

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВСТАВОК В ПРОТРАВЛИВАТЕЛЕ БАРАБАННОГО ТИПА НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ

© 2026 Хасанов Э. Р.<sup>1</sup>✉, Козловцев А. П.<sup>2</sup>, Галимов А. Ш.<sup>1</sup>, Якупов А. М.<sup>1</sup><sup>1</sup>Башкирский государственный аграрный университет  
(г. Уфа, Российская Федерация)<sup>2</sup>Оренбургский государственный аграрный университет  
(г. Оренбург, Российская Федерация)

✉ hasan\_ed@mail.ru

**Реферат.** Протравливание семян в сельском хозяйстве направлено на повышение сохранности посевного материала, улучшение его посевных качеств и создание благоприятных условий для получения дружных всходов. В статье исследовано влияние различных вставок на движение семян в барабанном протравливателе методом дискретных элементов (DEM). Рассмотрены три варианта рабочей поверхности: гладкая стальная, с цилиндрическими вставками и спиральной резиновой вставкой. Моделирование и лабораторные испытания показали, что спиральная вставка обеспечивает наилучшее перемешивание семян, увеличивает время их пребывания в барабане и улучшает равномерность протравливания. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения такой конструкции для повышения качества предпосевной обработки семян. Кроме того, использование DEM-моделирования позволяет заранее оценить влияние конструктивных изменений на кинематику семенного слоя без проведения большого числа натурных испытаний. Это делает предложенный подход удобным инструментом для проектирования и совершенствования барабанных протравливателей.

**Ключевые слова:** семена, моделирование, вставки, коэффициент сцепления, протравливатель семян барабанного типа, обработка семян, метод дискретных элементов (DEM), защитно-стимулирующие препараты.

**Для цитирования:** Моделирование процесса влияния рабочей поверхности вставок в протравливателе барабанного типа на качество обработки / Э.Р. Хасанов, А.П. Козловцев, А.Ш. Галимов А.М. Якупов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 2(82). С. 88-96. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-88-96

## MODELING THE IMPACT PROCESS OF WORKING SURFACE OF INSERTS IN A DRUM-TYPE TREATER ON TREATMENT QUALITY

© 2026 Khasanov E. R.<sup>a</sup>✉, Kozlovtssev A. P.<sup>b</sup>, Galimov A. Sh.<sup>a</sup>, Yakupov A. M.<sup>a</sup><sup>a</sup>Bashkir State Agrarian University  
(Ufa, Russian Federation)<sup>b</sup>Orenburg State Agrarian University  
(Orenburg, Russian Federation)

✉ hasan\_ed@mail.ru

**Abstract.** Seed treatment in agriculture is aimed at increasing the safety of seed, improving its sowing qualities and creating favorable conditions for uniform seedling emergence. This article examines the impact of various inserts on seed movement in a drum-type treater using the discrete element method. Three working surface options are considered: smooth steel, with cylindrical inserts and a spiral rubber insert. Modeling and laboratory testing showed that the spiral insert provides better seed mixing, increases seed residence time in the drum and improves treatment uniformity. The obtained results confirm the feasibility of using this design to improve the quality of pre-sowing seed treatment. Furthermore, the use of discrete element method modeling allows for an early assessment of the impact of design changes on seedbed kinematics without extensive field testing. This makes the proposed approach a convenient tool for designing and improving drum seed treaters.

**Key words:** seeds, modeling, inserts, adhesion coefficient, drum-type seed treatment, seed treatment, discrete element modeling, seed protection and stimulating agents.

**For citation:** Khasanov ER, Kozlovtssev AP, Galimov Ash, Yakupov AM. [Modeling the impact process of working surface of inserts in a drum-type treater on treatment quality]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 2(82). 88-96 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-88-96

**Введение.** Протравливание семян является ключевым этапом предпосевной обработки, обеспечивающим защиту посевного материала от грибковых и бактериальных инфекций [1, 2]. Эффективность этого

процесса определяется равномерностью распределения протравливающего препарата по поверхности семян, что во многом зависит от динамики их перемещения в рабочей зоне протравливателя [3, 4, 5].

Метод дискретных элементов (DEM) нашел широкое применение для моделирования поведения сыпучих сред в сельскохозяйственных машинах благодаря возможности учета индивидуального движения каждой частицы с учетом их физико-механических свойств и параметров взаимодействия поверхностей [6].

Барабанные протравливатели семян получили широкое распространение в сельскохозяйственном производстве благодаря высокой производительности и удовлетворительной равномерности нанесения препаратов. Качество конечной обработки семян определяется эффективностью их перемешивания с рабочим раствором внутри вращающегося барабана. Кинематика движения сыпучего слоя в таком аппарате является сложным процессом, зависящим от множества факторов:

геометрических параметров барабана, частоты его вращения, физико-механических свойств семян и, что особенно важно, от характера взаимодействия частиц с внутренней рабочей поверхностью [7, 8].

