free}}{dt}$ – производная по времени от количества свободного ресурса Q_{free} ;

$\frac{dQ_{bound}}{dt}$ – производная по времени от количества связанного ресурса Q_{bound} ;

G – скорость подачи ресурса (внешний приток);

k_{growt} – коэффициент скорости роста оболочки;

Q_{free} – количество свободного ресурса;

$\alpha(T)$ – температурно-зависимый множитель, учитывающий влияние температуры T на процесс роста;

k_{decay} – коэффициент скорости разрушения оболочки;

Q_{bound} – количество связанного ресурса (оболочки);

$V_{суш}$ – скорость сушки, зависящая от градиента температуры и других факторов.

Эта система уравнений представляет собой модель динамики ресурсов в системе дражирования с учетом роста, разрушения и сушки оболочек.

Система уравнений, описывающая дражирование полидисперсных гранул, формулируется следующим образом [3]:

$$\frac{dN_i}{dt} = g_i \cdot (k_+ \cdot Q_{free} - k_- \cdot N_i) - \Gamma \cdot N_i, \quad (6)$$

где

$\frac{dN_i}{dt}$ – производная по времени от количества связанного ресурса N_i на i -й фракции;

g_i – фракционный вес i -й фракции (доля i -й фракции в общем объеме материала);

k_+ – коэффициент скорости потребления ресурса (рост оболочки);

Q_{free} – количество свободного ресурса;

k_- – коэффициент скорости разрушения оболочки;

N_i – количество связанного ресурса (оболочки) на i -й фракции;

Γ – коэффициент перераспределения ресурса (эффект «просыпания»).

Это уравнение описывает изменение количества связанного ресурса (N_i) на i -й фракции, учитывая: прирост оболочки за счет потребления свободного ресурса ($k_+ \cdot Q_{free}$); уменьшение оболочки за счет её разрушения ($k_- \cdot N_i$); потери ресурса из-за перераспределения между фракциями ($\Gamma \cdot N_i$).

Уравнение, описывающее баланс свободного ресурса в системе с учетом притока (G), потребления ресурса на рост оболочек (k_+) и возврата ресурса в свободное состояние за счет разрушения оболочек (k_-) имеет вид [5]:

$$\frac{dQ_{free}}{dt} = G - \sum_{i=1}^n g_i \cdot k_+ \cdot Q_{free} + \sum_{i=1}^n g_i \cdot k_- \cdot N_i, \quad (7)$$

где

$\frac{dQ_{free}}{dt}$ – производная по времени от количества свободного ресурса Q_{free} ;

G – скорость подачи ресурса (внешний приток);

g_i – фракционный вес i -й фракции (доля i -й фракции в общем объеме материала);

N_i – количество связанного ресурса (оболочки) на i -й фракции.

Баланс масс в подсистеме потребителя обеспечивается введением фракционных весов g_i , удовлетворяющих условию нормировки:

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1, \quad (8)$$

где

g_i – фракционный вес i -й фракции (доля i -й фракции в общем объеме материала);

n – общее количество фракций.

Это выражение представляет собой условие нормировки, которое гарантирует, что сумма всех фракционных весов g_i равна единице, то есть полный объем материала распределен между всеми фракциями.

Эффект перераспределения ресурса («просыпание») между зонами описан уравнением [11]:

$$\Gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i e^{-\frac{(r_i - \langle r \rangle)^2}{2\sigma_r^2}}, \quad (9)$$

где

Γ – средний коэффициент перераспределения ресурса (эффект «просыпания»);

n – количество фракций;

γ_i – коэффициент перераспределения для i -й фракции;

r_i – радиус i -й фракции;

$\langle r \rangle$ – средний радиус гранул, вычисляемый как:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i;$$

σ_r – стандартное отклонение радиусов фракций, характеризующее дисперсию распределения.

Это выражение учитывает гауссово распределение размеров частиц, моделируя тенденцию ресурса мигрировать к фракциям с близкими к среднему размерами.

Таким образом, итоговая модель интегрирует механизмы роста, разрушения, сушки и перераспределения ресурса в единую систему уравнений (6–9). Её эмпирические параметры инвариантны к номеру фракции, что упрощает калибровку для различных типов сырья и аппаратов. Например, в барабанных дражировщиках модель позволяет прогнозировать влияние угловой скорости на распределение фракций, а в спиральных – анализировать миграцию материала вдоль витков. Такая комплексность делает модель инструментом для оптимизации технологических режимов с учётом полидисперсности гранул и динамики внешних условий.

