

Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 169–186.

Forests of Russia and economy in them. 2026. № 1 (96). P. 169–186.

Научная статья

УДК 004.942/ 674.8

DOI: 10.51318/FRET.2026.96.1.019

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗГРУЗКЕ БУНКЕРА

Владислав Олегович Цубикс¹, Сергей Николаевич Долматов²,
Анастасия Александровна Цубикс³

¹⁻³ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

¹ vladsubix@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8912-8006>

² pipinaskus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

³ ansob_1209@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7756-1793>

Аннотация. Измельчение, фракционирование и хранение сыпучего сырья и готовой продукции является важной частью множества технологических процессов в различных отраслях промышленности, в том числе в деревопереработке. Актуальность темы обусловлена значительными объемами производства измельченной древесины, технологической щепы, древесных пеллет и необходимостью совершенствования процессов хранения и выгрузки продукции из бункеров. В работе исследован процесс выгрузки пеллет из технологического бункера. Были исследованы три варианта конструктивного исполнения бункеров с углами откоса стенок 40, 50 и 60°. Методология основана на применении компьютерного имитационного твердотельного моделирования в программном пакете Altair EDEM с обработкой результатов в виде статистического анализа в среде Statistica. В ходе работы установлены количественные зависимости между углом наклона стенок и выходными характеристиками выгрузки пеллет. Регрессионный анализ продемонстрировал высокую прогностическую способность моделей с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$ для скорости истечения и $R^2 = 0,93$ для показателя массы. Результаты показывают, что угол откоса в 40° обеспечивает наилучшие показатели и производительность до 34,9 т/ч при времени загрузки 1 ч 26 мин. Моделирование процесса истечения показало наличие заторов в бункере, что с течением времени приведет к снижению производительности. При увеличении угла до 60° наблюдается критическое снижение производительности на 43 %. Практическая значимость работы подтверждена расчетами, показывающими возможность сокращения времени операций на 35–45 % при использовании бункеров с углами 40–50° по сравнению с таковой в конструкции, имеющей угол наклона стенок в 60°. Разработанная методика позволяет оптимизировать параметры технологического оборудования для предприятий деревообрабатывающей отрасли без необходимости создания натуральных образцов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем транспортировки сыпучих материалов на производственных объектах.

Ключевые слова: пеллеты, имитационное моделирование, метод дискретных элементов, угол откоса бункера, статистический анализ

Для цитирования: Цубикс В. О., Долматов С. Н., Цубикс А. А. Имитационное моделирование процесса движения сыпучих материалов при разгрузке бункера // Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 169–186.

Original article

SIMULATION MODELING OF THE PROCESS OF BULK MATERIALS MOVEMENT DURING BUNKER UNLOADING

Vladislav O. Tsubiks¹, Sergey N. Dolmatov², Anastasia A. Tsubiks³

¹⁻³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russia

¹ vladtsubix@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8912-8006>

² pipinaskus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

³ ansob_1209@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7756-1793>

Abstract. The crushing, fractionation, and storage of bulk raw materials and finished products are essential components of many technological processes in various industries, including woodworking. The relevance of this topic is determined by the significant production volumes of crushed wood, process chips, and wood pellets, and the need to improve the processes of storing and unloading products from process bunkers. This paper examines the process of unloading pellets from a process bunker. Three bunkers design options with wall slope angles of 40°, 50°, and 60° were investigated. The methodology is based on the use of computer simulation solid modeling in the Altair EDEM software package, with the results processed through statistical analysis in the Statistica environment. During the course of the research, quantitative relationships were established between the wall slope angle and the output characteristics of pellet unloading. Regression analysis demonstrated the high predictive ability of the models, with a determination coefficient of $R^2 = 0,95$ for the flow rate and $R^2 = 0,93$ for the mass indicator. The results show that an angle of inclination of 40° provides the best performance, ensuring a productivity of up to 34,9 t/h with a loading time of 1 hour 26 minutes. Simulation of the outflow process revealed the presence of blockages in the bunker, which will lead to a decrease in productivity over time. Increasing the angle to 60°, a critical decrease in productivity of 43 % is observed. The practical significance of the research is confirmed by calculations demonstrating the possibility of reducing operating time by 35–45 % when using bunkers with angles of 40–50° compared to a design with a wall angle of 60°. The developed method allows for the optimization of process equipment parameters for enterprises in the woodworking industry without the need for creating full-scale samples. The obtained results can be used in the design of bulk material handling systems at industrial facilities.

Keywords: pellets, simulation modeling, discrete element method, bunker slope angle, statistical analysis

For citation: Tsubiks V. O., Dolmatov S. N., Tsubiks A. A. Simulation modeling of the process of bulk materials movement during bunker unloading // Forests of Russia and economy in them. 2026. № 1 (96). P. 169–186.

Введение

Современной тенденцией в области заготовки, переработки и утилизации природных ресурсов является ESG-повестка. Экологические, соци-

альные и управленческие критерии (ESG) трансформируются из добровольного элемента корпоративной ответственности в норму и стандарт производственной деятельности развитых стран.

Можно сказать, что практически произошел переход от модели потребления в виде добыть – произвести – утилизировать к экономике замкнутого цикла с интенсивным использованием вторичных древесных ресурсов, развитием технологий рециклинга и полной утилизацией отходов лесопиления и деревообработки (кора, опилки, щепа) для производства биотоплива, биохимикатов и композиционных материалов. Наибольшие объемы древесной продукции из щепы и опилок приходятся на производство древесного топлива, а именно топливных гранул (пеллет). Несмотря на негативные явления, связанные с санкционным давлением и ограничением поставок российских пеллет на рынки Европы (Долматов, Гуляева, 2024), технология переработки древесных отходов на пеллеты продолжает быть перспективной.

Рост производства топливных гранул соответствует требованиям постепенного перехода к экономике биовозобновляемых ресурсов, что становится особенно актуальным в условиях острого мирового энергетического кризиса в настоящее время. По имеющимся данным, объем производства и импорта пеллет и топливных брикетов в Европе в 2023 г. составил 22 млн т (Производство и торговля..., 2025). Высокий спрос на пеллеты в ЕС обусловлен сложившейся экономической целесообразностью замены ископаемых видов топлива. Промышленные масштабы производства пеллет требуют совершенствования технологического процесса, его оптимизации и уменьшения издержек. Это особенно важно из-за снижения маржинальности производства и поставок пеллет.

Любое производство, связанное с хранением и перемещением сыпучих древесных частиц (например, щепы, пеллет, опилок) содержит в своем составе бункеры различного вида и назначения. Бункеры могут быть как временного хранения с оперативной выгрузкой, так и серьезные конструкции емкостью до нескольких тысяч кубометров, рассчитанные, например, на обслуживание крупного пеллетного производства.

Проблема обеспечения устойчивого и контролируемого истечения сыпучих материалов из бункера при его разгрузке остается важной частью современного технологического процесса пере-

рабатывающего и энергетического производства. Ключевым параметром, определяющим эффективность разгрузки бункеров, является угол откоса стенок бункера, оптимальное значение которого должно обеспечивать истечение материала без образования заторов и сводов. Этот вопрос изучался рядом ученых в части исследования влияния угла откоса стенок бункера на истечение сыпучего материала (Effect of hopper..., 2019; Mendez et al., 2021; Сиваков, Гольнский, 2014; Лозовецкий и др., 2018). В работах проводились эксперименты, расчеты и моделирование малогабаритных бункерных устройств для определения поведения частиц, а также определялась склонность к сводообразованию при изменении угла откоса стенок бункера и его формы. Результаты обзора научной литературы подтверждают важность учета геометрических факторов при проектировании и выборе бункеров для оптимизации их работы и предотвращения нежелательных явлений. В существующих работах в качестве анализируемой сыпучей среды применялись материалы, значительно отличающиеся по физико-механическим свойствам от древесных гранул, что затрудняет полное понимание процесса и возможного результата и определяет необходимость проводить исследования в этой области.

Цель, объекты и методика исследований

Цель работы заключается в определении влияния конструктивных параметров технологического бункера на процесс выгрузки (истечения) сыпучих древесных частиц для оптимизации производительности технологического оборудования. В качестве анализируемой сыпучей среды приняты древесные пеллеты.

Цель исследования предусматривает решение следующих задач:

- 1) определить влияние угла откоса стенок технологического бункера на скорость истечения пеллет методом имитационного моделирования;
- 2) провести статистический анализ полученных данных с построением регрессионных моделей;
- 3) провести расчет производительности технологического бункера при изменении угла откоса стенок.

Объектом исследования является конструкция технологического бункера, который предназначен для хранения и отгрузки готовых древесных пеллет. Исследования основаны на применении программ имитационного моделирования, методов дискретных элементов и статистической обработки данных.