Повышение эффективности и качества работы барабанных протравителей семян напрямую связано с оптимизацией процесса их перемешивания, который определяется кинематикой движения сыпучего слоя. Ключевым параметром, влияющим на кинематику, является коэффициент сцепления между семенами и внутренней поверхностью барабана. Он определяет угол подъема семян перед сходом, что, в свою очередь, влияет на степень заполнения полезного объема барабана и качество обработки. На рисунке 1 приведены принципиальные схемы движения семян в барабане.

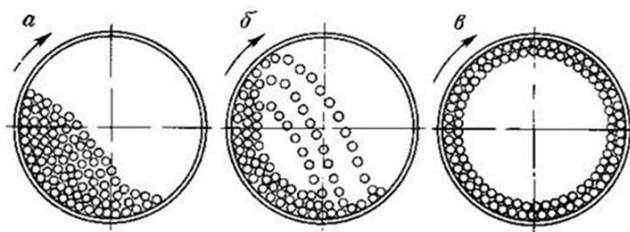


Рис. 1 – Режимы движения семян в барабане:

a – каскадный режим; б – водопадный режим; в – критический режим

Fig. 1 – Modes of seed motion in the drum:

a – cascade mode; б – waterfall mode; c – critical mode

Сочетание каскадного и водопадного режимов движения семян на переходных режимах без разрыва контакта семян между собой при поднятии на определенный угол способствует повышению интенсивности перемешивания и процента покрытия семян препаратом.

Существующие конструкции мало учитывают потенциал модификации поверхности для целенаправленного управления движением слоя и максимизации технологических показателей.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является изучение движения семян в протравливателе барабанного типа со вставками из различных материалов и форм путем моделирования методом дискретных элементов.

Задачи:

- создать 3D-модель барабана протравливателя в системе CAD;
- рассмотреть процесс создания

моделирования процесса движения семян в барабане с различными вставками;

- получить расчетные данные о движении семян в барабане на основе моделирования.

**Условия, материалы и методы.** Для создания 3D-модели вставок из различных материалов и барабана (рис. 2) использовали программу Autodesk Inventor. Важной частью первого этапа является создание 3D-тела, в котором происходит движение сыпучих материалов. В нашем случае создаем тело, которое в точности повторяет внутренний контур барабана протравливателя, который задействован при моделировании движения семян.

Моделирование динамики движения семян в барабане протравливателя со вставками из различных материалов и форм производилось в программе Rocky DEM для моделирования динамики сыпучих сред со сложной геометрией частиц методом дискретных элементов (DEM) [9, 10, 11].

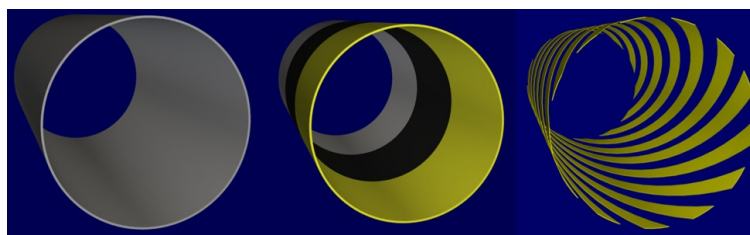


Рис. 2 – 3D-модели вставок, смоделированные в программе Autodesk Inventor

Fig. 2 – 3D models of the inserts, simulated in Autodesk Inventor

Для анализа влияния свойств поверхности на динамику полного слоя семян проведено компьютерное моделирование методом дискретных элементов в программном комплексе ANSYS Rocky 2023 R2. Созданные геометрии 3D-моделей вставок импортировали в среду Rocky

DEM [12, 13].

Для рандомизации главным условием импорта является соблюдения натуральных масштабов геометрии. После импортирования геометрии задаются параметры материалов (рис. 3). Далее идет настройка параметров взаимодействия (рис. 4).