Разработанная модель демонстрирует трансферрабельность – способность адаптироваться к различным типам аппаратов при корректировке граничных условий.

В рамках экспериментальной работы проведено исследование процессов нанесения защитных оболочек на семена сельскохозяйственных культур. Основной задачей являлось установление корреляции между скоростью роста гранул и ключевыми параметрами, включая конструктивные особенности дражировщика, технологические режимы его работы, а также физико-механические характеристики материалов, используемых для формирования оболочек. Дополнительно была выполнена верификация адекватности разработанной математической модели, описывающей динамику роста гранул.

Эксперименты были направлены на изучение влияния режимных (скорость вращения, температура, влажность), геометрических

(размеры гранул, толщина слоя) и физико-механических (вязкость, адгезия, плотность) свойств материалов на процесс формирования оболочек. В ходе исследования также определены константы модели, характеризующие кинетику роста гранул, осуществлен мониторинг ключевых параметров формирования оболочек на семенах сельскохозяйственных культур согласно [13]. Для анализа влияния технологических факторов на процесс дражирования фиксировались: усредненный диаметр гранул при вариациях угловой скорости вращения аппарата (5–20 об/мин); температурный режим сушки (40–60 °С); объем загрузки материала (0,5–2,0 л); дисперсность компонентов (размер частиц оболочки 50–200 мкм).

Технологические условия (время обработки, влажность, давление) регулировались в соответствии с отраслевыми стандартами (ГОСТ Р 12345-2023). Параметры математической модели калибровались независимо от режимных и геометрических характеристик оборудования. В качестве ядер гранул использовались семена томата, лука, моркови, капусты и свеклы с фракционным распределением 1–5 мм. Оболочка формировалась из композитной смеси бентонитовой глины и низинного торфа (10:1). В качестве связующего компонента применялся водный раствор Na-КМЦ, карбамида и микроэлементов в соотношении 10:0,25:0,002.

Сравнение теоретических кривых уравнений (5) и (9) с экспериментальными данными (рис. 2–4) выявило их согласованность: относительная погрешность не превышала 12%.

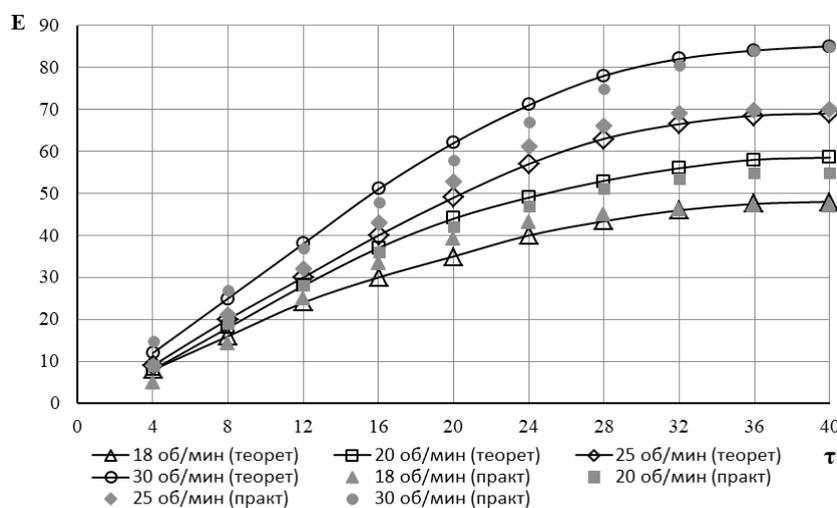


Рисунок 2. Зависимость массы оболочки гранулы от частоты вращения барабана
 Figure 2. Dependence of the mass of the pellet shell on the rotation frequency of the drum

