

На правах рукописи



БЕЛЯЕВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
И СМЕШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ
С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ
МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Специальность 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Научный руководитель:

Семикопенко Игорь Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры механического оборудования
БГТУ им. В. Г. Шухова

Официальные оппоненты:

Сиваченко Леонид Александрович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры транспортных и
технологических машин МОУ ВО
«Белорусско-Российский университет»

Бараковских Дмитрий Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры оборудования и автоматизации
силикатных производств ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Защита состоится «11» декабря 2026 г. в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.276.03 на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. 242 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте (URL: <https://www.bstu.ru/struct/gna/belyaev/1761>).

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И. А. Семикопенко
канд. техн. наук, доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В масштабах отечественного электроэнергетического комплекса на процессы измельчения и смешивания сырья приходится значительная доля общего объема генерации электроэнергии. В данных условиях стратегическим приоритетом для промышленности строительных материалов становится освоение и совершенствование оборудования нового поколения с минимальным удельным энергопотреблением.

Основным типом измельчителей, применяемым на предприятиях нашей страны, являются шаровые, молотковые, среднеходные, вибрационные мельницы. С целью снижения металлоемкости производственных линий, затрат на электроэнергию, эксплуатацию оборудования существуют примеры использования шаровых и молотковых мельниц в качестве измельчителей-смесителей. Данные агрегаты обладают рядом достоинств, однако, в настоящее время имеются предпосылки использования вместо них измельчителей, работающих на принципе помола материала посредством динамического удара и отличающиеся жестким закреплением ударных элементов. Такими измельчителями являются дезинтеграторы. Связано это с тем, что, например, в шаровых мельницах основная часть подводимой электроэнергии расходуется на перемещение и подъём мелющих тел, тогда как на сам процесс разрушения материала приходится не более 20 % энергии. Ввиду этого способ помола посредством динамического удара является наиболее эффективным, так как позволяет снизить мощность оборудования, увеличить его производительность и получить высококачественный материал. Кроме этого, данные измельчители имеют меньшие габариты, массу и стоимость. Благодаря этому их применение наиболее актуально и экономически целесообразно для малых и средних предприятий, сталкивающихся с проблемой выбора энергоэффективного и доступного оборудования. Также, именно дезинтеграторы являются перспективным оборудованием для совместного измельчения и смешивания нескольких компонентов, что подтверждают работы И. А. Хинта и производителей дезинтеграторов, например, завода «Техприбор» (г. Тула).

К основным недостаткам дезинтеграторов следует отнести: разнородность фракционного состава готового продукта, сравнительно низкую эффективность смешивания различных компонентов и др.

Таким образом, перспективы использования дезинтеграторов как измельчителей-смесителей и их преимущества перед другими типами оборудования обуславливают необходимость разработки новых технических решений, что подтверждает актуальность выбранного направления исследований.

Степень разработанности темы исследования. В отечественной науке одним из основоположников дезинтеграторной технологии обработки материалов считается И. А. Хинт. Именно он в одной из своих работ предложил измельчать известняк с песком в дезинтеграторе, благодаря чему получил силикальцит без автоклавирования. Также большой вклад в исследования

процессов обработки материалов в дезинтеграторных установках, разработку их конструкций и внедрение в производство внесли сотрудники НПО «Дезинтегратор» (г. Таллин) и завода «Техприбор» (г. Тула).

Фундаментальным и прикладным аспектам процессов измельчения и смешивания посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. В области процесса измельчения широко известны труды П. А. Ребиндера, А. А. Богородского, И. Р. Клейса, В. Н. Блиничева, Н. М. Смирнова, В. Б. Лапшина, М. Я. Сапожникова, В. С. Богданова, Г. С. Ходакова и др. Теоретические основы получения многокомпонентных смесей, а также вопросы разработки и модернизации смесительного оборудования и смесителей-измельчителей рассмотрены в работах В. В. Кафарова, Л. И. Лыткиной, В. Н. Иванца, А. В. Сибиля, И. А. Бакина, Ф. Стренка и др.