Результаты и их обсуждение

Технологические бункеры могут иметь различные размеры, форму (прямоугольную, пирамидальную, комбинированную, круглую, коническую, цилиндрическую и т. д.), материал и угол откоса стенок. Конструктивные особенности технологического бункера напрямую влияют на основные параметры движения сыпучей среды. Для определения влияния угла откоса технологического бункера на скорость истечения пеллет был использован САД пакет «Компас 3D v20» и САЕ пакет Altair EDEM. Компас 3D – это отечественная система автоматизированного проектирования (САПР), разработанная компанией «Аскон». Она предназначена для создания чертежей, доку-

ментации и двухмерного и трехмерного проектирования деталей, механизмов (Компас-3D..., 2017). Altair EDEM – это специализированное программное обеспечение для моделирования и анализа поведения сыпучих материалов и гранулированных сред с помощью метода дискретных элементов. Программное обеспечение предназначено для оптимизации конструкций и повышения эффективности производства в тяжелом машиностроении, горно-рудной, атомной, сельскохозяйственной отраслях. EDEM позволяет анализировать взаимодействие сыпучих материалов с различными механизмами и конструкциями, что помогает производителям оборудования значительно снизить затраты на создание реальных прототипов и повысить производительность и надежность разрабатываемых конструкций (Analysis of Performance..., 2024; Altair, 2025; Чендырев, Журавлев, 2022).

Для решения поставленных задач в «Компас 3D v20» производилось создание чертежа бункера прямоугольной формы с углами откоса стенок в 40° (рис. 1), 50° (рис. 2), 60° (рис. 3).

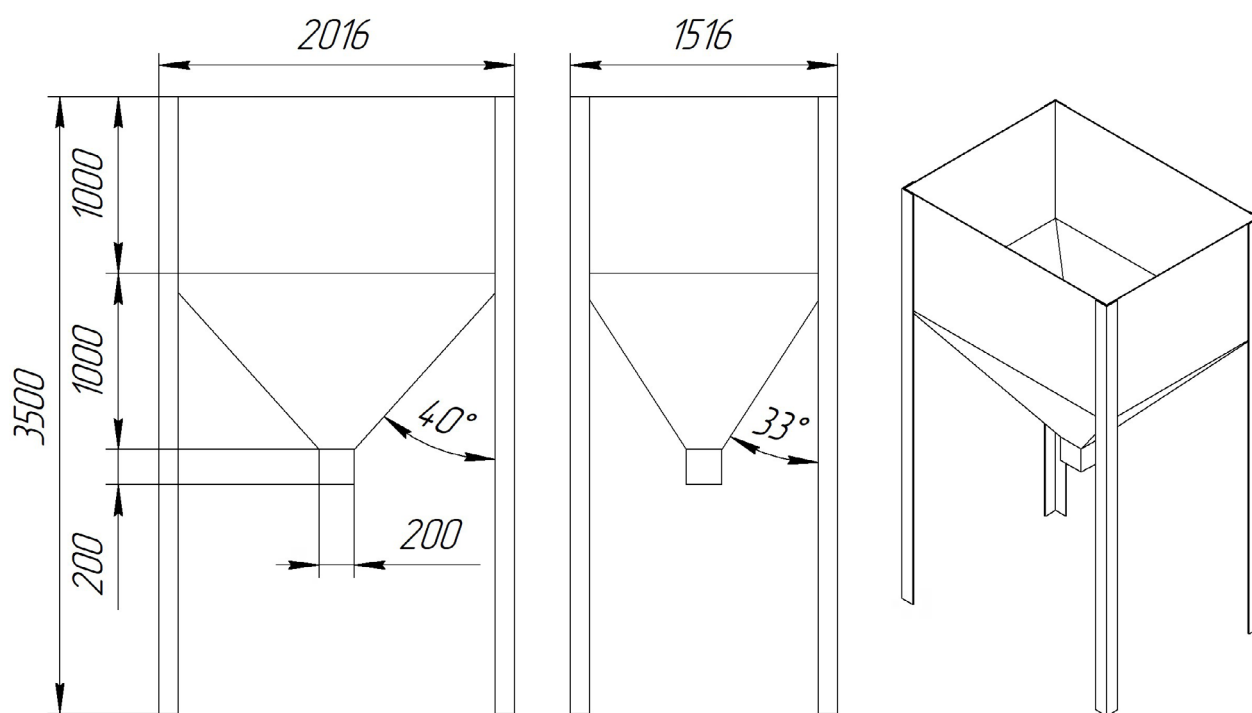


Рис. 1. Чертеж бункера с углом откоса 40°
Fig. 1. Drawing of a bunker with a slope angle of 40°

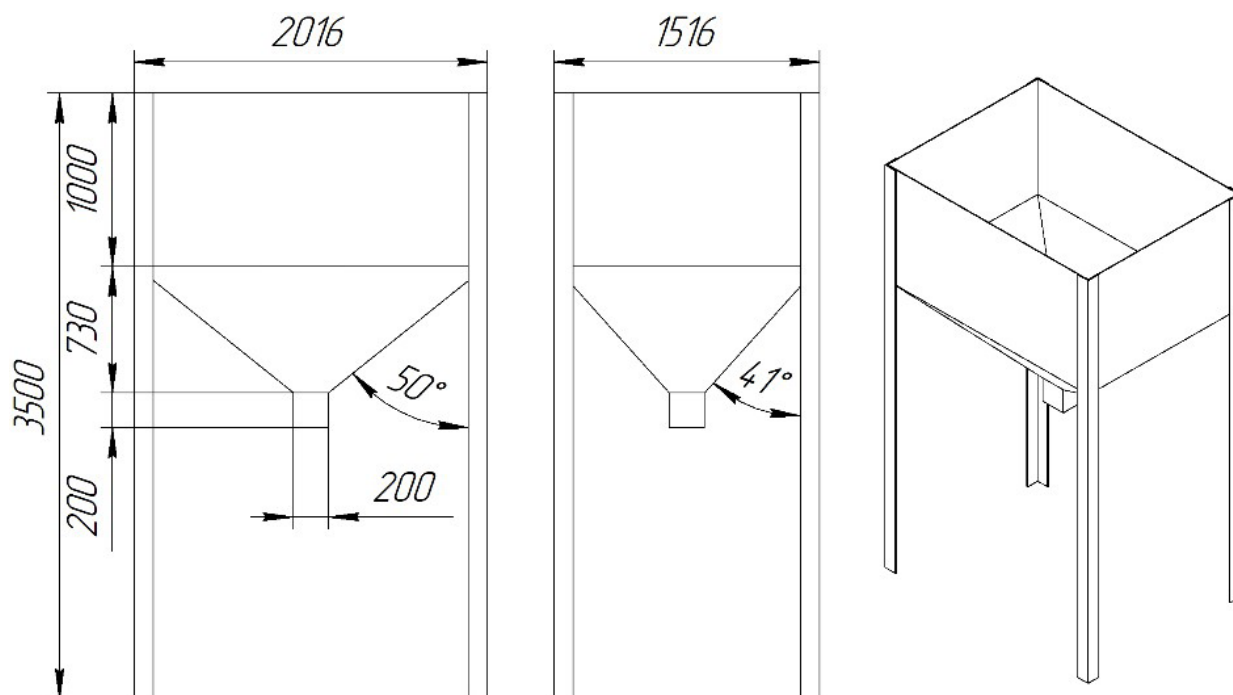


Рис. 2. Чертеж бункера с углом откоса 50°
 Fig. 2. Drawing of a bunker with a slope angle of 50°