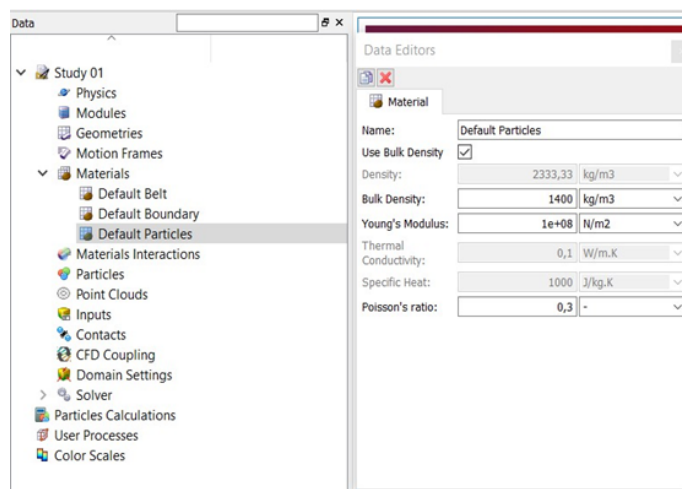


Рис. 3 – Параметры материалов

Fig. 3 – Material parameters

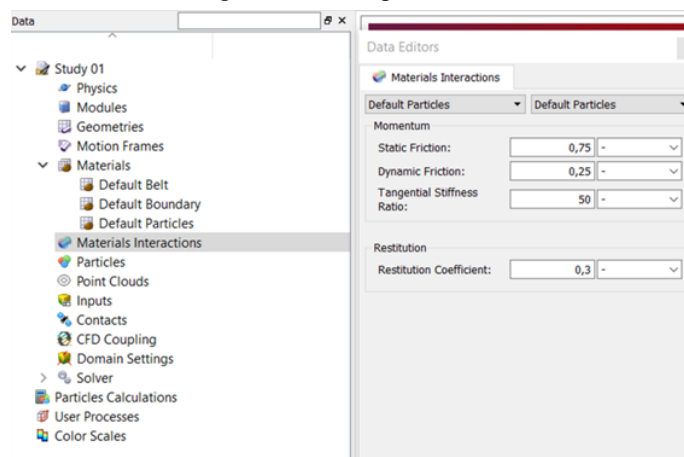


Рис. 4 – Параметры взаимодействия материалов

Fig. 4 – Parameters of material interaction

Установлены три варианта конструкции рабочих поверхностей вставок барабана, участвовавшие в моделировании (рис. 5):

– базовая модель (M1), гладкая стальная поверхность (контрольный вариант действующих конструкций протравливателей);

– модель 2 (M2), барабан с цилиндрическими вставками из оцинкованной стали, гладкой резины и гладкого полиуретана;

– модель 3 (M3), барабан с резиновыми вставками, расположенными вдоль образующей по спирали с шагом 0,05 м.

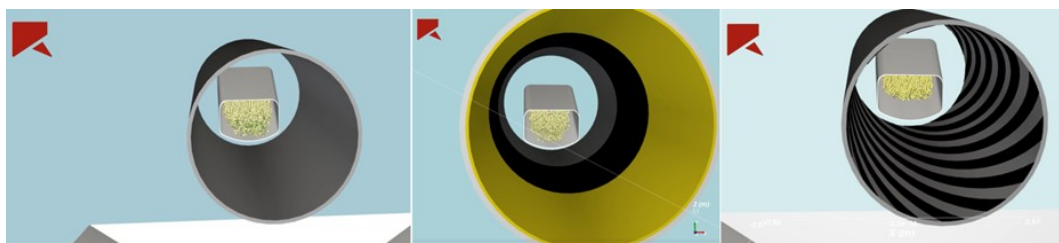


Рис. 5 – Импортированные модели барабана

a – без вставки M1; б – со вставкой M2; в – со вставкой M3

Fig. 5 – Imported drum models:

a – without insert M1; б – with insert M2; в – with insert M3

В модели М3 направление спирали противоположно вращению барабана, что предназначено для создания осевой составляющей силы, замедляющей продольное движение семян и увеличивающей их путь.

Далее осуществляется настройка модели семян пшеницы. На рисунке 6 представлена фотография семян пшеницы и цифровая геометрическая модель семени. Установленные параметры модели представлены в таблице.

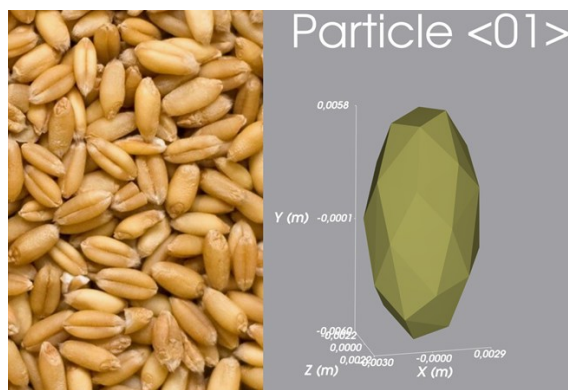


Рис. 6 – Реальный размер семян пшеницы и цифровая геометрическая модель  
Fig. 6 – Real size of wheat seeds and the digital geometric model

Таблица – Параметры модели  
Table – Model parameters

| Показатель                              | Частицы семян пшеницы  | Материал сталь         | Материал резина        | Материал полиуретан    |
|-----------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Модуль Юнга                             | $3 \cdot 10^8$ Па      | $2 \cdot 10^{11}$ Па   | $1 \cdot 10^9$ Па      | $1 \cdot 10^8$ Па      |
| Плотность                               | 1300 кг/м <sup>3</sup> | 7800 кг/м <sup>3</sup> | 1050 кг/м <sup>3</sup> | 1150 кг/м <sup>3</sup> |
| Коэффициент Пуассона                    | 0,25                   | 0,3                    | 0,5                    | 0,5                    |
| Коэффициент статического трения частиц  | 0,6                    | 0,25                   | 0,45                   | 0,35                   |
| Коэффициент динамического трения частиц | 0,1                    | 0,2                    | 0,32                   | 0,25                   |

Частота вращения барабана составляла 40 об/мин, что соответствует оптимальному каскадному режиму перемешивания.

