УДК 630.812: 621.928 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-91-99

Практическое исследование движения древесного сыпучего сырья в естественных условиях и с помощью вибрационного воздействия

В.О. Цубикс[a], С.Н. Долматов[b]

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия
[a] vladtsubix@yandex.ru, [b]pipinaskus@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0008-8912-8006, [b] https://orcid.org/0000-0002-9297-3699.
Статья поступила 17.08.2026, принята 14.09.2026.

В статье рассматривается характер движения измельчённого древесного сырья с помощью серии однофакторных и двухфакторных практических экспериментов. В процессе деревопереработки на производственных линиях активно используются различные бункера длительного и кратковременного хранения. Как правило, технологические бункера хранят в себе измельчённое сырьё с различными геометрическими характеристиками и свойствами. Сыпучее сырьё склонно к сводообразованию, что в контексте бункерного хранения внутри производственных линий негативно сказывается на производительности всей системы. Сутью практических экспериментов является выявление параметров угла наклона стенки бункера или лотка с вибрационным воздействием на них с целью минимизации сводообразования сыпучего сырья в бункерах. Для каждого вида измельчённого сырья выявлены значения для стабильного движения по металлической поверхности стенки бункера. В ходе эксперимента установлено, что рациональным значением частоты вибрации является 40–50 Гц при наклоне стенки 10–20°, а для естественного движения без вибрационного воздействия 25–35°. Установлено, что частицы большего размера, такие как щепа, кора, стружка, эффективно гасят вибрационное воздействие за счёт пустот в своём объёме, в то время как более мелкое сырьё, такое как опилки или аспирационная пыль, наоборот, передаёт колебание между частицами более эффективно, это отслеживается по характеру движения самих частиц на вибрационном стенде. Сформирована экспериментальная база данных, предназначенная для последующей верификации цифровой имитационной модели движения измельчённого древесного сырья, что позволит повысить достоверность моделирования процессов хранения и транспортирования сыпучих материалов и использовать полученные результаты при проектировании и совершенствовании бункерного оборудования деревообрабатывающих предприятий.

Ключевые слова: измельчённая древесина; угол истечения; вибратор; угол естественного откоса; бункерное хранение; сводообразование.

A practical study of the movement of bulk wood raw material under natural conditions and with vibrational action

V.O. Tsubiks[a], S.N. Dolmatov[b]

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia
[a] vladtsubix@yandex.ru, [b]pipinaskus@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0008-8912-8006, [b] https://orcid.org/0000-0002-9297-3699.
Received 17.08.2026, accepted 14.09.2026.

The article examines the nature of the movement of shredded wood raw material by means of a series of single-factor and two-factor practical experiments. In the process of wood processing on production lines, various bins for long-term and short-term storage are actively used. As a rule, process bins store shredded raw material with various geometric characteristics and properties. Bulk raw material is prone to arching (bridging), which, in the context of bin storage within production lines, negatively affects the productivity of the entire system. The essence of the practical experiments is to identify the parameters of the inclination angle of the bin wall or chute with vibrational action on them in order to minimize arching of bulk raw material in bins. For each type of shredded raw material, values are identified for stable movement along the metal surface of the bin wall. During the experiment, it is established that the rational value of vibration frequency is 40–50 Hz with a wall inclination of 10–20°, while for natural movement without vibrational action it is 25–35°. It is established that larger particles, such as chips, bark, and shavings, effectively damp the vibrational action owing to voids in their volume, whereas finer raw material, such as sawdust or aspiration dust, on the contrary, transmits oscillation between particles more effectively; this is traced by the nature of the movement of the particles themselves on the vibration test stand. An experimental database has been formed, intended for the subsequent verification of a digital simulation model of the movement of shredded wood raw material, which will make it possible to increase the reliability of modeling the processes of storage and transportation of bulk materials and to use the obtained results in the design and improvement of bin equipment at woodworking enterprises.

Keywords: shredded wood; discharge angle; vibrator; angle of repose; bin storage; arching (bridging).

Введение. Лесоперерабатывающая промышленность работает с различным оборудованием, которое комбинируется в технологические линии для производства готовой продукции. Классические технологии переработки древесины предусматривают выработку как полуфабрикатов, так и готовой продукции в виде сыпучих материалов, перемещаемых и отгружаемых в измельчённом виде [1]. Идея безотходного производства требует внедрения нового оборудования и глубокого анализа свойств измельчённой древесины. В контексте непрерывного производства это является серьёзной задачей для научного сообщества, поскольку зачастую технологические линии работают в непрерывном цикле, и выход из строя одной составляющей линии способствует её полному простою, экономически это может вызвать весьма негативные последствия. Одной из задач для обеспечения бесперебойной работы технологических линий является сбалансированный и обоснованный процесс перемещения и хранения измельчённого древесного сырья по цепочке [2]. Под перемещением подразумевается движение сырья по направляющим и лоткам, ленточным, шнековым конвейерам, подача пневмотранспортом, загрузка и выгрузка из технологических бункеров. Под хранением имеется в виду длительное хранение в силосах или в промежуточных бункерах. Особенностью бункерного хранения является сводообразование внутри ёмкости, за счёт физических процессов, протекающих в древесной массе [3, 4]. Например, длительное хранение способствует уплотнению сырья, из-за чего в теле конического бункера формируются мосты, препятствующие дальнейшему истечению. Либо высокая адгезия материала за счёт его влажности, которая приводит к налипанию на стенки. Проблема движения сыпучих материалов является межотраслевой, поскольку подобные способы хранения и перемещения сырья используются в сельском хозяйстве, горнодобывающей промышленности, химической промышленности, пищевой и т. д [5, 6, 7].