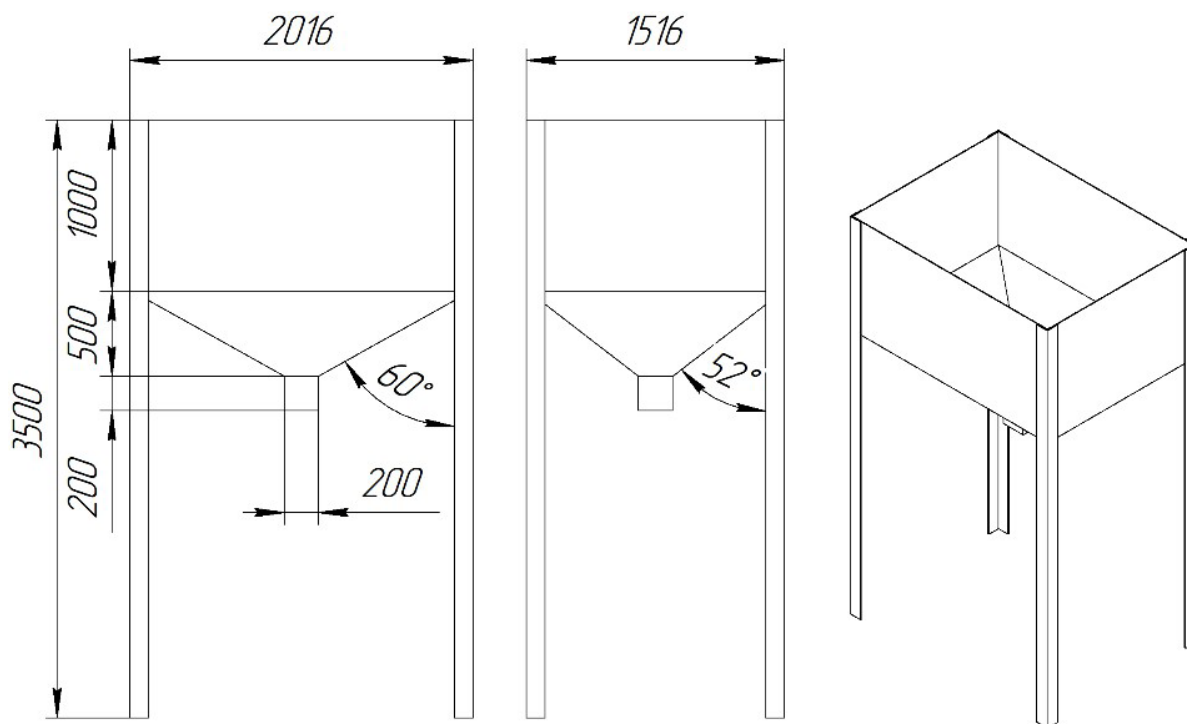


Рис. 3. Чертеж бункера с углом откоса 60°
 Fig. 3. Drawing of a bunker with a slope angle of 60°

По чертежам рис. 1–3 создавались трехмерные модели бункера в соответствии с геометрическими размерами (рис. 4). Модель сохранялась

в формате igs. Универсальный формат файла igs необходим для дальнейшей работы в программе Altair EDEM.

В программном обеспечении Altair EDEM создавался файл проекта. Далее в рабочем поле программы генерировался материал частиц, им присваивались свойства, необходимые для расчета в имитационном эксперименте при работе модели. В качестве сыпучего материала заданы древесные пеллеты, основные параметры которых: диаметр 6 мм, длина 30 мм, плотность 1300 кг/м³. Параметры подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 33103.1–2017.

Программа позволяет выбирать материал из библиотеки имеющихся, а также создавать свой материал, наделяя его заданными свойствами. На рис. 5 представлена библиотека частиц материала в Altair EDEM. Нами были заданы размеры и плотность пеллет, полученная частица представлена на рис. 6 (Цубикс, Соболева..., 2024).

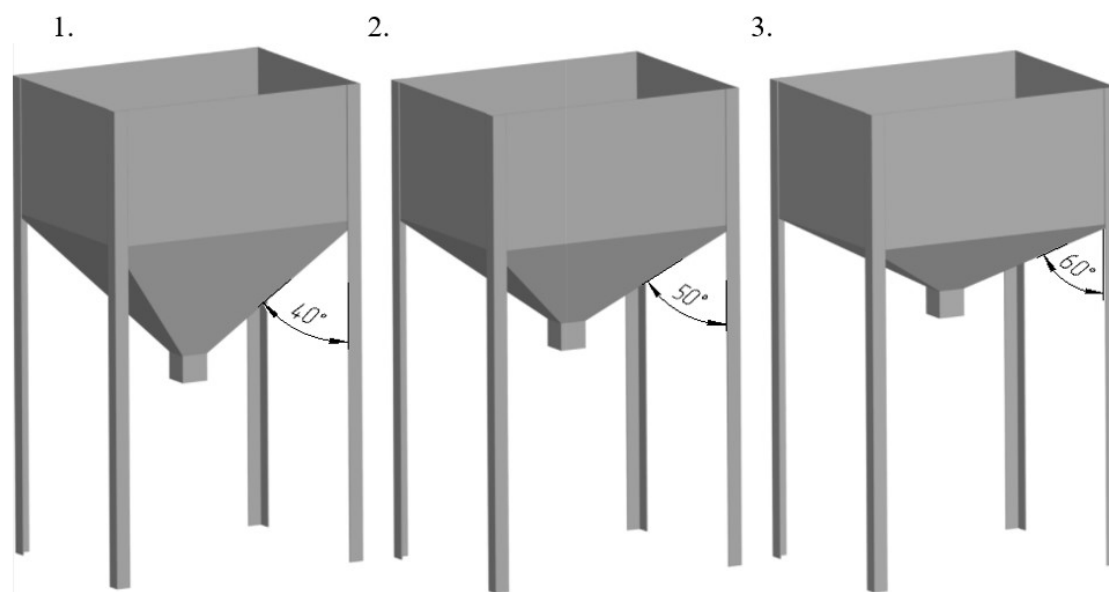


Рис. 4. Трехмерная модель бункера накопителя для пеллет:
 1 – угол откоса 40°; 2 – угол откоса 50°; 3 – угол откоса 60°
 Fig. 4. Three-dimensional model of a pellet storage bunker
 1 – slope angle of 40°; 2 – slope angle of 50°; 3 – slope angle of 60°

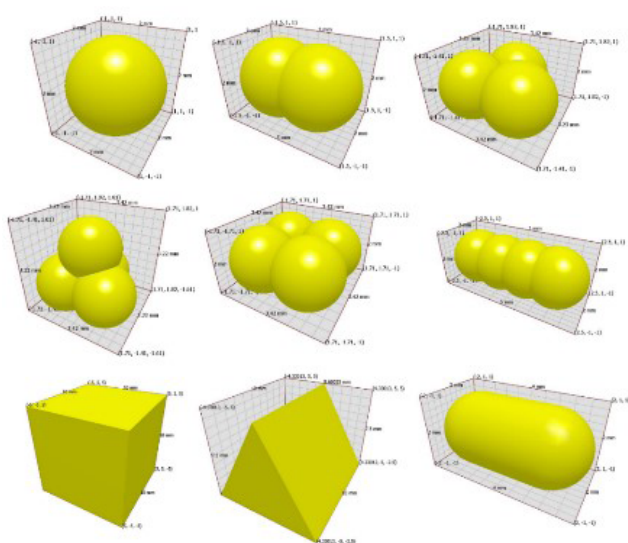


Рис. 5. Библиотека частиц материала в Altair EDEM
 Fig. 5. Material particle library in Altair EDEM

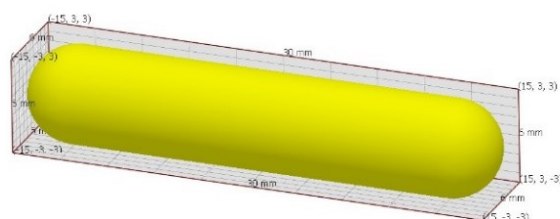


Рис. 6. Пример полученной частицы пеллеты в Altair EDEM
 Fig. 6. Example of a pellet particle obtained in Altair EDEM

После генерации частиц задается материал окружающей геометрии. Под геометрией подразумевается сам бункер, который в виде 3D-модели загружается в программу в формате *igs*. Стенкам бункера присваиваются параметры материала, из которого он изготовлен. Это сталь Ст3 с плотностью в 7850 кг/м^3 . Для подачи материала в бункер (добавление частиц) планируется окно в пространстве или место выхода пеллет – «фабрика», которая генерирует частицы. Внутри «фабрики» задаются параметры: скорость генерации частиц – 500 частиц в 1 с, общее количество частиц – 10 000, также был задан характер движения частиц – хаотичный. Программная среда Altair EDEM позволяет задавать не только хаотичный характер движения, но и подчиняющийся определенным законам, заложенным в модель.

Для расчета были выбраны физические параметры, которые нужно получить: масса (расход) пеллет, скорость движения пеллет и время. Для того чтобы условия работы бункера соответствовали реальным производственным, в качестве объекта, который наполняется пеллетами, принят мешок биг-бэг. Скорость будет фиксироваться в месте подачи пеллет (ферме), в бункере, в мешке биг-бэг. На рис. 7 представлен пример модели с цифровыми показателями технологического бункера, где 193,93 kg, 190,52 kg и 108,1 kg – это масса пеллет, выгруженных за 20 с (Цубикс и др., 2024; Increasing the efficiency..., 2025; Bembenek и др., 2022).