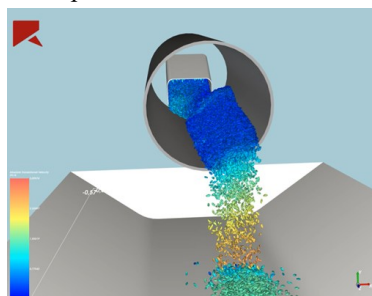
**Результаты и обсуждение.** Проведенное моделирование позволило визуально определить характер движения семян в барабане со вставками из различных материалов и форм (рис. 7-9) с выводом цветовой гаммы слоев движения семян внутри барабана.

От скорости движения, вращения, а также продолжительности пребывания семян в барабане в зоне обработки зависит степень равномерного распределения препарата по поверхности семенного материала.

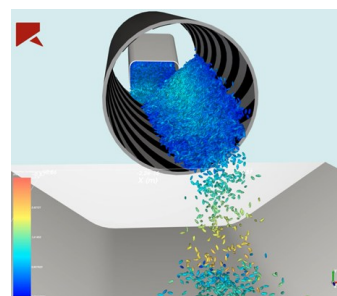
По итогам проведенного компьютерного моделирования методом дискретных

элементов в программном комплексе ANSYS Rocky 2023 R2 при анализе влияния свойств поверхности на динамику всего слоя семян в барабане лучший результат по сравнению с контрольным вариантом без вставок М1 показала модель барабана со вставкой М3.

Модель барабана со вставкой М3 за счет вставки, имеющей форму спирали, закрученной по направлению, обратному движению барабана позволила снизить продольную скорость перемещения семян от момента входа до их выхода из барабана, увеличить угол подъема семян по стенкам барабана, повысив заполнение полезного объема барабана семенами при использовании вставок из резины.



а / а



б / б

Рис. 7 – Визуализация среднего значения абсолютной скорости перемещения семян в барабане:  
а – вставка М1; б – вставка М3

Fig. 7 – Visualization of the average absolute velocity of seed movement in the drum:  
а – insert М1; б – insert М3

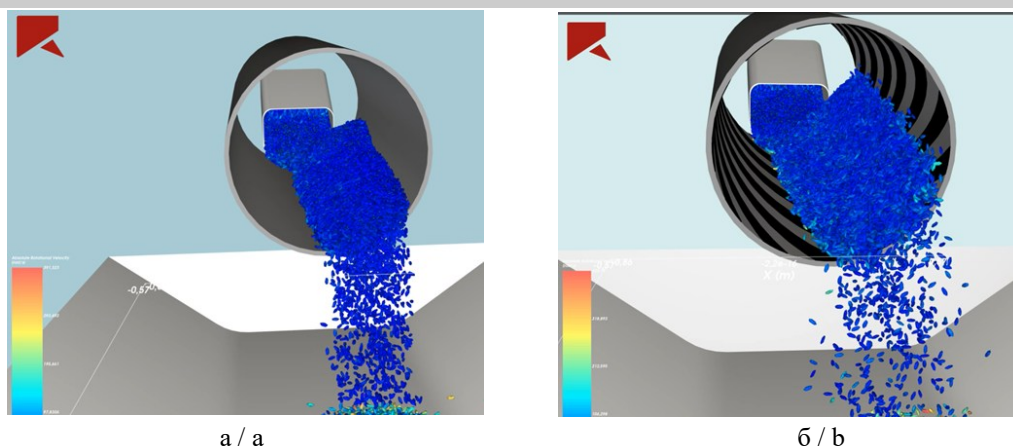


Рис. 8 – Визуализация среднего значения абсолютной скорости вращения семян в барабане  
а – вставка М1; б – вставка М3  
Fig. 8 – Visualization of the average absolute rotational velocity of seeds in the drum:  
a – insert M1; b – insert M3