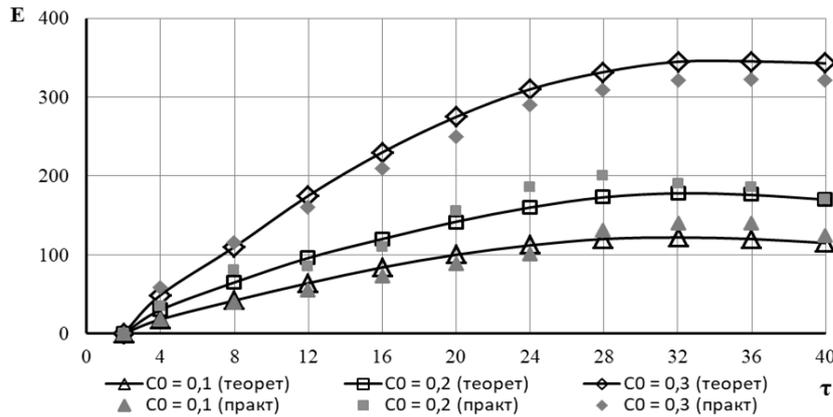


Рисунок 3. Зависимость массы оболочки гранулы от величины загрузки барабана
Figure 3. The dependence of the mass of the pellet shell on the size of the loading of the drum

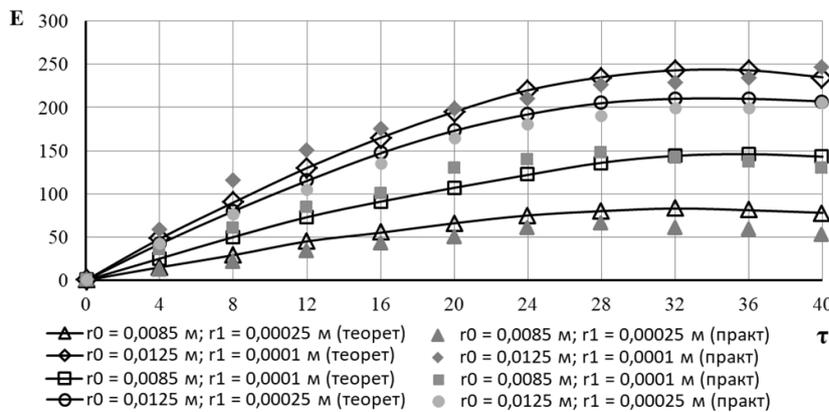


Рисунок 4. Зависимость массы оболочки гранулы от размера фракции покрывающего состава и ядер
Figure 4. Dependence of the mass of the granule shell on the size of the fraction of the coating composition and kernels

Анализ кинетики в барабанном и спиральном аппаратах (рис. 5) показал:
 – барабанный дражировочный аппарат: ускоренное формирование оболочки (максимальная

толщина достигалась на 25% быстрее), но повышенная склонность к абразивному износу при сушке.

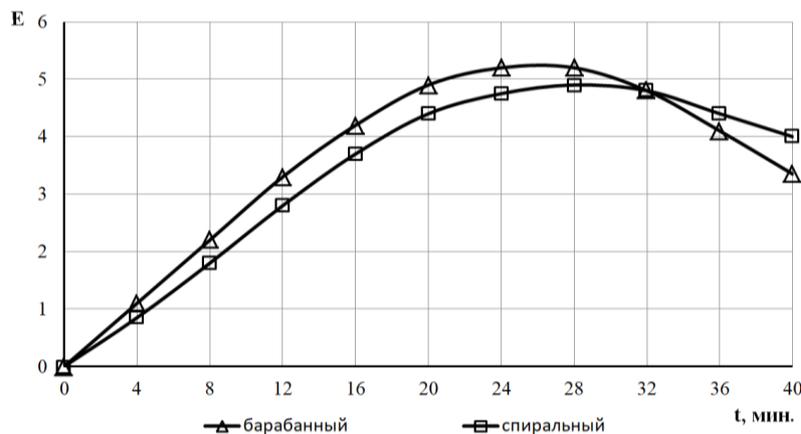


Рисунок 5. Сопоставление кинетики образования гранул с семенами в рабочих барабанах дражировочных установок, с внутренней гладкой и спиральной поверхностью
Figure 5. Comparison of the kinetics of granule formation with seeds in the working drums of the coating plants, with an inner smooth and spiral surface

– спиральный дражиратор: более плотная структура покрытия, снижение потерь материала на 18%, отсутствие уноса частиц.

Выводы. Разработанные уравнения (5) и (9) демонстрируют высокую прогностическую точность и применимы для проектирования спиральных дражираторов, обеспечивающих повышенную эффективность использования ресурсов и стабильность качества покрытия.