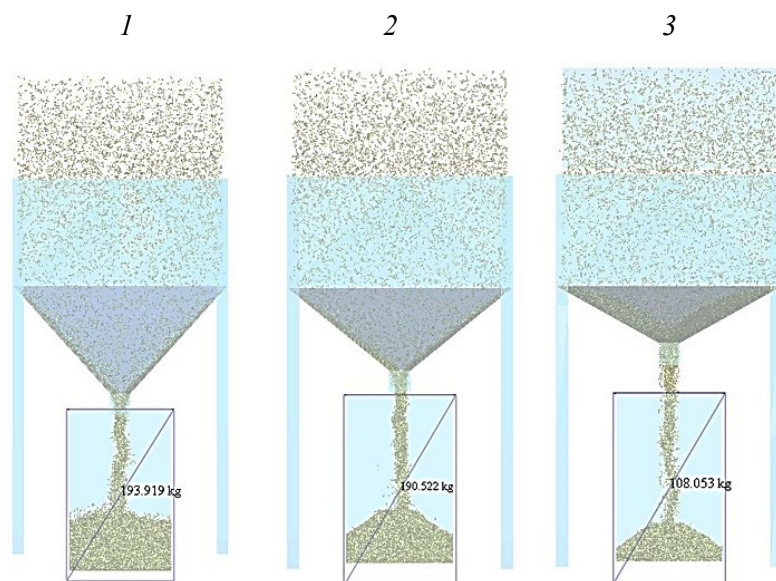


Рис. 7. Пример имитационных моделей в программе Altair EDEM:

1 – технологический бункер с углом откоса 40° ; 2 – технологический бункер с углом откоса 50° ;
3 – технологический бункер с углом откоса 60°

Fig. 7. Example of simulation models in the Altair EDEM program:

1 – technological bunker with an angle of 40° ; 2 – technological bunker with an angle of 50° ;
3 – technological bunker with an angle of 60°

Результаты работы имитационной модели технологического бункера с углом откоса стенок в 40° представлены на рис. 8, где показана зависимость скорости и массы загрузки от времени. На рисунке velocity – это скорость, м/с, а 39,38 kg, 90,68 kg и 193,92 kg – это масса за 5, 15 и 20 с.

Результаты работы имитационной модели технологического бункера с углом откоса стенок в 50° представлены на рис. 9. На рисунке velocity – это скорость, м/с, а 36,14 kg, 87,74 kg и 193,92 kg – это масса за 5, 15 и 20 с.

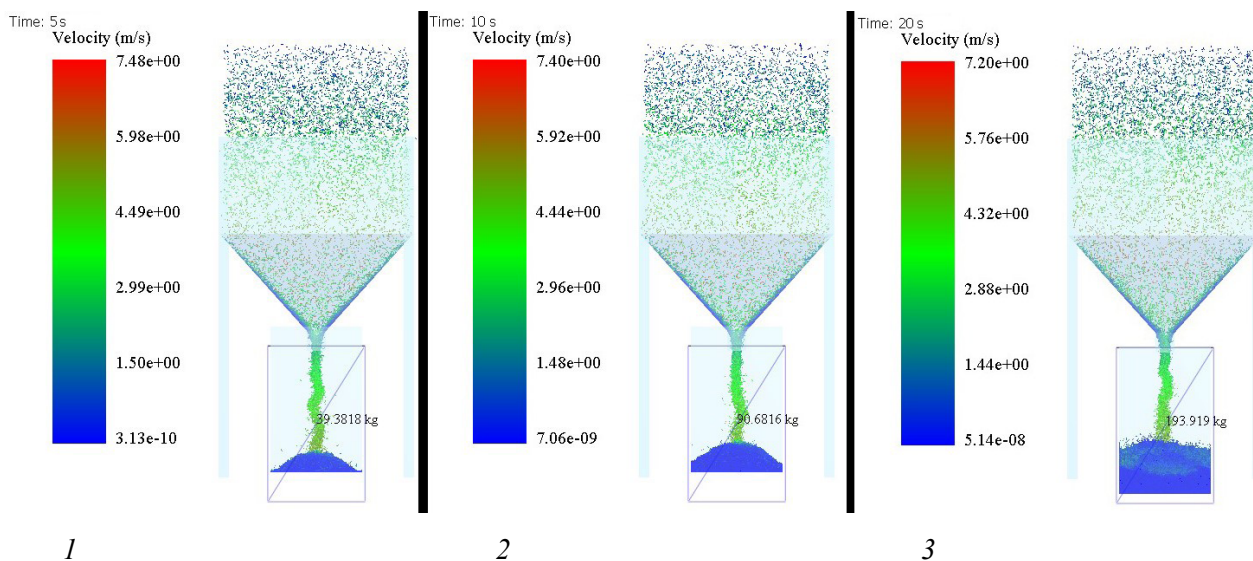


Рис. 8. Результат имитационной работы модели бункера с углом откоса 40° в Altair EDEM:
 1 – время 5 с; 2 – 10 с; 3 – 20 с
 Fig. 8. The result of the simulation of a bunker model with a slope angle of 40° in Altair EDEM:
 1 – time 5 s; 2 – 10 s; 3 – 20 s

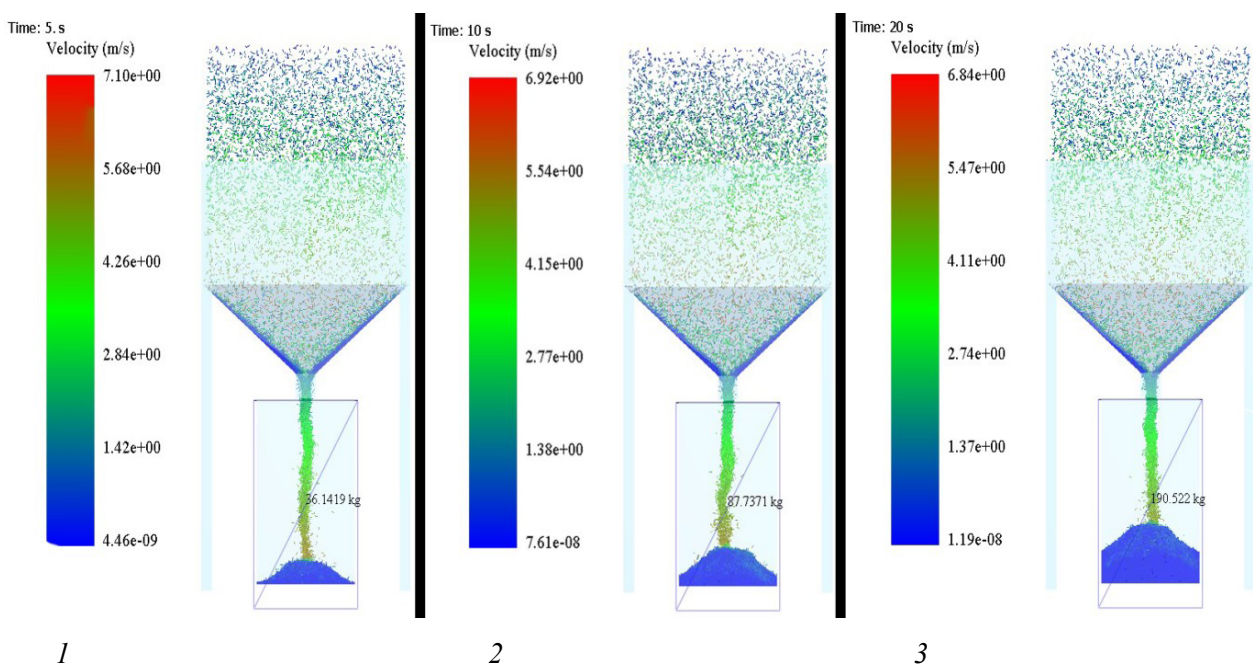


Рис. 9. Результат имитационной работы модели бункера с углом откоса 50° в Altair EDEM:
 1 – время 5 с; 2 – 10 с; 3 – 20 с
 Fig. 9. The result of the simulation of a bunker model with a slope angle of 50° in Altair EDEM:
 1 – time 5 s; 2 – 10 s; 3 – 20 s

Результаты работы имитационной модели технологического бункера с углом откоса стенок в 60° представлены на рис. 10. На рисунке velocity – это скорость, м/с, а 15,7 kg, 48,82 kg и 108,05 kg – это масса за 5, 15 и 20 с.

Результаты работы модели технологического бункера в зависимости от геометрических размеров в программном обеспечении Altair EDEM, а именно время, максимальная скорость и масса, представлены в табл. 1.