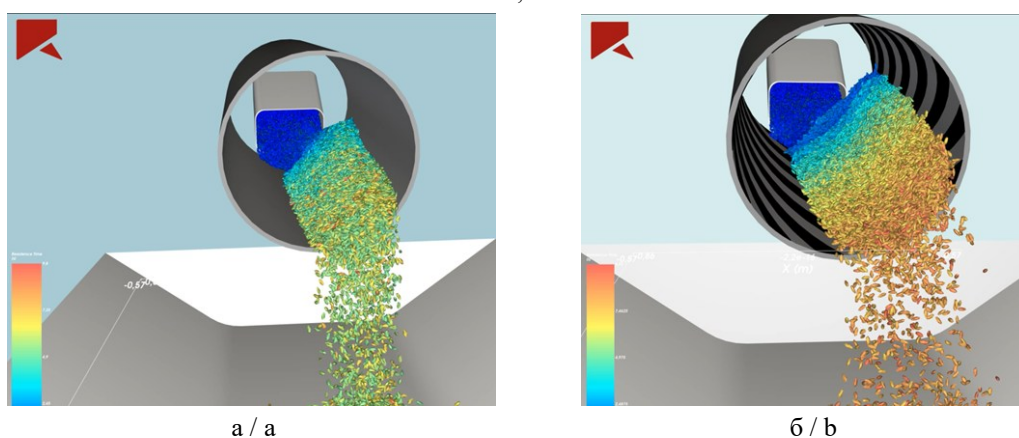


Рис. 9 – Визуализация среднего значения времени пребывания семян в барабане  
а – вставка М1; б – вставка М3  
Fig. 9 – Visualization of the average residence time of seeds in the drum:  
a – insert M1; b – insert M3

Лучший результат по визуализации данных показало моделирование со вставкой МЗ с резиновыми вставками, расположенными вдоль образующей по спирали с шагом 0,05 м с направлением спирали противоположном вращению барабана.

На основе моделирования процесса

движения семян в барабане получили графики:

- среднего значения абсолютной скорости перемещения семян в барабане, м/с (рис. 10).
- среднего значения абсолютной скорости вращения семян в барабане, рад/с (рис. 11).
- среднего значения времени пребывания семян в барабане, секунд (рис. 12).

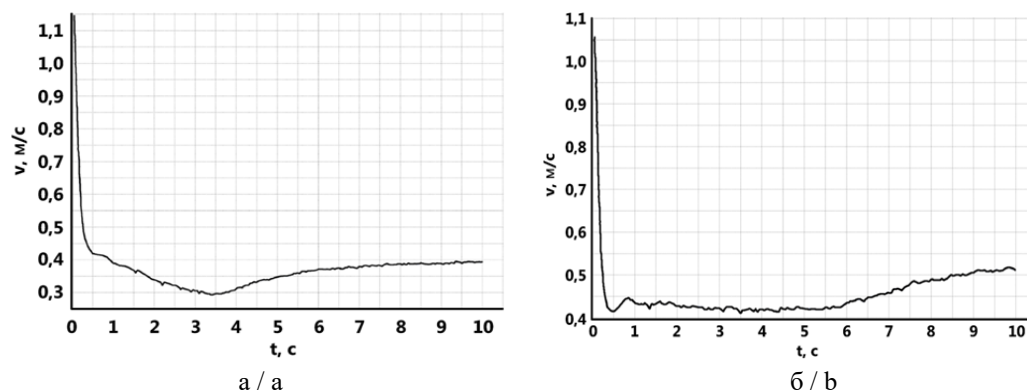
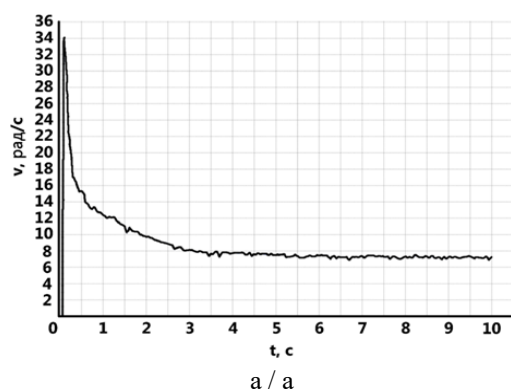


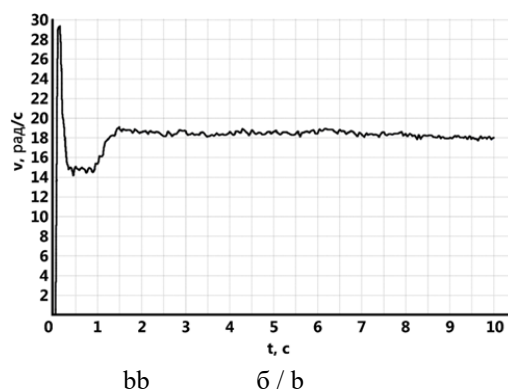
Рис. 10 – График среднего значения абсолютной скорости перемещения семян в барабане  
а – вставка М1; б – вставка М3  
Fig. 10 – Graph of the average absolute velocity of seed movement in the drum:  
a – insert M1; b – insert M3

Данные абсолютной скорости вращения семян в барабане представлены на рисунке 11.



a / a

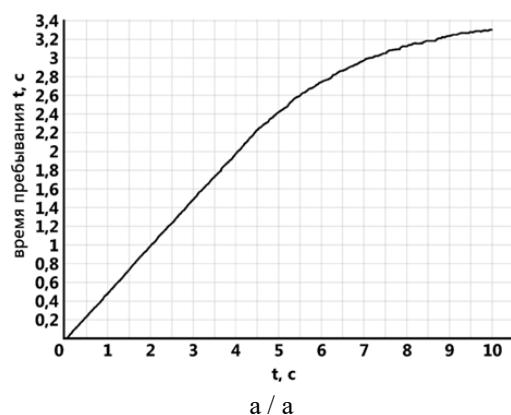
Среднее время пребывания семенного материала в барабане представлено на рисунке 12.