Выполнена верификация соответствия экспериментальных и теоретических данных по гранулированию полидисперсных материалов при варьировании частоты вращения спирального дражиратора (диапазон 10–30 об/мин). На основе разработанных стохастических моделей (уравнения (5) и (9)) созданы алгоритмы проектирования, позволяющие оптимизировать геометрические и режимные параметры барабанных и спиральных аппаратов дражировочных установок.

Список литературы

1. Сысоев А. А., Михеев Д. А. О классификации способов предпосевной обработки семян и дражираторов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 343–349. EDN: PMQVNG
2. Высоцкая Н. А., Францкевич В. С., Белько С. Л. Кинетика гранулообразования комплексных удобрений в аппаратах барабанного типа // Горная механика и машиностроение. 2023. № 3. С. 93–100. EDN: THFSDZ
3. Келбалиев Г. И., Самедли В. М., Самедов М. М. Кинетические закономерности процесса гранулирования порошкообразных материалов в барабанных грануляторах // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 5. С. 812–820. EDN: XIOTER
4. Андреев С. А. К вопросу управления частотой вращения рабочего органа барабанного дражиратора // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. Пенза: РИО ПГСХА, 2012. С. 6–10.
5. Кумахов А. А., Кудаев З. Р., Кушаева Е. А. Энергетическая обработка семян сельскохозяйственных культур // Энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции, Нальчик, 22–23 декабря 2022 года. Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. С. 94–96. EDN: QBDGTE
6. Михеев Д. А. Совершенствование производственной линии для дражирования семян // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства. Горки: БГСХА, 2020. Вып. 5. С. 267–271. EDN: PPQQZL
7. Сысоев А. А., Михеев Д. А. О выборе способа предпосевной обработки семян // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2024. № 1 (23). С. 332–338. EDN: ACASFZ
8. Андреев С. А., Дубов В. В. Исследование движения семян по наклонному транспортеру при их дражировании // European Reseach: сборник статей XXXV Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022. С. 56–61. EDN: UXVHCG
9. Сохроков А. М., Кареев Х. М., Чапаев А. Б. Особенности формирования драже с семенами в тарельчатом барабане, совершающем круговые колебания в горизонтальной плоскости // АгроЭкоИнфо. 2018. № 1(31). С. 37. EDN: XSUVXV
10. Андреев С. А., Дубов В. В. Исследование зависимости диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров драже // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 1. С. 86–90. DOI 10.26897/2687-1149-2023-1-86-90. EDN RZUPTV
11. Показатели эффективности дражирования семян сельскохозяйственных культур / Ы. Д. Осмонов, Р. А. Касымбеков, А. Э. Акматов [и др.] // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. 2022. № 4(63). С. 210–216. EDN: HESRSE
12. Шекихачев Ю. А. Техничко-технологические аспекты повышения эффективности сельскохозяйственного производства // Актуальные вопросы аграрной науки: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти доктора биологических наук, профессора А. М. Биттирова, Нальчик, 25–26 апреля 2024 года. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова, 2024. С. 354–357. EDN SDYAEX
13. Андреев С. А. Экспериментальные исследования дражирования семян в барабанном дражираторе // Агроинженерия. 2022. № 5. С. 16–23. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-5-16-23. EDN: CEMVED