Современная научная база, посвященная дезинтеграторам, располагает внушительным объемом теоретических, экспериментальных исследований и конструктивно-технических решений. Однако существующие недостатки определяют необходимость поиска новых конструктивных решений, направленных на повышение эффективности работы дезинтеграторов.

Объект исследования – дезинтегратор с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

Предмет исследования – процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

Цель работы – повышение производительности по готовому продукту, снижение удельных энергозатрат и коэффициента неоднородности смеси при измельчении двухкомпонентного материала в дезинтеграторе.

Задачи исследования.

1. Провести обзор и анализ агрегатов для измельчения и смешивания с целью выявления направлений их конструктивной модернизации. На основе полученных результатов спроектировать усовершенствованный дезинтегратор, обеспечивающий рост производительности по готовому продукту при снижении удельных энергозатрат и коэффициента неоднородности смеси.

2. Получить математическое выражение для определения времени нахождения частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов при заданной концентрации ключевого компонента.

3. Получить математическое выражение для определения среднего размера частиц измельченного продукта в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

4. Получить математическое выражение для определения эффективного радиуса расположения ударных элементов на роторах дезинтегратора.

5. Получить математическое выражение для определения размера частиц материала, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок, в зависимости от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора.

6. Получить математическое выражение, описывающее изменение угла поворота вектора скорости двухфазной среды, в зависимости от конструктивных параметров дезинтегратора.

7. Разработать лабораторный измельчительный комплекс, включающий дезинтегратор с двумя комплектами роторов: первый – классической конструкции, второй – с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

8. Определить план экспериментальных исследований и установить регрессионные зависимости производительности по готовому продукту, коэффициента неоднородности смеси и удельных энергозатрат от варьируемых параметров дезинтегратора.

9. Разработать методику расчёта основных конструктивных и технологических параметров дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

10. Разработать предложение промышленного применения дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

Научная новизна работы.

1. Получены математические выражения для определения:

- времени нахождения частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов при заданной концентрации ключевого компонента;
- среднего размера частиц, получаемых при измельчении в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов;

- эффективного радиуса расположения ударных элементов на роторах дезинтегратора, при котором выполняется разрушение частиц измельчаемых материалов;

- размера частиц материала, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок дезинтегратора;

- зависимости изменения угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока от конструктивных параметров дезинтегратора.

2. На основе полученных математических выражений установлены закономерности изменения искомых функций от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

3. На основе полученных математических выражений разработана методика расчёта основных конструктивных и технологических параметров дезинтегратора усовершенствованной конструкции.

4. По результатам экспериментальных исследований построены регрессионные зависимости, адекватно описывающие изменения производительности по готовому продукту, удельных энергозатрат, коэффициента неоднородности смеси, полученной в дезинтеграторе усовершенствованной конструкции.

Теоретическая значимость работы. Разработаны математические выражения, позволяющие определить основные конструктивно-технологические параметры дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

Практическая значимость работы. Разработана методика расчёта основных конструктивно-технологических параметров дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов, в основу которой заложены полученные и существующие математические выражения.

Результаты исследований успешно внедрены в образовательный процесс БГТУ им. В. Г. Шухова для подготовки бакалавров по направлению 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», инженеров по специальности 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

Разработано конструктивно-техническое решение дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов, на которое получен патент РФ. Данное решение обеспечило повышение производительности по готовому продукту, снижение коэффициента неоднородности смеси и удельных энергозатрат.

Методы исследования. При выполнении настоящей работы применен комплекс методов исследований. Теоретические методы: идеализация, моделирование, аналогия. Экспериментальные методы: лабораторный эксперимент, обработка и статистический анализ численных данных. Специальные методы: физическое и математическое моделирование процессов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические выражения, позволяющие определить время нахождения частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов, средний размер частиц измельченного продукта, эффективный радиус расположения ударных элементов, размер частиц материала, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок дезинтегратора, зависимость изменения угла поворота вектора скорости двухфазной среды, выходящей в тангенциальный разгрузочный патрубок.