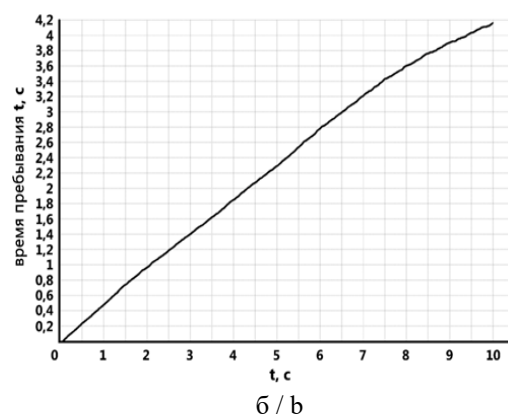
bb б / b

Рис. 11 – График среднего значения абсолютной скорости вращения семян в барабане  
а – вставка M1; б – вставка M3

Fig. 11 – Graph of the average absolute rotational velocity of seeds in the drum:  
a – insert M1; b – insert M3



a / a



б / b

Рис. 12 – График среднего значения времени пребывания семян в барабане  
а – вставка M1; б – вставка M3

Fig. 12 – Graph of the average residence time of seeds in the drum:  
a – insert M1; b – insert M3

На основе данных моделирования разработан опытный образец конструкции протравливателя семян со вставками из полиуретана, закрепленных на внутренней поверхности барабана. Вставки из полосок шириной 50 мм установлены в барабан. С использованием электродвигателя при угловой скорости барабана 40 об/мин, угле наклона  $\beta = 12^\circ$  проведены лабораторные исследования для оценки качества обработки семян (рис. 13).

Лабораторные исследования проводились с семенами пшеницы сорта «Буран», в каждой партии пропусклось 67 кг семян в течение 60 секунд. Производительность установки составила 4 т/ч. Вращение барабана производилось, как по часовой, так и против часовой стрелки.

На рисунке 14 представлены результаты определения качества протравливания семян на энергию прорастания и всхожесть.



Рис. 13 – Изготовленные вставки и лабораторные эксперименты  
Fig. 13 – Manufactured inserts and laboratory experiments



а / а

б / б

Рис. 14 – Пророщенные семена пшеницы после проведения лабораторных экспериментов

а – вставка М1; б – вставка М3

Fig. 14 – Germinated wheat seeds after laboratory experiments:

а – insert M1; б – insert M3

Энергия прорастания после обработки в стандартном барабане со вставкой М1 составила 76%, всхожесть 87%. Энергия

прорастания в модернизированном барабане со вставкой М3 составила 89%, всхожесть 94% (рис. 15).

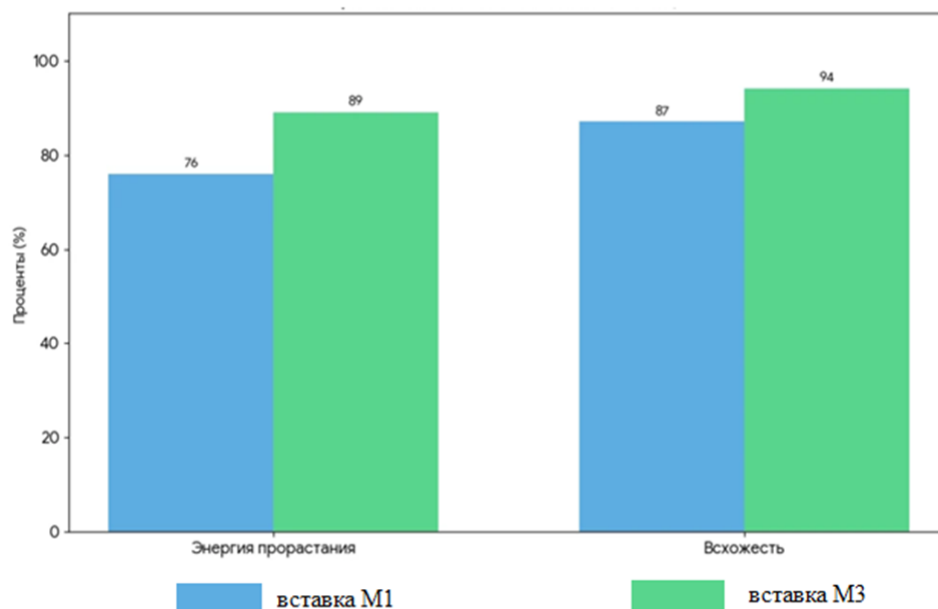


Рис. 15 – Результаты проведённых исследований на энергию прорастания и всхожесть семян