Физика поведения сыпучих древесных материалов требует глубокого анализа, поскольку сыпучую массу нельзя считать ни полностью твёрдой, ни жидкой. Движение всей массы определяется строго взаимодействием отдельных частиц, чьи параметры могут быть неоднородны [8]. На движение может влиять форма, например, геометрические параметры древесных пеллет являются стандартизированными, и форма геометрии весьма понятна, тогда как форма щепы, стружки, древесной дроблёнки весьма неоднородна. Также следует учитывать такие параметры, как шероховатость, влажность, коэффициент трения, насыпную плотность, гранулометрический состав и т. д. Даже небольшие изменения свойств материала могут существенно изменить характер истечения сырья из бункера [9].

Наиболее опасным явлением считается сводообразование, при котором над выпускным отверстием бункеров образуется устойчивая арочная структура, препятствующая дальнейшему движению сырья. Образование подобных мостов связано с совокупностью факторов физико-механических свойств материала, а также геометрических параметров самой ёмкости бункера. В ряде случаев обрушения сводов происходит самостоятельно, но зачастую необходимо вмешательство специалистов для ручной расчистки затора, либо применение дополнительных инструментов, таких как вибраторы. Также проблемой бункерного хранения является образование канала истечения, при котором движется только центральная часть массы, при заторе на стенках ёмкости. Это может привести к неравномерному расходу сырья, дополнительному времени пребывания в бункере, что поспособствует снижению качества. Также сложности может вызвать сегрегация частиц, обусловленная различием их размеров, формы и плотности, что приводит к неоднородности материала, поступающего на последующие стадии производства.

Значительное количество исследований посвящено проблемам хранения и транспортирования сыпучих материалов**,** исследуются как фундаментальные закономерности движения дисперсных сред, так и прикладные вопросы проектирования технологического оборудования [10]. При проектировании учитываются особенности угла наклона стенок бункера, форма выпускного отверстия, его размеры и расположение, а также определяются силы трения между материалом и конструкцией [11]. Отдельно изучается вопрос интенсификации истечения сыпучих материалов, с помощью различных инструментов и устройств, таких как вибрационные устройства, механические разрушители сводов, пневматические системы аэрации, а также их комбинированное применение. Разработка универсального способа борьбы со сводообразованием затрудняется разнообразием физико-механических свойств перерабатываемого материала [12, 13].

В настоящее время широкое распространение получили цифровые программы, позволяющие построить имитационные модели для изучения и анализа поведения сыпучих сред. Одним из методов имитационного моделирования является метод дискретных элементов, с помощью которого можно изучать характер движения отдельных частиц и их взаимодействия с другими отдельными частицами с учётом физико-механических свойств сыпучей среды [14, 15, 16]. Для качественного программного эксперимента необходима калибровка модели с помощью данных, полученных с помощью натурных испытаний. Валидация модели позволит расширить возможности исследований, их скорость без потери качества.

Наиболее подробно в научной литературе описано поведение классических однородных дисперсных материалов, таких как песок, цемент, зерновые культуры, минеральный порошок и т. д. Древесное измельчённое сырьё на фоне классических дисперсных материалов менее изучено, поскольку частицы характеризуются неправильной формой, высокой шероховатостью, выраженной волокнистой структурой, широким диапазоном размеров и низкой насыпной плотностью, вследствие чего закономерности их движения существенно отличаются от поведения традиционных сыпучих материалов. Универсальные режимы работы оборудования для хранения и транспортировки материала из различных отраслей не могут быть напрямую применены в практических задачах лесной промышленности. Поэтому определение рациональных сочетаний угла наклона поверхности и параметров вибрации для различных видов из-

мельчённого древесного сырья представляет собой актуальную научно-практическую задачу с заделом на валидацию имитационной модели для комплексного исследования дисперсной древесной среды.

Целью исследования является исследование движения древесного сыпучего сырья в естественных условиях и с помощью вибрационного воздействия.

Для достижения цели исследования предстоит решить следующие задачи:

1. Разработать экспериментальный стенд, который включает в себя лоток с установленным на нём вибратором, с возможностью регулировки частоты вибрации.
2. Определить фактический угол естественного откоса сырья с помощью специальной ёмкости с прозрачной стенкой.
3. Провести серию практических экспериментов, в которых будут определён характер движения сыпучего древесного сырья в условиях изменения угла наклона лотка и вибрационного воздействия.

Объект, предмет и методы исследования. Объект исследования – процесс движения измельчённого древесного сырья по металлической поверхности при различных углах наклона и вибрационном воздействии. Предмет исследования – влияние угла наклона поверхности и параметров вибрационного воздействия на характер движения различных видов измельчённого древесного сырья. Методы исследования – лабораторный эксперимент, измерение времени истечения и массы остатка материала, сравнительный анализ полученных экспериментальных данных.