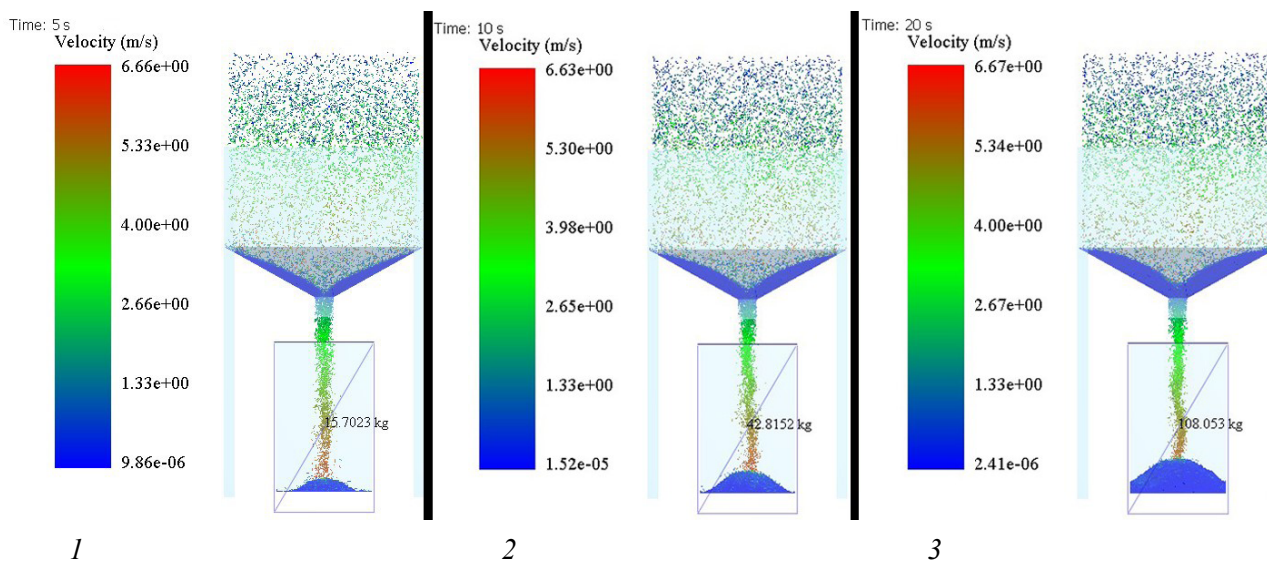


Рис. 10. Результат имитационной работы модели бункера с углом откоса 60° в Altair EDEM:
 1 – время 5 с; 2 – 10 с; 3 – 20 с
 Fig. 10. The result of the simulation of a bunker model with a slope angle of 60° in Altair EDEM:
 1 – time 5 s; 2 – 10 s; 3 – 20 s

Таблица 1
 Table 1

Результаты расчета программой Altair EDEM
 Altair EDEM calculation results

Номер модели Model number	Угол An gle,	Время, с Time, s	Максимальная скорость, м/с Maximum velocity, m/s	Масса, кг Weight, kg
1	40°	1	3,65	0,5
		5	0,37	38,8
		10	0,17	87,3
		15	0,13	135,7
		20	0,18	193,9
2	50°	1	3,81	9,5
		5	0,4	47,6
		10	0,19	95,3
		15	0,16	142,9
		20	0,07	190,5
3	60°	1	4,8	5,4
		10	0,24	54
		15	0,19	81
		20	0,12	108,1

Для выявления значимости факторов и уровня их влияния на показатели работы бункера используем статистические методы и регрессионный анализ полученных данных, определим значимость коэффициентов регрессии, приведенных в табл. 1.

Анализ проводился в программе Statistica. Это пакет, предназначенный для статического анализа, визуализации и моделирования данных (Ходыревская, 2020). Для проведения анализа были определены факторы и отклики и создана матрица

планирования полного факторного эксперимента, составленная в программе Statistica (табл. 2). В качестве отклика были приняты выходные данные модели, а именно: $Y1$ – скорость истечения пеллет

и $Y2$ – масса пеллет в биг-бэге. Факторами послужил $X1$ – угол откоса бункера; $X2$ – время истечения (Гржибовский и др., 2017).

Таблица 2
Table 2

Фрагмент журнала работы имитационной модели
A journal fragment of the simulation model's operation log

$X1$	$X2$	$Y1$	$Y2$
40°	5	7,48	39,3818
40°	10	7,40	90,6816
40°	20	7,20	193,9190
50°	5	7,10	36,1419
50°	10	6,92	87,7371
50°	20	6,84	190,5220
60°	5	6,66	15,7023
60°	10	6,63	42,8152
60°	20	6,67	108,0530

Для оценки зависимости откликов от факторов были проведены регрессионный анализ для скорости (рис. 11) и массы (рис. 12), проверка значимости коэффициентов регрессии для скорости (табл. 3) и для массы (табл. 4).

В общем виде полученная регрессия (для скорости выгрузки пеллет) будет иметь вид

$$C = 8,886667 - 0,035333x_1 - 0,011238x_2 + \varepsilon. \quad (1)$$

Проведенный регрессионный анализ демонстрирует высокую точность модели $R_2 = 0,953$. Стандартизованные коэффициенты регрессии ука-

зывают на большее влияние угла наклона ($\beta = -0,948$), чем временного параметра ($\beta = -0,230$). Отрицательные значения коэффициентов свидетельствуют об обратной зависимости: увеличение угла наклона и времени приводит к снижению скорости истечения. Полученные уравнения регрессии обладают высокой статистической надежностью ($p < 0,00011$), что подтверждает адекватность модели и позволяет рекомендовать ее для практического применения при проектировании технологических бункеров.

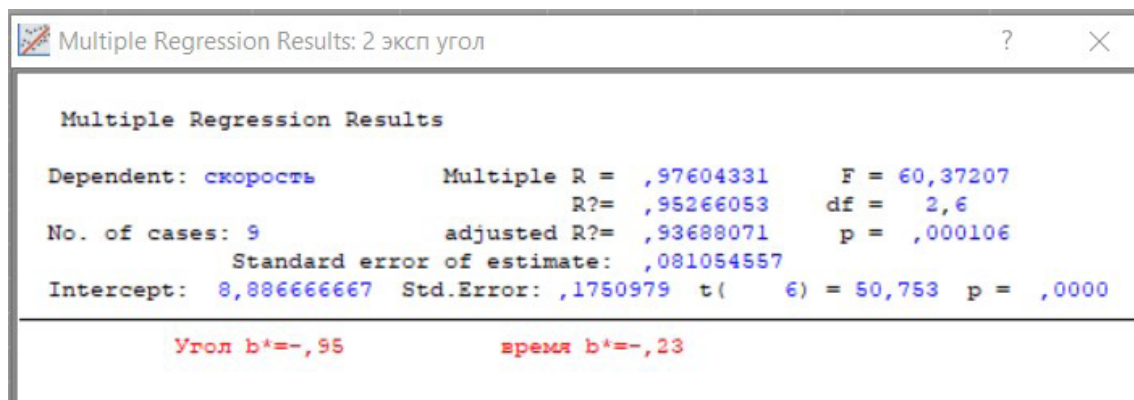


Рис. 11. Показатели регрессии для скорости
Fig. 11. Regression indicators for velocity

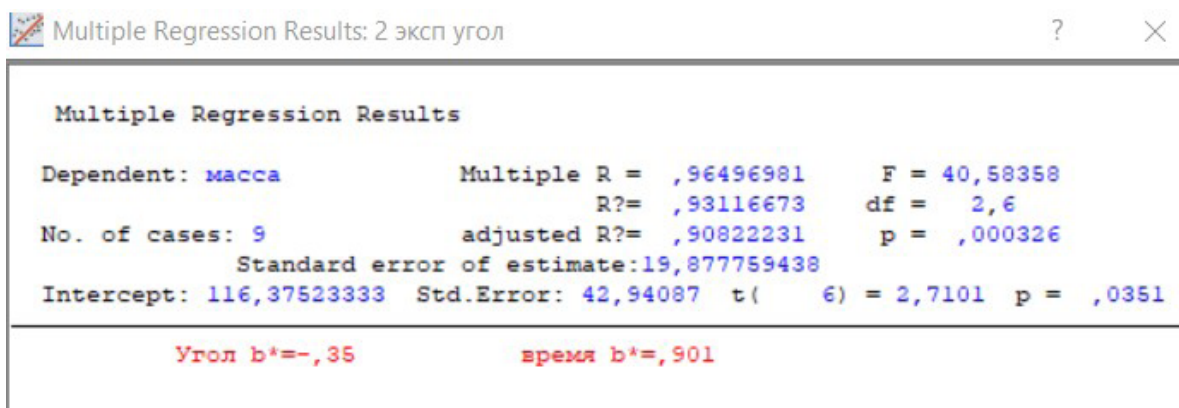


Рис. 12. Показатели регрессии для массы
Fig. 12. Regression indicators for mass

Таблица 3
Table 3

Проверка значимости коэффициентов регрессии для скорости
Checking the significance of regression coefficients for velocity