а – вставка М1; б – вставка М3

Fig. 15 – Results of the studies on seed germination energy and germination rate:

а – insert M1; б – insert M3

Таким образом лабораторные исследования на энергию прорастания семян пшеницы и всхожесть показали преимущество предлагаемой вставки барабана протравливателя, что подтвердило результаты моделирования.

**Выводы.** Рассмотренный процесс моделирования процесса движения семян в барабане с различными вставками показал, что лучшие результаты работы, влияющие на качество обработки, показал вариант со вставкой М3.

По сравнению с вариантом М1, применяемым на практике, произошло увеличение абсолютной скорости перемещения семян в барабане с 0,39 м/с до 0,51 м и абсолютной скорости перемещения семян с 7 рад/с до 18 рад/с. Время пребывания семян в барабане увеличилось с 3,3 до 4,2 и составило рост на 0,9 секунды.

Результаты лабораторных опытов с семенами пшеницы на энергию прорастания в случае применения вставки варианта М3 выросли на 13%, на всхожесть выросли на 7% по сравнению со стандартным вариантом М1.

Предложенная конструкция повышает качество обработки семян за счет оптимизации кинематики сыпучего слоя. Увеличение перемешивания слоев с появлением сочетания водопадного и каскадного режимов в предложенном варианте вставки свидетельствует о целесообразности применения данной конструкции в области предпосевной обработки семян.

**Сведения о финансировании.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-76-10070, (<https://rscf.ru/project/23-76-10070/>)

### Литература

1. Муратов А.А., Епифанцев В.В., Колесникова Т.П. Влияние протравливания семян на поражение корневыми гнилями и урожайность ярового тритикале // Пермский аграрный вестник. 2023. № 4(44). С. 69-73. doi: 10.47737/2307-2873\_2023\_44\_69.
2. Торопова Е. Ю., Фещенко Е. С. Влияние агроэкологических факторов на фитосанитарное состояние и качество семян яровой пшеницы в условиях лесостепи Новосибирского Приобья // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39, № 1. С. 17-24. doi: 10.53859/02352451\_2025\_39\_1\_17.
3. Сабиров Р. Ф. Определение параметров случайного взаимодействия твердых частиц и капель суспензии в камере обработки семян биопрепаратами // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1(57). С. 25-32. doi: 10.18286/1816-4501-2022-1-25-32.
4. Сабиров Р.Ф., Валиев А.Р., Мухамадьяров Ф.Ф. Обоснование конструктивно-технологических параметров устройства для обработки семян биопрепаратами // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16, № 3(63). С. 84-89. doi: 10.12737/2073-0462-2021-84-89.
5. Нуруллин Э. Г. Основные направления совершенствования машин для предпосевной обработки семян // Техника и оборудование для села. 2018. № 3. С. 13-15.
6. Wiacek J., Parafiniuk P. DEM study of microstructural effects in friction of wheat on corrugated steel surface // Tribology International. 2023. Vol. 183. Art. № 108435. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108435.
7. Файзуллин Р.А, Нуруллин Э.Г., Залялов А.А. Экспериментальное исследование травмирования семян зерновых культур в протравочной машине // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2023. № 2(18). С. 4-19.
8. Хасанов Э.Р. Анализ процесса инкрустации семян в барабанном протравливателе-инкрустаторе // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2013. № 1(25). С. 87-89.
9. Saurabh S., de Lima G.H., Potapov A. Predictive Optimization of SAG Mill Wear Using Rocky. 2017. URL: <https://rocky-dem.ru/media/predictive-optimization-of-sag-mill.pdf>.
10. Determination of Material and Interaction Properties of Granular Fertilizer Particles Using DEM Simulation and Bench Testing / Lei X., Wu W., Deng X., et al. // Agriculture 2023, 13, 1704. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091704>.
11. Rocky, Release 2023 R2, Help System, DEM Technical Manual.
12. Мударисов С.Г., Мухаметдинов А.М., Фархутдинов И.М. Обзор параметров и моделей контактов для моделирования семян и гранулированных удобрений методами дискретных элементов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2024. № 197. С. 58-85. doi: 10.21515/1990-4665-197-008.
13. Coetzee, Review: calibration of the discrete element method // Powder Technol. 310 (2017) 104-142 c.