2. Результаты экспериментальных исследований изменения производительности по готовому продукту, удельных энергозатрат на измельчение и смешивание в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов и коэффициента неоднородности получаемой смеси.

3. Инженерная методика расчёта основных конструктивно-технологических параметров дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

4. Конструкция дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов, защищенная патентом РФ.

Степень достоверности. Достоверность выводов, ключевых положений и рекомендаций в диссертации подтверждается строгим следованием фундаментальным законам физики и механики. Высокий уровень достоверности результатов экспериментальных исследований обоснован применением высокоточных измерительных приборов БГТУ им. В.Г. Шухова, а также корреляцией результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты и выводы настоящей работы прошли апробацию на заседаниях кафедры «Механическое оборудование» БГТУ им. В.Г. Шухова в 2019-2021 гг., 2026 г., на Всероссийской конференции «Актуальные вопросы охраны окружающей среды» в 2018 г.; на XI Международной конференции «Молодежь и научно-технический прогресс» в 2018 г. Работа удостоена победы в конкурсе «УМНИК» – 2020.

Публикации. Основные положения и результаты научно-квалификационной работы отражены в трех патентах РФ на изобретения и в 10 научных статьях. В журналах из перечня ВАК РФ опубликовано 9 статей, в издании, индексируемом в международной базе данных Scopus – 1 статья.

Структура и объем работы. Настоящая работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, охватывающего 145 наименований, а также трех приложений. Основной текст работы изложен на 187 страницах, включающих 63 рисунка и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана степень разработанности проводимых исследований, поставлены цель и задачи, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ технологического оборудования для измельчения и перспективность их применения для измельчения и смешивания. Установлено, что наибольшее применение на предприятиях строительной индустрии получили следующие типы мельниц: шаровые, молотковые, вибрационные, среднеходные и дезинтеграторы. Выполнен сравнительный анализ их достоинств и недостатков, в результате которого определены преимущественные особенности дезинтеграторов, способствующие их широкому распространению в промышленности для измельчения или измельчения и смешивания.

В результате анализа конструкций дезинтеграторов, разработанных современными производителями оборудования для измельчения и смешивания строительных материалов, установлены их основные недостатки, на основании которых определены следующие направления совершенствования: рост производительности по готовому продукту; минимизация абразивного износа рабочих элементов роторов; снижение удельных энергозатрат; обеспечение обработки материалов повышенной влажности; повышение размольной мощности; снижение коэффициента неоднородности получаемой смеси.

Выявленные направления совершенствования дезинтеграторов определяют целесообразность разработки нового технического решения, обеспечивающего увеличение производительности по готовому продукту, снижения удельных энергозатрат и коэффициента неоднородности смеси.

На основании вышесказанного была разработана конструкция дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами

ударных элементов, схема которого представлена на рисунке 1. Данная конструкция защищена патентом Российской Федерации на изобретение.