Результаты и обсуждение. Работа основана на практической серии экспериментов, выполненных с помощью экспериментального стенда спроектированного с помощью прикладного пакета «Компас 3Д» и изготовленного с применением технологии лазерной резки, листовой гибки металла, а также сварки. Сам стенд из металлического лотка, установленного на станине с возможностью регулировки угла наклона от 0° до 45° (рис. 1).

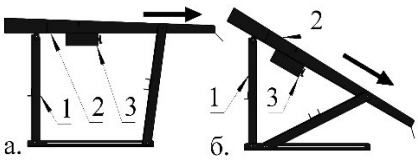

Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – станина, 2 – лоток, 3 – вибратор; *а* – горизонтальное положение, *б* – положение под углом

Сама станина жёстко зафиксирована на специализированной площадке. Вибратор жёстко закреплен с тыльной стороны лотка и подключён к источнику питания через частотный преобразователь, с возможностью изменения частоты от 0 Гц до 50 Гц. Внутри лотка имеются две полости, разделённые заслонкой, в первую полость помещается сырьё, после открытия заслонки сырьё проходит путь, равный 650 мм.

Исследуемое сырье было предоставлено деревообрабатывающей компанией ООО «ДОК Енисей», расположенной в Красноярском крае, пгт. Березовка. На предприятии были взяты практически все виды имеющихся сыпучих древесных материалов, встречающихся в технологическом процессе в виде сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов. Всего было исследовано 8 видов сыпучего сырья, полученных в промышленных условиях, а именно: кора, технологическая щепа, топливная щепа, игольчатая щепа (дробленка после молотковой мельницы), стружка, опилки, аспирационная пыль и топливные пеллеты в виде готового продукта (рис. 2).

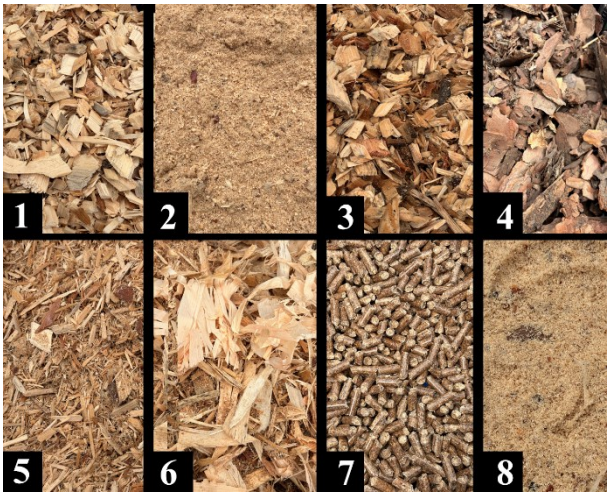

Рис. 2. Измельченная древесина и топливные пеллеты: 1 – щепа технологическая, 2 – аспирационная пыль, 3 – щепа топливная, 4 – кора, 5 – щепа игольчатая, 6 – стружка, 7 – пеллеты, 8 – опилки

Для каждого вида сырья опытным путём был определён угол естественного откоса и насыпная плотность. Данные занесены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сырья

Вид сырья	**Угол естественного откоса, °**	**Измеренная насыпная плотность, кг/ м^3**
Пеллеты	27	672
Щепа топливная	39	255
Щепа технологическая	73,25	140
Щепа игольчатая	85	194
Опилки	38	212
Аспирационная Пыль	51	168
Кора	73	187
Стружка	51	133

Для определения естественного угла откоса была собрана ёмкость с прозрачной стенкой (рис. 3). После засыпки сырья перегородка вытягивалась из ёмкости, обеспечивая естественное движение, после с помощью электронного прибора – угломера фиксировались значения угла, для усреднения значений прибор устанавливался на плоскую металлическую пластину. Современные способы определения насыпной плотности отражены в работе [17].

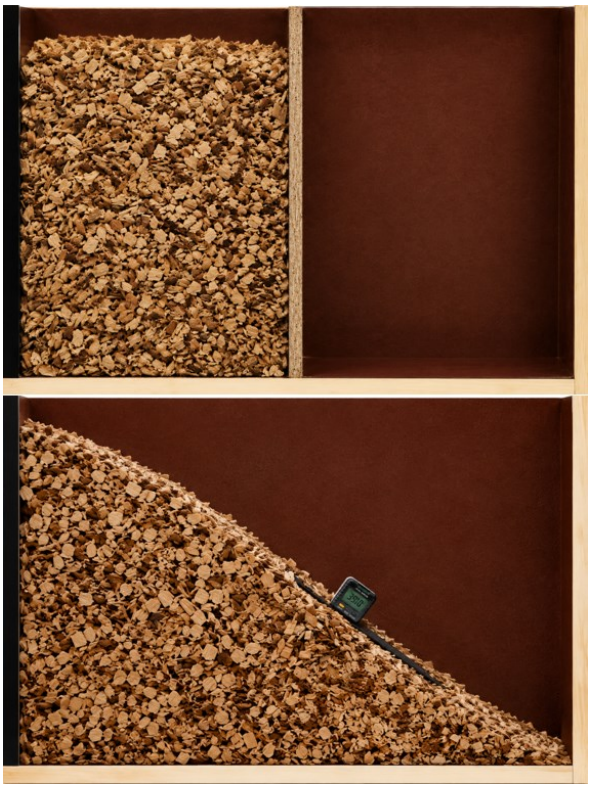

Рис. 3. Ёмкость для определения угла естественного откоса

Насыпная плотность измерялась в таре с геометрическими размерами полости 310×235×165 мм. После заполнения тары определялся фактический объём, занимаемый сырьём, далее проводилось взвешивание и расчёт показателя насыпной плотности.