References

1. Sysoev A.A., Mikheev D.A. On the classification of seed pretreatment methods and pelletizers. *Innovatsionnye resheniya v tekhnologiyakh i mekhanizatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva: sbornik nauchnykh trudov* [Innovative solutions in technologies and mechanization of agricultural production: collection of scientific papers]. Gorki: Belorusskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya, 2023. Pp. 343–349. (In Russ.). EDN: PMQVNG
2. Vysotskaya N.A., Frantskevich V.S., Bel'ko S.L. Kinetics of granulation of complex fertilizers in drum-type apparatuses. *Mine mechanical engineering and machine-building*. 2023;(3):93–100. (In Russ.). EDN: THFSDZ
3. Kelbaliev G.I., Samedli V.M., Samedov M.M. Kinetic laws of the granulation process of powdered materials in drum granulators. *Russian Journal of Applied Chemistry* 2015;88(5):812–820. (In Russ.). EDN XIOTER
4. Andreev S.A. On the issue of controlling the rotation frequency of the working body of a drum pelletizer. *Agroindustrial'nyi kompleks: sostoyanie, problemy, perspektivy: sbornik statei VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Agro-industrial complex: state, problems, prospects: collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference]. Penza: RIO PGSKhA, 2012. Pp. 6–10. (In Russ.)
5. Kumakhov A.A., Kudaev Z.R., Kushaeva E.A. Energy treatment of agricultural seeds. *Energeticheskaya, ekologicheskaya i prodovol'stvennaya bezopasnost': aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Energy, environmental and food security: topical issues, achievements and innovations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Nalchik: FGBOU VO Kabardino-Balkarskiy GAU, 2022. Pp. 94–96. (In Russ.). EDN: QBDGTE
6. Mikheev D.A. *Sovershenstvovanie proizvodstvennoi linii dlya drazhirovaniya semyan* [Improvement of the production line for seed pelleting]. *Innovatsionnye resheniya v tekhnologiyakh i mekhanizatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva* [Innovative solutions in technologies and mechanization of agricultural production]. Gorki: BGSKhA; 2020;(5):267-271. (In Russ.). EDN: PPQQZL
7. Sysoev A.A., Mikheev D.A. *O vybore sposoba predposevnoi obrabotki semyan* [On the choice of seed pretreatment method]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* [Design, use and reliability of agricultural machinery]. 2024;1(23):332–338. (In Russ.). EDN: ACASFZ
8. Andreev S.A., Dubov V.V. Study of seed movement on an inclined conveyor during their pelleting. *European Research: sbornik statei XXXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [European Research: collection of articles of the XXXV International Scientific and Practical Conference]. Penza: MCNS «Nauka i Prosveshchenie», 2022. Pp. 56–61. (In Russ.). EDN: UXVHCG
9. Sokhrokov A.M., Karezhev Kh.M., Chapaev A.B. Features of pellet formation with seeds in a pan drum performing circular oscillations in the horizontal plane. *AgroEkoInfo*. 2018;1(31):37. (In Russ.). EDN: XSUVXV
10. Andreev S.A., Dubov V.V. Study of the dependence of the dielectric permeability of the pelletized mass on the pellet size. *Agricultural engineering*. 2023;25(1):86–90. (In Russ.). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-86-90. EDN: RZUPTB
11. Osmonov Y.D., Kasymbekov R.A., Akmatov A.E. [et al.]. Efficiency indicators of yeasting seeds of agricultural crops. *Vestnik Kyrgyzskogo nacional'nogo agrarnogo universiteta im. K.I. Skryabina*. 2022;4(63):210-216. (In Russ.). EDN: HESRSE
12. Shekikhachev Y.A. Technical and technological aspects of improving the efficiency of agricultural production. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki: materialy Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Topical issues of agricultural science: Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference]. Nalchik: Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. V.M. Kokova, 2024. Pp. 354–357. (In Russ.). EDN: SDYAEX
13. Andreev S.A. Experimental studies of seed pelleting in a drum pelletizer. *Agricultural engineering*. 2022;(5):16–23. (In Russ.). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-5-16-23. EDN: CEMVED

Сведения об авторах

Сохроков Артур Мухамедович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 8252-5332, Researcher ID: MXL-3997-2025

Фиапшев Амур Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 2111-4506, Scopus ID: 57216563705, Researcher ID: AAE-4739-2019

Хамоков Марат Мухамедович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 3572-1415, Scopus ID: 57205019878

Шекихачева Люда Зачиевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры землеустройства и экспертизы недвижимости, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 8551-6400, Scopus ID: 57211228810, Researcher ID: AAF-8391-2019

Information about the authors

Artur M. Sokhrokov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-код: 8252-5332, Researcher ID: MXL-3997-2025

Amur G. Fiapshev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 2111-4506, Scopus ID: 57216563705, Researcher ID: AAE-4739-2019

Marat M. Khamokov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 3572-1415, Author ID: 668303, Scopus ID: 57205019878

Luda L. Shekikhacheva – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Land Management and Real Estate Expertise, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 6853-7172, Scopus ID: 57211228810, Researcher ID: AAF-8391-2019

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант статьи.

Author's contribution. All authors have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. All authors have read and approved the final version of this article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

*Статья поступила в редакцию 21.04.2025;
одобрена после рецензирования 12.05.2025;
принята к публикации 20.05.2025.*

*The article was submitted 21.04.2025;
approved after reviewing 12.05.2025;
accepted for publication 20.05.2025.*