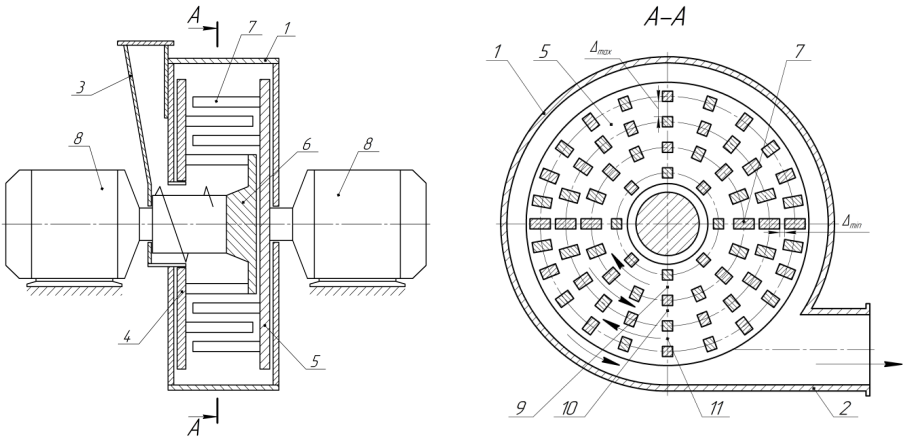


Рисунок 1. Схема дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов: 1 – цилиндрический корпус; 2 – тангенциальный разгрузочный патрубок; 3 – загрузочный бункер; 4, 5 – диски; 6 – втулка; 7 – ударные элементы; 8 – электродвигатели; 9, 10, 11 – зазоры между рядами ударных элементов

Принципиальное отличие рассматриваемой конструкции дезинтегратора заключается в формировании циклически переменного рабочего объема между смежными рядами ударных элементов. В поперечном сечении камеры помола усовершенствованного дезинтегратора зазоры 9, 10, 11 не являются постоянными, а изменяются по окружности с угловым шагом, равным 90° , тем самым чередуя области максимального сближения (Δ_{min}) и предельного удаления (Δ_{max}). Вследствие равнопеременного изменения величины междурядных зазоров 9, 10, 11 сечение ударных элементов 7 изменяется в пределах размеров от $b \times b$ до $b \times h$. Дополнительно предусмотрена возможность поворота ударных элементов 7 на заданный угол относительно их радиального расположения, за счет чего осуществляется дополнительная настройка зазоров 9, 10, 11 и регулирование степени однородности смеси, получаемой в результате обработки нескольких компонентов.

Предложенное конструктивно-техническое решение дезинтегратора способствует интенсификации взаимодействия частиц обрабатываемых материалов как с рабочими органами дезинтегратора, так и между собой, а также усиливает истирающее воздействие за счет роста концентрации частиц при изменении междурядного зазора от Δ_{max} к Δ_{min} .

Циклично изменяющийся объем пространства между смежными рядами ударных элементов (междурядный объем) интенсифицирует перемещение частиц измельчаемого материала. Это способствует более эффективному перераспределению частиц в междурядном объеме, что существенно повышает качество смешивания компонентов ввиду снижения коэффициента неоднородности смеси.

Рассмотрены существующие методики расчёта производительности и мощности дезинтеграторов, установлена целесообразность создания инженерной методики расчета усовершенствованного дезинтегратора, состоящей из математических выражений для определения его ключевых конструктивных и технологических параметров. Определена цель и задачи исследований.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований процессов измельчения и смешивания в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

Исследование процесса смешивания было основано на определении концентрации выделенной компоненты смеси после последнего (наружного) ряда ударных элементов. В результате получено выражение (1), которое показывает, что при прохождении четырех последовательных рядов ударных элементов концентрация выделенной компоненты смеси на выходе составляет 0,57 от её начального значения. Это подтверждает эффективность предлагаемой конструкции дезинтегратора для процессов совместного измельчения и смешивания.

$$C_4 = (t = 4\tau_0) \cong 0,57C_0, \quad (1)$$

где τ_0 – время нахождения частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов, с; t – время прохождения частицы материала всех рядов ударных элементов, с.

Получено математическое выражение (2) для определения времени τ_0 пребывания частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов при заданной концентрации ключевого компонента (1).