На первом этапе проводился однофакторный эксперимент, определялась зависимость скорости истечения сыпучих древесных частиц от угла наклона поверхности к уровню горизонта. Сырьё проходило по лотку естественным путём без включения вибратора. Угол наклона лотка менялся от 10° до 45° с шагом в 5°, минимальный шаг позволил определить минимальный угол, при котором сырьё начинало движение. Для каждой сыпучей массы было проведено по 5 опытов при одинаковом значении угла, в сумме для естественного истечения всего 320 наблюдений. Каждое полученное значение фиксировалось в лабораторном журнале.

Наблюдение показало, что характер движения измельчённого сырья определяется углом наклона поверхности, а также геометрическими характеристиками частиц. Логично, что с увеличением угла наклона поверхности движение частиц происходит интенсивнее. Но критический угол начала устойчивого движения существенно различается в зависимости от вида сырья. Наибольшей сыпучестью обладают древесные пеллеты, для которых устойчивое истечение начинается уже при угле 20°, а дальнейшее увеличение угла сопровождается снижением времени движения до 0,65 секунд при 40°. Это обусловлено правильной стандартной геометрией частиц (цилиндрические тела), высокой плотностью и низким коэффициентом трения.

Кора характеризуется более низкой сыпучестью: движение начинается при углах свыше 15°, а полное истечение достигается только при 25°. При дальнейшем увеличении угла наклона время движения уменьшается, а при углах более 30° наблюдается практически мгновенное истечение материала.

Для топливной и технологической щепы характерны промежуточные показатели. В обоих случаях движение отсутствует при малых углах наклона, однако полное истечение достигается при 25–35°. При этом технологическая щепа демонстрирует несколько лучшие показатели сыпучести, что может быть связано с более однородным гранулометрическим составом и меньшей склонностью частиц к взаимному зацеплению.

Самая низкая сыпучесть наблюдается у опилок, для которых устойчивое движение обеспечивается только при угле 45°. Несмотря на небольшой размер частиц, высокая удельная поверхность контакта способствует увеличению сил внутреннего трения и формированию устойчивых структур, препятствующих истечению материала.

Игольчатая щепа (дроблёнка) занимает промежуточное положение: движение начинается при 25°, а полное истечение достигается уже при 30°, при этом увеличение угла наклона сопровождается существенным сокращением времени движения.

Стружка характеризуется выраженным пороговым режимом истечения. До угла 30° материал практически неподвижен, а полное истечение наблюдается лишь при углах свыше 35°, что объясняется крупными размерами и вытянутой формой частиц, способствующими их механическому зацеплению.

Аспирационная пыль также демонстрирует низкую сыпучесть. Полное истечение достигается только при углах 40–45°, что, вероятно, обусловлено повышенными когезионными силами и большим числом контактов между мелкодисперсными частицами.

Результаты экспериментов позволяют разделить исследуемые материалы на три группы по характеру движения. К первой относятся хорошо сыпучие материалы (древесные пеллеты), для которых достаточно угла наклона около 20°. Вторую группу составляют материалы со средней сыпучестью (кора, технологическая и топливная щепа, игольчатая щепа), требующие наклона 25–35° для устойчивого истечения. Наименее сыпучими оказались опилки, стружка и аспирационная пыль, для которых необходим угол не менее 40–45°. Полученные результаты подтверждают, что определяющее влияние на характер движения оказывает не только размер частиц, но и их форма, шероховатость поверхности, способность к взаимному зацеплению и величина внутреннего трения, что необходимо учитывать при проектировании лоткового и бункерного оборудования для хранения и транспортирования различных видов измельченного древесного сырья. Основные результаты однофакторного эксперимента по истечению сырья отражены в табл. 2. На втором этапе проводился двухфакторный эксперимент, при котором исследовался характер движения сыпучего сырья при изменении угла наклона стенки лотка и дополнительном вибрационном воздействии. То есть факторами были угол наклона лотка и частота вибрационного воздействия. По данным работы [18] вибрационное воздействие является эффективным средством – побудителем перемещения частиц.