### References

1. Muratov AA, Epifantsev VV, Kolesnikova TP. [Effect of seed treatment on root rot infection and productivity of spring triticale]. Permskiy agrarnyy vestnik. 2023; 4 (44). 69-73 p. doi: 10.47737/2307-2873\_2023\_44\_69.
2. Toropova EYu, Feshchenko ES. [Effect of agroecological factors on phytosanitary condition and quality of spring wheat seeds in the forest-steppe conditions of Novosibirsk Ob region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025; Vol.39. 1. 17-24 p. doi: 10.53859/02352451\_2025\_39\_1\_17.
3. Sabirov RF. [Determination the parameters of random interaction of solid particles and suspension droplets in a chamber for treating seeds with biopreparations]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2022; 1(57). 25-32 p. doi: 10.18286/1816-4501-2022-1-25-32.
4. Sabirov RF, Valiev AR, Mukhamadyarov FF. [Justification of design and technological parameters of a device for treating seeds with biopreparations]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3(63). 84-89 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-84-89.
5. Nurullin EG. [Main directions of improving machines for pre-sowing seed treatment]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2018; 3. 13-15 p.
6. Wiacek J, Parafiniuk P. DEM study of microstructural effects in friction of wheat on corrugated steel surface. Tribology International. 2023; Vol.183. Art.108435. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108435.
7. Fayzullin RA, Nurullin EG, Zalyalov AA. [An experimental study of grain seed damage in a seed dressing machine]. Nauchno-tehnicheskii vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK. 2023; 2(18). 4-19 p.
8. Khasanov ER. [Analysis of seed incrustation process in a drum seed dresser-incrustation machine]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013; 1(25). 87-89 p.
9. Saurabh S, de Lima GH, Potapov A. Predictive optimization of SAG mill wear using rocky. 2017. Available from: <https://rocky-dem.ru/media/predictive-optimization-of-sag-mill.pdf>.

10. Lei X, Wu W, Deng X. Determination of material and interaction properties of granular fertilizer particles using DEM simulation and bench testing. Agriculture 2023; 13. 1704. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091704>.

11. Rocky, Release 2023 R2, Help System, DEM Technical Manual.

12. Mudarisov SG, Mukhametdinov AM, Farkhutdinov IM. [Review of parameters and contact models for modeling seeds and granular fertilizers using discrete element methods]. Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; 197. 58-85 p. doi: 10.21515/1990-4665-197-008.

13. Coetzee C. Review: calibration of the discrete element method. Powder Technol. 310 (2017). 104-142 p.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Сведения об авторах:**

**Хасанов Эдуард Рифович** - доктор технических наук, профессор, декан факультета механики и цифрового инжиниринга Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), e-mail: hasan\_ed@mail.ru, ORCID 0000-0003-3394-6022

**Козловцев Андрей Петрович** - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации технологических процессов в АПК Оренбургского государственного аграрного университета (460014, Российская Федерация, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, д. 18), e-mail: ap\_kozlovcev@mail.ru, ORCID 0000-0002-5622-9598

**Галимов Алмаз Шамилович** – младший научный сотрудник кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), e-mail: almaz.shm@mail.ru

**Якупов Андрей Маратович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов и реновации машин Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), e-mail: ya-andrei75@mail.ru

**Вклад авторов:**

Э.Р. Хасанов – научное руководство, развитие методологии, написание исходного текста;

А.П. Козловцев – итоговые выводы, концепция исследования;

А.Ш. Галимов – проведение экспериментов, составление схем и чертежей;

А.М. Якупов – развитие методологии, составление статьи.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 14.04.2026; одобрена после рецензирования 01.06.2026; принята к публикации 25.06.2026.

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

**Authors:**

**Khasanov Eduard Rifovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Mechanics and Digital Engineering Faculty Bashkir State Agrarian University (450001, Russian Federation, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34), e-mail: hasan\_ed@mail.ru, ORCID 0000-0003-3394-6022

**Kozlovtssev Andrey Petrovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Mechanization of Technological Processes in the Agricultural Sector Orenburg State Agrarian University (460014, Russian Federation, Orenburg, Chelyuskintsev St., 18), e-mail: ap\_kozlovcev@mail.ru, ORCID 0000-0002-5622-9598

**Galimov Almaz Shamilevich** - junior researcher of Department of Mechatronic Systems and Machines for Agricultural Production Bashkir State Agrarian University (450001, Russian Federation, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34), e-mail: almaz.shm@mail.ru

**Yakupov Andrey Maratovich** – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Materials Technology and Machine Renovation Bashkir State Agrarian University (450001, Russian Federation, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34), email: ya-andrei75@mail.ru

**Contribution of the authors:**

E.R. Khasanov– Scientific supervision, Methodology development, Writing an original text;

A.P. Kozlovtssev– Final conclusions, Research concept;

A.Sh. Galimov– Experiments, Diagrams and drawings;

A.M. Yakupov– Methodology development, Article drafting.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 14.04.2026; revised 01.06.2026; accepted 25.06.2026.