Параметр Parameter	Коэффициент β Coefficient β	Стандартная ошибка β Standard error β	Коэффициент регрессии Regression coefficient	Стандартная ошибка Standard error	t-критерий t-criterion	p-уровень p-level
Пересечение	–	–	8,887	0,175	50,75	<0,00001
Угол	-0,948	0,089	-0,035	0,003	-10,68	0,00004
Время	-0,230	0,089	-0,011	0,004	-2,59	0,04100

Таблица 4
Table 4

Проверка значимости коэффициентов регрессии для массы
Checking the significance of regression coefficients for mass velocity

Параметр Parameter	Коэффициент β Coefficient β	Стандартная ошибка β Standard error β	Коэффициент регрессии Regression coefficient	Стандартная ошибка Standard error	t-критерий t-criterion	p-уровень p-level
Пересечение	–	–	116,3752	42,94087	2,71013	0,035100
Угол	-0,346273	0,107108	-2,6235	0,81151	-3,23292	0,017845
Время	0,900701	0,107108	8,9349	1,06251	8,40924	0,000154

В общем виде полученная регрессия (для массы выгружаемых пеллет) будет иметь вид

$$C = 116,4 - 2,62x_1 - 8,9x_2 + \varepsilon. \quad (2)$$

Проведенный регрессионный анализ демонстрирует высокую точность модели $R_2 = 0,93$. Стандартизованные коэффициенты регрессии указывают на большее влияние временного пара-

метра ($\beta = -0,90$), чем угла наклона ($\beta = -0,346$). Отрицательное значение коэффициента угла наклона и положительное для времени свидетельствуют об обратной зависимости: увеличение угла наклона и времени приводит к повышению скорости истечения. Полученные уравнения регрессии обладают высокой статистической надежностью ($p < 0,035$), что подтверждает адекватность модели

и позволяет рекомендовать ее для практического применения при проектировании технологических бункеров.

Для проверки статистической значимости полученного уравнения регрессии был проведен дисперсионный анализ (табл. 5).

Таблица 5
Table 5

Дисперсионный анализ уравнения регрессии
Analysis of variance of the regression equation

Данные Data	SS	df	MS	F	p-value
Регрессия	0,793270	2	0,396635	60,37207	0,000106
Остаток	0,039419	6	0,006570	–	–
Итого	0,832689	–	–	–	–

Результаты дисперсного анализа показали, что *p*-value имеет значение меньше, чем 0,01 %. Это говорит о том, что модель статистически значимая и данные получены не случайно и имеют четкую взаимосвязь между собой. Для дополнительной проверки корректности полученных данных был построен нормальный вероятностный график остатков (рис. 13).

Анализ графика позволяет выявить незначительные отклонения между имитационной и регрессионной моделями. Как видно, остатки (точки) расположены близко к линии нормальной прямой, это говорит о нормальном распределении остатков. Наглядная демонстрация зависимости откликов от факторов представлена на рис. 14.

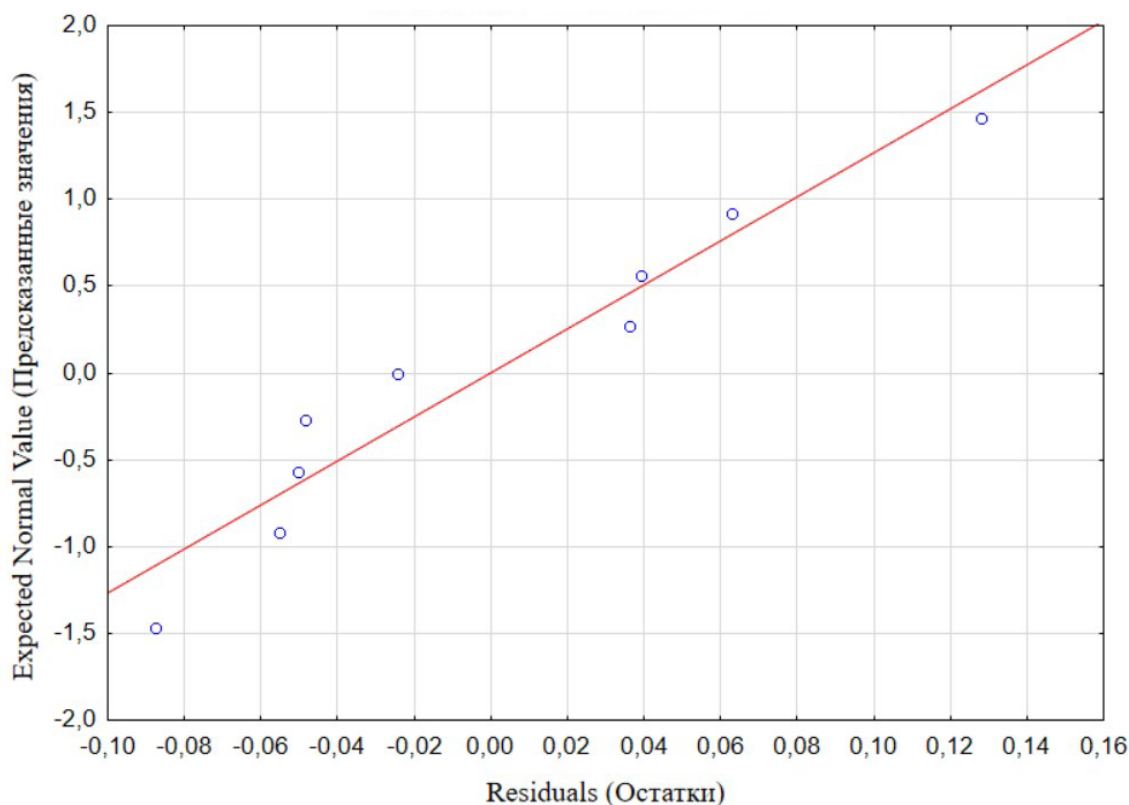
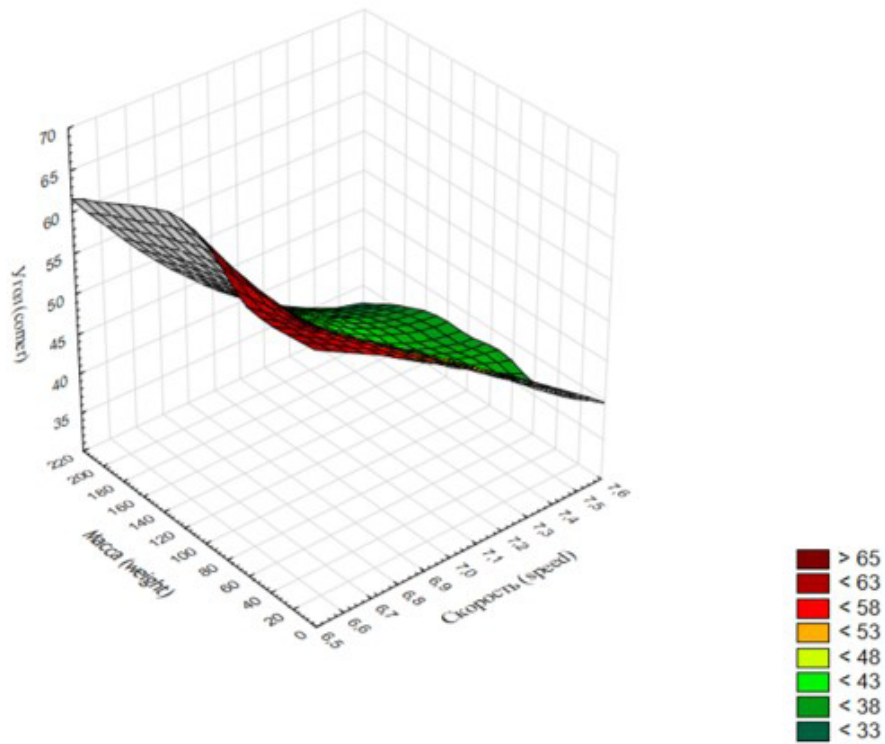


Рис. 13. Нормальный вероятностный график остатков
Fig. 13. Normal probability plot of residuals