Таблица 2. Данные по истечению сырья естественным способом

Вид сырья	Наклон лотка, °	Время движения, с	Масса материала, г	Выход массы материала, г	Остаток массы материала, г
Пеллеты	10	Движения нет			
	15	6,98	1500	600	900
	20	3,1	1500	1500	0
	25	1,41	1500	1500	0
	30	0,95	1500	1500	0
	35	0,86	1500	1500	0
	40	0,65	1500	1500	0
	45	Мгновенное истечение			
Кора	<15	Движения нет			
	17,5	1,5	1000	30	970
	20	3,43	1000	50	950
	25	1,7	1000	1000	0
	30	1,3	1000	1000	0
	>30	Мгновенное истечение			
Щепа топливная	<20	Движения нет			
	25	2	1500	75	1425
	30	2,93	1500	1095	405
	35	2,82	1500	1500	0
	40	1,73	1500	1500	0
	45	1,35	1500	1500	0
Щепа технологическая	<15	Движения нет			
	20	2	1000	50	950
	25	3,25	1000	1000	0
	30	2,17	1000	1000	0
	35	1,25	1000	1000	0
	40	1,08	1000	1000	0
	45	0,6	1000	1000	0
Опилки	<30	Движения нет			
	35	5,46	1000	100	900
	40	3,94	1000	150	850
	45	2,18	1000	1000	0
Щепа игольчатая	<20	Движения нет			
	25	12	1000	200	800
	30	7,89	1000	1000	0
	35	2,25	1000	1000	0
	40	2,1	1000	1000	0
	45	1,5	1000	1000	0
Стружка	<25	Движения нет			
	30	5	1000	50	950
	35	3,12	1000	850	150
	>35	Мгновенное истечение			
Аспирационная пыль	<25	Движения нет			
	30	4	1000	70	930
	35	6,3	1000	850	150
	40	2,7	1000	1000	0
	45	1,4	1000	1000	0

Результаты второй серии экспериментов показали, что применение вибрационного воздействия существенно повышает интенсивность движения исследуемых материалов и снижает критический угол их устойчивого истечения. При использовании вибратора с частотой 20–50 Гц характер движения определяется как параметрами колебаний, так и физико-механическими свойствами сырья.

Для технологической и топливной щепы вибрация обеспечивает устойчивое движение уже при угле наклона 5°, тогда как без вибрационного воздействия истечение отсутствовало. Наиболее эффективной оказалась частота 40 Гц, при которой достигается минимальное время движения при всех исследованных углах наклона. Аналогичная закономерность установлена для древесных пеллет: при частоте 40 Гц наблюдается наиболее быстрое и стабильное истечение материала, а дальнейшее увеличение частоты до 50 Гц не приводит к повышению эффективности. Наиболее выраженный

эффект вибрации отмечен для опилок, характеризующихся низкой естественной сыпучестью. Применение вибрации позволило обеспечить полное истечение материала уже при углах 10–20°, тогда как без вибрационного воздействия устойчивое движение достигалось только при 45°. При этом минимальное время транспортирования также зафиксировано при частоте 40 Гц, тогда как увеличение частоты до 50 Гц сопровождалось замедлением процесса.

Основные результаты двухфакторного эксперимента по истечению сырья вибрационным способом отражены в табл. 3.

Таблица 3. Данные по истечению сырья с вибрационным воздействием

Вид сырья	Наклон лотка, °	Частота, Гц	Время движения, с	Масса материала, г	Выход массы материала, г	Остаток массы материала, г
Щепа топ., тех.	5	20	Движения нет			
	5	30	Движения нет			
	5	40	55	1000	1000	0
	5	50	61	1000	1000	0
	10	20	Движения нет			
	10	30	300	1000	440	560
	10	40	29	1000	1000	0
	10	50	36	1000	1000	0
	15	20	Движения нет			
	15	30	127	1000	1000	0
	15	40	10	1000	1000	0
	15	50	31	1000	1000	0
	20	20	Движения нет			
	20	30	71	1000	1000	0
	20	40	4	1000	1000	0
	20	50	19	1000	1000	0
Пеллеты	5	20	Движения нет			
	5	30	Движения нет			
	5	40	11	1000	1000	0
	5	50	14	1000	1000	0
	10	20	Движения нет			
	10	30	74	1000	1000	0
	10	40	5	1000	1000	0
	10	50	13	1000	1000	0
	15	20	46	1000	1000	0
	15	30	34	1000	1000	0
	15	40	4	1000	1000	0
	15	50	6	1000	1000	0
Опилки	10	20	Движения нет			
	10	30	Движения нет			
	10	40	62	1500	1500	0
	10	50	127	1500	1500	0
	15	20	Движения нет			
	15	30	412	1500	1200	300
	15	40	14	1500	1500	0
	15	50	597	1500	1500	0
	20	20	Движения нет			
	20	30	229	1500	1500	0
	20	40	14	1500	1500	0
	20	50	27	1500	1500	0

Для создания вибрационного воздействия на стенку экспериментального лотка был смонтирован вибратор, изготовленный на базе трёхфазного асинхронного электродвигателя мощностью 150 Вт с номинальной частотой вращения 2700 об/мин. На валу электродвигателя был закреплён эксцентричный груз массой 30 г, установленный на радиусе 27 мм от оси вращения. Такая конструкция обеспечивала возникновение силы, создающей вынужденные механические колебания металлического лотка. Регулирование интенсивности вибрационного воздействия осуществлялось путем изменения частоты вращения электродвигателя с использованием преобразователя частоты EKF 4/750. Изменение выходной частоты преобразователя позволяло плавно изменять скорость вращения вала и, соответственно, частоту и величину возбуждаемой вибрации без изменения конструкции установки.

Фактическая частота вращения вала двигателя контролировалась в ходе каждого эксперимента с помощью бесконтактного оптического лазерного тахометра. Измерения проводились после выхода электродвигателя на установившийся режим работы, что позволяло фиксировать действительное значение частоты вращения и исключить влияние переходных процессов. Полученные значения использовались при анализе результатов экспериментов и сопоставлении режимов работы вибрационного устройства.