1



2

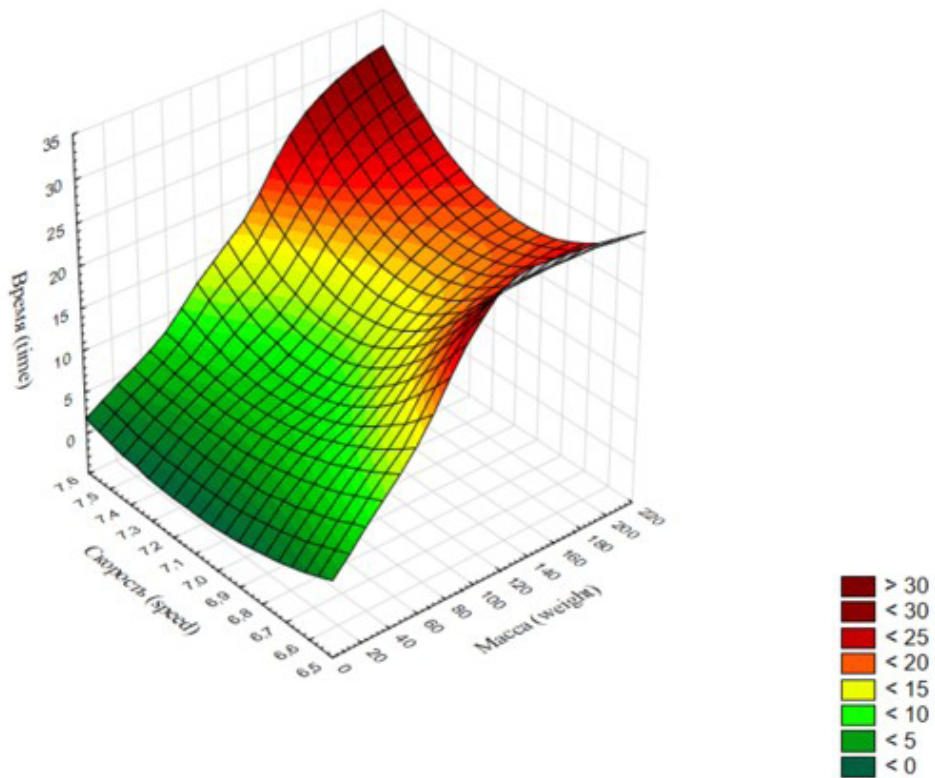


Рис. 14. Трехмерные графики зависимости отклика от факторов:
 1 – зависимость скорости, массы от угла откоса стенки; 2 – зависимость скорости, массы от времени
 Fig. 14. Three-dimensional graphs of the response dependence on factors:
 1 – dependence of velocity and mass on the slope angle of the wall; 2 – dependence of velocity and mass on time

Как видно из трехмерного графика (см. рис. 14), с увеличением угла откоса стенок бункера снижаются скорость и время истечения, а при увеличении времени работы модели масса и скорость растут.

В качестве примера проведем расчет влияния угла откоса на производительность технологического бункера, если суточная производительность предприятия составляет 50 т/сут, а режим работы предприятия – 3 смены по 8 ч. В табл. 6 представлены основные данные для расчета.

Таблица 6
Table 6

Углы откоса бункера и экспериментальные данные для расчета
Bunker slope angles and experimental data for calculation

Угол откоса, град Slope angle	Масса за 20 с, кг Mass in 20 seconds, kg	Скорость потока, м/с Flow rate, m/s
40	193,919	7,20
50	190,522	6,84
60	108,053	6,67

Производительность для бункера определяется по формуле

$$Q_{\text{бунк}} = \left(\frac{m}{20}\right) 3600, \quad (3)$$

где $Q_{\text{бунк}}$ – производительность, кг/ч;

m – масса за 20 с, кг, количество пеллет, кг, поступающих в мешок биг-бэг за 20 с экспериментального замера;

20 с – временной интервал эксперимента, в течение которого измерялась масса потока пеллет;

3600 с/ч – коэффициент перевода секунд в часы (поскольку в 1 ч 3600 с).

Производительность бункера с углом откоса 40° определяется по формуле (3):

$$Q_{\text{бунк}} = \frac{193,919}{20} 3600 = 34905,42 \text{ кг/ч} \approx 34,9 \text{ т/ч.}$$

Производительность бункера с углом откоса 50° определяется по формуле (3):

$$Q_{\text{бунк}} = \frac{190,522}{20} 3600 = 34293,96 \text{ кг/ч} \approx 34,3 \text{ т/ч.}$$

Производительность бункера с углом откоса 60° определяется по формуле (3):

$$Q_{\text{бунк}} = \frac{108,053}{20} 3600 = 19449,54 \text{ кг/ч} \approx 19,4 \text{ т/ч.}$$

Далее определим время, за которое через бункер пройдет 50 т пеллет, по формуле

$$t = \frac{m}{Q_{\text{бунк}}} \quad (4)$$

Время загрузки при угле откоса бункера в 40° определяется по формуле (4):

$$t = \frac{50000}{34905,42} \approx 1 \text{ ч } 26 \text{ мин.}$$

Время загрузки при угле откоса бункера в 50° определяется по формуле (4):

$$t = \frac{50000}{34293,96} \approx 1 \text{ ч } 28 \text{ мин.}$$

Время загрузки при угле откоса бункера в 60° определяется по формуле (4):

$$t = \frac{50000}{19449,54} \approx 2 \text{ ч } 34 \text{ мин.}$$

По данным расчета был составлен график зависимости производительности и времени прохождения пеллет через бункер с разными углами откоса (рис. 15).

Результаты расчета производительности показали, что при угле наклона стенок бункера в 50° производительность (34,3 т/ч) несколько ниже, чем при угле 40°. Но время прохождения составляет 1 ч 28 мин. При угле 60° производительность резко падает до 19,4 т/ч, а время загрузки возрастает до 2 ч 34 мин.

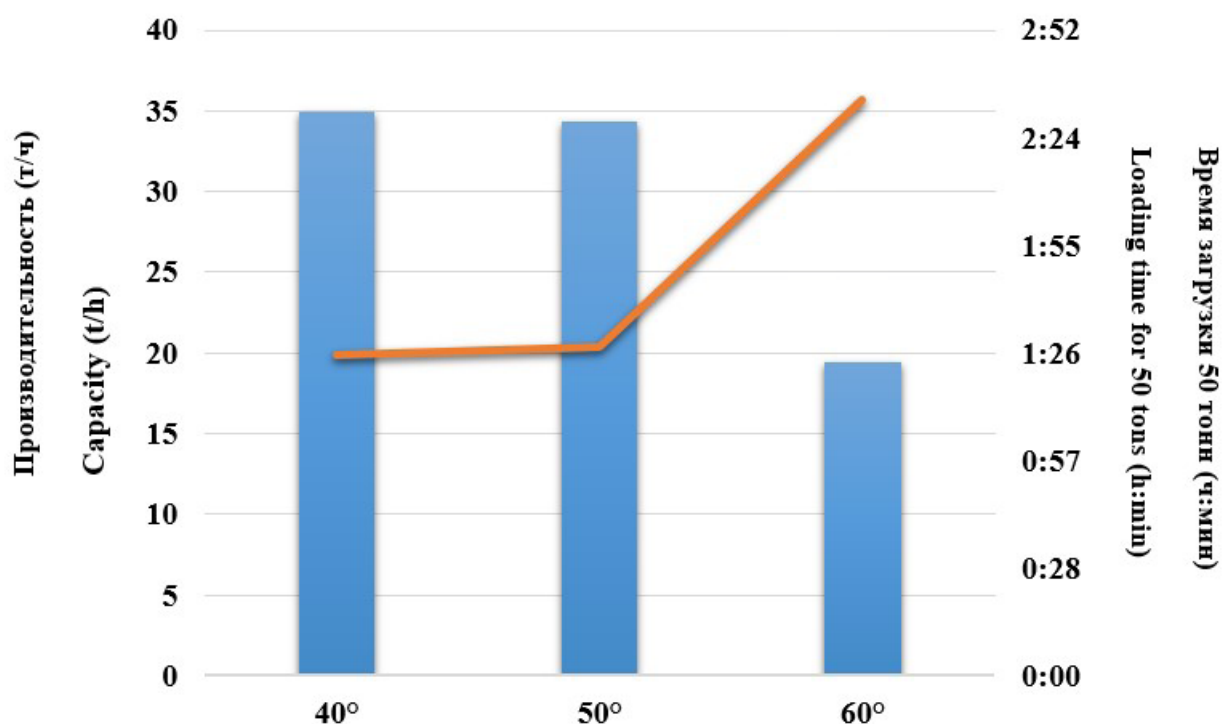


Рис.15. График зависимости производительности бункера от угла откоса
 Fig. 15. Graph of the bunker capacity dependence on the slope angle

Выводы

1. Проведенное имитационное моделирование процесса выгрузки пеллет из технологического бункера показало, что увеличение угла откоса стенок бункера приводит к снижению выходных показателей (скорости частиц и расхода в единицу времени). Обоснованной величиной угла откоса бункера является угол в 40 и 50°. Такие параметры позволяют обеспечить высокую скорость и массу выгружаемых частиц без образования сводов и заторов.

2. Статистический анализ полученных данных показал, что разработанная регрессионная модель имеет высокую точность $R_2 = 0,953$. Стандартизованные коэффициенты регрессии указывают на большее влияние угла наклона ($\beta = -0,948$), чем временного параметра ($\beta = -0,230$).

3. Расчет производительности технологического бункера является практической методикой, которая может использоваться на производстве. Определено, что наиболее эффективными для предприятия будет применять бункер с углами откоса в 40 и 50°, а угол в 60° ведет к снижению производительности.

4. Применение программ имитационного моделирования в совокупности с регрессионным анализом позволяет проводить инженерные расчеты без затрат на создание натуральных конструкций – прототипов. Работа имитационной модели позволяет визуализировать процессы работы технологического бункера. Применение программ способствует модернизации и оптимизации производственного процесса деревоперерабатывающего производства.

Список источников

ГОСТ 33103.1–2017. Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива : нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. : утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 января 2017 г. № 95-П : введен впервые : дата введения 2017-07-01. М. : Стандартинформ, 2017. 57 с.

- Гржибовский А. М., Иванов С. В., Горбатова М. А.* Описательная статистика с использованием пакетов статистических программ Statistica и SPSS // Наука и здравоохранение. 2017. № 1. С. 7–23.
- Долматов С. Н., Гуляева К. А.* Перспективы экспорта древесных пеллет из России в Японию и Южную Корею в условиях международных санкций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 447–453. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-447-448
- «Компас-3D» на примерах. СПб. : Наука и Техника, 2017. 272 с.
- Лозовецкий В. В., Шадрин А. А., Катков С. А.* Моделирование движения древесностружечных материалов в цилиндрических бункерах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 2 (362). С. 97–108. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.97
- Производство и торговля лесной продукцией // Производственная и сельскохозяйственная организация : [сайт]. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/FO> (дата обращения: 03.09.2025).
- Сиваков В. П., Голынский М. Ю.* Физическая сущность процесса образования и обрушения сводов технологической щепы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 132–138.
- Ходыревская С. В.* Программные статистические комплексы : учеб. пособие. Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. 163 с.
- Цубикс В. О., Долматов С. Н., Соболева А. А.* Обоснование размеров конструктивных элементов стокера путем имитационного моделирования механики движения сыпучих древесных частиц // Решетневские чтения : матер. XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : в 2 ч., Красноярск, 18–22 ноября 2024 года. Красноярск : Сиб. гос. ун-т науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2024. С. 633–637.
- Цубикс В. О., Соболева А. А.* Симуляция измельченного древесного сырья с помощью DEM // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Красноярск, 17 декабря 2024 года. Красноярск : Сиб. гос. ун-т науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, 2025. С. 284–287.
- Чендырев М. А., Журавлев А. Г.* Рационализация геометрических параметров приемных бункеров конусных дробилок крупного дробления при автомобильном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. 2022. № 5-1. С. 158–170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158
- Altair : [официальный сайт]. США. URL: <https://altair.com/> (дата обращения: 10.09.2025).
- Analysis of Performance Indicators of Disc Ripper Blades Using CAD, CAE Engineering Methods / *S. Dolmatov, A. Soboleva, M. Kalimullin* [et al.] // III International Conference «Sustainable Development : Agriculture, Energy and Ecology» (VMAEE-III-2024) : AIP Conference Proceedings, Karshi, 26–28 february 2024. Melville : AIP PUBLISHING, 2024. Vol. 3184. P. 20032. DOI: 10.1063/5.0212201
- Bembenek M., Buczak M., Baiul K.* Modelling of the Fine-Grained Materials Briquetting Process in a Roller Press with the Discrete Element Method // Materials. 2022. № 15. DOI: 10.3390/ma15144901
- Effect of hopper angle on granular clogging // *D. Lopez-Rodríguez, D. Gella, T. Kiwing* [et al.] // Physical Review E. 2019. № 99. DOI: 10.1103/PhysRevE.99.032901
- Increasing the efficiency of the granulation process of crushed wood based on CAE simulation technologies // *V. Tsubiks, S. Dolmatov, V. Malikov* [et al.] // E3S Web of Conferences. 2025. DOI: 10.1051/e3sconf/202562705020
- Mendez D., Hidalgo R., Maza D.* The role of the hopper angle in silos: experimental and CFD analysis // Granular Matter. 2021. P. 23–34. DOI: 10.1007/s10035-021-01094-6

References

- Altair : [official website]. USA. URL: <https://altair.com/> (accessed 10.09.2025).
- Analysis of Performance Indicators of Disc Ripper Blades Using CAD, CAE Engineering Methods / *S. Dolmatov, A. Soboleva, M. Kalimullin* [et al.] // III International Conference «Sustainable Development : Agriculture, Energy and Ecology» (VMAEE-III-2024) : AIP Conference Proceedings, Karshi, 26–28 february 2024. Melville : AIP PUBLISHING, 2024. Vol. 3184. P. 20032. DOI: 10.1063/5.0212201
- Bembenek M., Buczak M., Baiul K.* Modelling of the Fine-Grained Materials Briquetting Process in a Roller Press with the Discrete Element Method // *Materials*. 2022. № 15. DOI: 10.3390/ma15144901
- Chendyrev M. A., Zhuravlev A. G.* Rationalization of geometric parameters of receiving bunkers of cone crushers of large crushing in automobile transport // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022. № 5-1. P. 158–170. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_158 (In Russ.)
- Compass-3D with examples. St. Petersburg : Science and Technology, 2017. 272 p.
- Dolmatov S. N., Gulyaeva K. A.* Prospects of export of wood pellets from Russia to Japan and South Korea in the context of international sanctions // *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024. № 9. P. 447–453. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-447-448 (In Russ.)
- Effect of hopper angle on granular clogging // *D. Lopez-Rodríguez, D. Gella, T. Kiwing* [et al.] // *Physical Review E*. 2019. № 99. DOI: 10.1103/PhysRevE.99.032901
- GOST 33103.1–2017. Biofuels are solid. Technical characteristics and fuel classes: national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated January 30, 2017 № 95-P : introduced for the first time: date of introduction 2017-07-01 / FSUE VNII SMT. Moscow : Standartinform, 2017. 57 p.
- Grzybowski A. M., Ivanov S. V., Gorbatova M. A.* Descriptive statistics using statistical software packages Statistica and SPSS // *Science and healthcare*. 2017. № 1. P. 7–23. (In Russ.)
- Increasing the efficiency of the granulation process of crushed wood based on CAE simulation technologies // *V. Tsubiks, S. Dolmatov, V. Malikov* [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2025. DOI: 10.1051/e3sconf/202562705020
- Khodyrevskaya S. V.* Software statistical complexes : a textbook. Kursk : South-Western State University, 2020. 163 p.
- Lozovetskiy V. V., Shadrin A. A., Katkov S. A.* Modeling the motion of particle board materials in cylindrical conical bunkers // *Bulletin of Higher Educational Institutions. Forest Journal*. 2018. № 2 (362). P. 97–108. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.97 (In Russ.)
- Mendez D., Hidalgo R., Maza D.* The role of the hopper angle in silos: experimental and CFD analysis // *Granular Matter*. 2021. P. 23–34. DOI: 10.1007/s10035-021-01094-6
- Production and trade of forest products // *Food and agricultural organization* : [website]. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/FO> (accessed 03.09.2025).
- Sivakov V. P., Golynsky M. Yu.* The physical essence of the formation process and the collapse of the arches of technological chips // *Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry Journal*. 2014. № 3 (339). P. 132–138. (In Russ.)
- Tsubiks V. O., Dolmatov S. N., Soboleva A. A.* Substantiation of the dimensions of stoker structural elements by simulating the mechanics of movement of loose wood particles // *Reshetnev Readings : Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician Mikhail Fedorovich Reshetnev, General Designer of Rocket and Space Systems* : in 2 parts, Krasnoyarsk, November 18–22, 2024. Krasnoyarsk : Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, 2024. P. 633–637. (In Russ.)

Tsubiks V. O., Soboleva A. A. Simulation of crushed wood raw materials using DEM // Technologies and equipment of gardening and landscape construction : collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, December 17, 2024. Krasnoarsk : Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, 2025. P. 284–287. (In Russ.)

Информация об авторах

V. O. Tsubiks – аспирант;

S. N. Dolmatov – кандидат технических наук, доцент;

A. A. Tsubiks – магистрант.

Information about the authors

V. O. Tsubiks – postgraduate student;

S. N. Dolmatov – Candidate of Technical Sciences, associate Professor;

A. A. Tsubiks – master’s degree

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 22.10.2025; accepted for publication 01.12.2025.