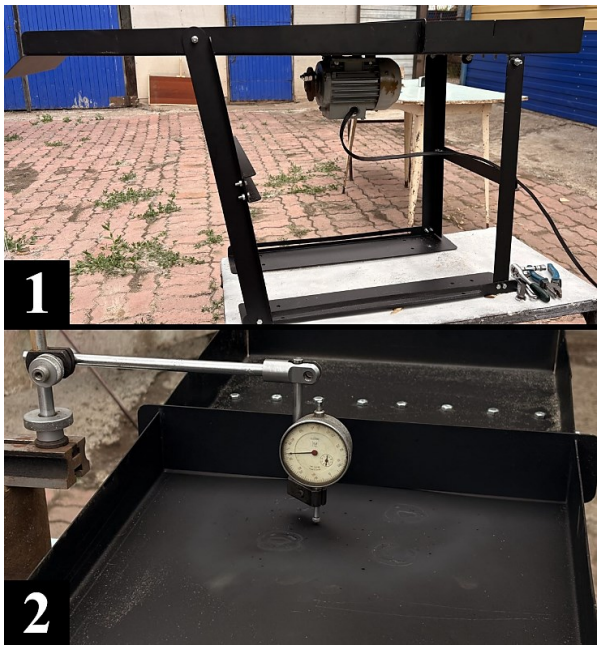

Рис. 4. Натурный стенд: 1 – металлический лоток с вибратором, 2 – индикатор часового типа

Вибрационное воздействие значительно расширяет диапазон рабочих углов наклона поверхности и повышает эффективность транспортирования измельчённого древесного сырья. Для всех исследованных материалов оптимальным режимом является частота около 40 Гц, обеспечивающая минимальное время движения и полное истечение материала. Повышение частоты до 50 Гц не приводит к дальнейшему улучшению процесса, что, вероятно, связано с демпфированием колебаний и изменением характера взаимодействия частиц в насыпном слое. Стоит отметить, что при частоте в 50 Гц характер движения массы наиболее плавный и равномерный относительно частоты в 40 Гц. На рис. 4 показана фотография экспериментального стенда. Амплитуда вибрационного воздействия (по центру лотка) дополнительно измерялась с помощью индикатора ИЧ-1. Амплитуда движения вибрационного лотка находится в пределах 0,3–0,8 мм.

Выводы. Разработан и изготовлен вибрационный стенд, обеспечивающий проведение исследований движения измельченного древесного сырья при изменении угла наклона лотка в диапазоне от 0° до 45° и частоты вибрационного воздействия от 0 до 50 Гц. Конструкция стенда позволяет воспроизводить условия, характерные для процессов движения древесных сыпучих материалов по направляющим лоткам, выгрузки материала из технологических бункеров.

Экспериментально определены основные физические характеристики исследуемых материалов, включая угол естественного откоса и насыпную плотность, а также установлены критические углы начала устойчивого движения. Выявлено, что наибольшей сыпучестью обладают древесные пеллеты, устойчивое движение которых начинается при угле около 20°, тогда как для опилок, стружки и аспирационной пыли требуются углы наклона 40–45°. Установлено, что характер движения определяется не только размерами частиц, но и их формой, шероховатостью поверхности, коэффициентом внутреннего трения и способностью к взаимному механическому зацеплению.

По результатам экспериментов установлено, что применение вибрационного воздействия существенно снижает критический угол истечения древесного сырья и повышает интенсивность его движения. Наиболее эффективным режимом для исследованных материалов является частота вибрации 40 Гц, обеспечивающая минимальное время истечения при углах наклона 10–20°. Увеличение частоты до 50 Гц не приводит к заметному повышению эффективности, а для отдельных видов сырья сопровождается увеличением времени движения вследствие изменения характера взаимодействия и движения частиц и демпфирования колебаний.

Заключение. Полученные экспериментальные данные позволяют обоснованно выбирать конструктивные параметры направляющих лотков, стенок бункеров и режимы работы вибрационных устройств для перемещения различных видов сыпучего древесного сырья, что способствует снижению вероятности сводообразования, повышению стабильности выгрузки материала и сокращению простоев технологических линий. Практическая значимость работы заключается в формировании экспериментальной базы данных, которая может быть использована при проектировании лоткового и бункерного оборудования предприятий лесопромышленного комплекса, а также при калибровке и верификации цифровых моделей движения древесного сырья, реализуемых методом дискретных элементов (DEM). В дальнейшем результаты исследования планируется использовать для разработки и валидации имитационной модели процессов хранения и выгрузки измельченной древесины, позволяющей проводить численные эксперименты и оптимизировать конструкцию технологического оборудования без необходимости выполнения большого количества натурных испытаний [11, 19, 20].

Литература

1. Бачериков И.В. Виды и свойства измельченной древесины, предназначенной для бункерного хранения / И.В. Бачериков, Б.М. Локштанов // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 1. С. 18–44. DOI 10.15393/j2.art.2017.3721. – EDN YUOSSP.

2. Воробьев А.А. Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов / А.А. Воробьев, А.А. Мигров // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 1. С. 97-104. DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-1-97-104. – EDN BFRDZO.
3. Трофимов С.П. Условия обеспечения подвижности и перемещения слоя измельчённой древесины / С.П. Трофимов, В.И. Шафранский // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн : Материалы докладов 84-й научно-технической конференции, посвящённой 90-летнему юбилею БГТУ и Дню белорусской науки (с международным участием), Минск, 03–14 февраля 2020 года / Отв. за издание И.В. Войтов. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2020. С. 99–101. EDN FSTLTW.
4. Кожевников В.А. Теоретическое моделирование и расчет эффективности применения сводообрушителя в бункере / В.А. Кожевников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 84–92. DOI 10.34031/2071-7318-2025-11-2-84-92. EDN WCLDVL.
5. Скудина А.А. О физической сущности сводообразующего истечения зерновых сыпучих материалов из бункеров наибольшей пропускной способности / А.А. Скудина, В.А. Богомягких // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7, № 5 (30). С. 158. DOI 10.15862/40TVN515. EDN VJKREN.
6. Прусов М.В. Теоретическое обоснование параметров процессов загрузки, хранения и выгрузки комбикормов / М.В. Прусов, В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 1 (49). С. 6–13. DOI 10.18286/1816-4501-2020-1-6-13. EDN RZGBJT.
7. ZHAI Xiaowei & AN, Qi & HOU, Qinyuan & LIU, Xiliang & DUAN, Xuhui. (2025). Experimental study on cooling law of spontaneous combustion by liquid CO2 injection in coal bunker. Meikuang Anquan. 56.10.13347/j.cnki.mkaq.20241051.
8. Gasperini Thomas & Mancini, Manuela & Provinciali, Elena & Ficosecco, Gloria & Toscano, Giuseppe. (2026). Shadow Size Distribution Analysis for Automated Classification of Wood Chip Particle Size Distribution Under Bulk Conditions. Sustainability. 18. 10.3390/su18115255.
9. Cheng Ziwei & Leal, Juan & Hartford, Carrie & Carson, John & Donohoe, Bryon & Craig, David & Xia, Yidong & Daniel, Richard & Ajayi, O. & Semelsberger, Troy. (2021). Flow behavior characterization of biomass Feedstocks. Powder Technology. 387. 10.1016/j.powtec.2021.04.004.
10. Ramachandra C.T & Ashoka H. & Kumar G. & B., Shivanna & Ray, Babu & P., Sivamma. (2021). Design and Development of Environmental Friendly Sub-Baric Storage Bin. International Journal of Environment and Climate Change. 19-28. 10.9734/IJECC/2021/v11i1030488.
11. Цубикс В.О. Имитационное моделирование процесса движения сыпучих материалов при разгрузке бункера / В.О. Цубикс, С.Н. Долматов, А.А. Цубикс // Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 169–186. DOI 10.51318/FRET.2026.96.1.019. EDN FZCBIC.
12. Roberts Alan. (2026). Storage and Handling Cohesive Bulk Solids-Basics of Bin Design. 10.1007/978-3-032-19702-3_2.
13. Физическая модель двухступенчатой вибрационной установки для генерирования асимметричных колебаний / В.Г. Рязанцев, М.Д. Герасимов, Н.С. Любимый [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 107–114. DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-10-107-114. EDN QRARKQ.
14. Weerasekara Nirmal & Powell, Malcolm & Cleary Paul & Tavares Luis & Evertsson Magnus & Morrison Rob & Quist Johannes & Carvalho Rodrigo. (2013). The contribution of DEM to the science of comminution. Powder Technology. 248. 3–24. 10.1016/j.powtec.2013.05.032.
15. Цубикс В.О. Имитационное моделирование охлаждения древесных пеллет / В.О. Цубикс, С.Н. Долматов, А.А. Цубикс // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2026. № 1 (69). С. 51–66. DOI 10.25686/2306-2827.2026.1.51. EDN PPVAEX.
16. 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. Vol. 627. P. 05020. DOI 10.1051/e3sconf/202562705020. EDN BGSBOB.
17. Lucie Hasalová & Šálek, Vojtěch & Václav, Picka & Milan, Jahoda. (2025). Measuring Char Bulk Density in Engineered Wood Products Using Photogrammetry. Journal of Physics: Conference Series. 3121. 012008. 10.1088/1742-6596/3121/1/012008.
18. Cieplok Grzegorz. (2024). Influence of vibratory conveyor design parameters on the trough motion and the self-synchronization of inertial vibrators. Open Engineering. 14.10.1515/eng-2022-0434.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026619649 Российская Федерация. Программа моделирования движения сыпучих частиц : заявл. 23.03.2026 : опубл. 06.04.2026 / С.Н. Долматов, П.Г. Колесников, В.О. Цубикс, А.А. Цубикс ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». EDN ZUNPKG.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026664001 Российская Федерация. «Программа моделирования охлаждения древесных пеллет» : заявл. 28.04.2026 : опубл. 12.05.2026 / В.О. Цубикс, С.Н. Долматов, А.А. Цубикс, С.С. Ш. Саая ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тувинский государственный университет». EDN YLIFZR.

References

1. Bacherikov I.V. Types and properties of shredded wood intended for bunker storage / I.V. Bacherikov, B.M. Lokshtanov // Resources and Technology. 2017. Vol. 14, No. 1. Pp. 18–44. DOI 10.15393/j2.art.2017.3721. EDN YUOSSP.
2. Vorobyev A.A. Analysis and selection of hopper geometric parameters for studying the bulk material discharge process / A.A. Vorobyev, A.A. Migrov // Proceedings of Petersburg Transport University. 2022. Vol. 19, No. 1. Pp. 97–104. DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-1-97-104. EDN BFRDZO.
3. Trofimov S.P. Conditions for ensuring the mobility and movement of a shredded wood layer / S.P. Trofimov, V.I. Shafransky // Forest Engineering, Materials Science and Design: Proceedings of the 84th Scientific and Technical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of BSTU and the Day of Belarusian Science. Minsk: Belarusian State Technological University, 2020. Pp. 99–101. EDN FSTLTW.
4. Kozhevnikov V.A. Theoretical modeling and evaluation of the efficiency of an arch breaker in a hopper / V.A. Kozhevnikov // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 84–92. DOI 10.34031/2071-7318-2025-11-2-84-92. EDN WCLDVL.
5. Skudina A.A. On the physical nature of arch-forming discharge of granular materials from high-capacity hoppers / A.A. Skudina, V.A. Bogomyagkikh // Naukovedenie Internet Journal. 2015. Vol. 7, No. 5(30). P. 158. DOI 10.15862/40TVN515. EDN VJKREN.

6. Prusov M.V. Theoretical substantiation of the parameters of loading, storage and unloading processes of compound feeds / M.V. Prusov, V.I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin // Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2020. No. 1 (49). Pp. 6–13. DOI 10.18286/1816-4501-2020-1-6-13. EDN RZGBJT.
7. ZHAI Xiaowei & AN Qi & HOU Qinyuan & LIU, Xiliang & DUAN, Xuhui. (2025). Experimental study on cooling law of spontaneous combustion by liquid CO2 injection in coal bunker. Meikuang Anquan. 56.10.13347/j.cnki.mkaq.20241051.
8. Gasperini Thomas & Mancini Manuela & Provinciali, Elena & Ficosecco, Gloria & Toscano, Giuseppe. (2026). Shadow Size Distribution Analysis for Automated Classification of Wood Chip Particle Size Distribution Under Bulk Conditions. Sustainability. 18.10.3390/su18115255.
9. Cheng Ziwei & Leal, Juan & Hartford, Carrie & Carson, John & Donohoe, Bryon & Craig, David & Xia, Yidong & Daniel, Richard & Ajayi, O. & Semelsberger, Troy. (2021). Flow behavior characterization of biomass Feedstocks. Powder Technology. 387. 10.1016/j.powtec.2021.04.004.
10. Ramachandra C.T & Ashoka H. & Kumar G. & B., Shivanna & Ray, Babu & P., Sivamma. (2021). Design and Development of Environmental Friendly Sub-Baric Storage Bin. International Journal of Environment and Climate Change. 19–28. 10.9734/IJECC/2021/v11i1030488.
11. Tsubiks V.O. Simulation of bulk material movement during hopper discharge / V.O. Tsubiks, S.N. Dolmatov, A.A. Tsubiks // Forests of Russia and Economy in Them. 2026. No. 1 (96). Pp. 169–186. DOI 10.51318/FRET.2026.96.1.019. – EDN FZCBIC.
12. Roberts Alan. (2026). Storage and Handling Cohesive Bulk Solids-Basics of Bin Design. 10.1007/978-3-032-19702-3_2.
13. Ryazantsev V.G. Physical model of a two-stage vibration system for generating asymmetric oscillations / V.G. Ryazantsev, M.D. Gerasimov, N.S. Lyubimyy et al. // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 107–114. DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-10-107-114. EDN QRARKQ.
14. Weerasekara Nirmal & Powell Malcolm & Cleary Paul & Tavares Luis & Evertsson Magnus & Morrison Rob & Quist, Johannes & Carvalho, Rodrigo. (2013). The contribution of DEM to the science of comminution. Powder Technology. 248. 3–24. 10.1016/j.powtec.2013.05.032.
15. Tsubiks V.O. Simulation of the wood pellet cooling process / V.O. Tsubiks, S.N. Dolmatov, A.A. Tsubiks // Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2026. No. 1 (69). Pp. 51–66. DOI 10.25686/2306-2827.2026.1.51. EDN PPVAEX.
16. 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. Vol. 627. P. 05020. DOI 10.1051/e3sconf/202562705020. – EDN BGSBOB.
17. Lucie Hasalová & Šálek Vojtěch & Václav, Picka & Milan, Jahoda. (2025). Measuring Char Bulk Density in Engineered Wood Products Using Photogrammetry. Journal of Physics: Conference Series. 3121. 012008. 10.1088/1742-6596/3121/1/012008.
18. Cieplok Grzegorz. (2024). Influence of vibratory conveyor design parameters on the trough motion and the self-synchronization of inertial vibrators. Open Engineering. 14. 10.1515/eng-2022-0434.
19. Dolmatov S.N. Computer program registration certificate No. 2026619649, Russian Federation. Bulk particle motion simulation program / S.N. Dolmatov, P.G. Kolesnikov, V.O. Tsubiks, A.A. Tsubiks; applicant: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Application: 23.03.2026. Published: 06.04.2026. EDN ZUNPKG.
20. Tsubiks V.O. Computer program registration certificate No. 2026664001, Russian Federation. "Wood pellet cooling simulation program" / V.O. Tsubiks, S.N. Dolmatov, A.A. Tsubiks, S.S.Sh. Saaya; applicant: Tuvan State University. Application: 28.04.2026. Published: 12.05.2026. EDN YLIF.