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot \Delta \cdot \gamma_{cp} \cdot f}{\omega \cdot (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha) \cdot R_{ш} \cdot (\gamma_0 + \gamma_k \cdot (\chi_1 - 2))}, \quad (2)$$

$$\chi_1 = \frac{R_k}{R_{ш}}, \quad (3)$$

где Δ – расстояние между радиальными размерами $i + 1$ и i -й ячейками, м; γ_{cp} – средняя насыпная плотность материалов при прохождении всех рядов ударных элементов, кг/м³; γ_0 – насыпная плотность материала, поступающего из загрузочной части на шнек, кг/м³; γ_k – насыпная плотность материала на выходе из камеры помола дезинтегратора, кг/м³; ω – частота вращения роторов с ударными элементами, с⁻¹; f – коэффициент трения частицы материала о поверхность ударного элемента; α – угол поворота ударных элементов к радиальному направлению, град.; R_k – радиус корпуса дезинтегратора, м; $R_{ш}$ – радиус шнека, м.

С помощью выражения (2) исследованы закономерности изменения времени τ_0 от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора. На рисунке 2 представлены графические зависимости времени τ_0 от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора. Определены параметры дезинтегратора для достижения минимального значения параметра времени ($\tau_0 = 0,0036$ с): $\omega = 30$ с⁻¹, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta = 0,02$ м, $R_k = 0,16$ м, $R_{ш} = 0,02$ м.

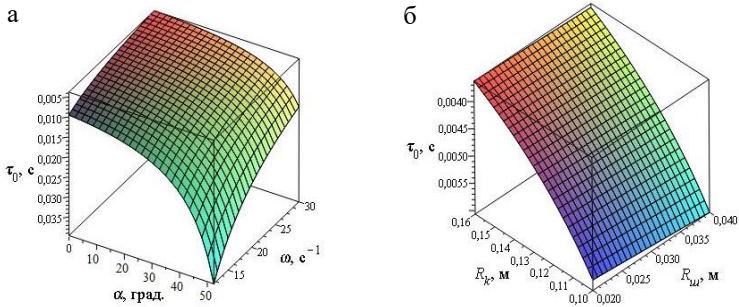


Рисунок 2. Зависимость времени τ_0 нахождения частицы материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов от: а – частоты вращения ω роторов и угла α поворота ударных элементов; б – радиуса шнека $R_{\text{ш}}$ и радиуса корпуса дезинтегратора R_k

Получено математическое выражение (4), позволяющее определить средний размер частиц готового продукта в объеме между внешним рядом ударных элементов и корпусом дезинтегратора.

$$d_k = \xi \cdot d_0, \quad (4)$$

$$\xi = \sqrt[3]{\frac{V_k}{Q_0}} \cdot \exp\left(-\frac{2}{3}k \cdot \omega \cdot \tau_0\right), \quad (5)$$

где V_k – объем между внешним рядом ударных элементов и корпусом, м^3 ; Q_0 – пропускная способность дезинтегратора, $\text{м}^3/\text{с}$; d_0 – среднее значение диаметра частицы загружаемого материала, м; k – коэффициент пропорциональности, который зависит от формы и размера ударных элементов ротора дезинтегратора (определяется эмпирическим путем).

С помощью выражения (4) исследованы закономерности изменения среднего размера частиц d_k от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора. На рисунке 3 представлены графические зависимости среднего размера частиц d_k от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора.

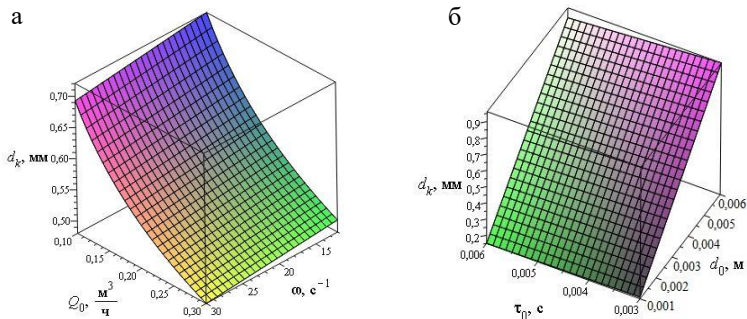


Рисунок 3. Графическая зависимость среднего размера частиц готового продукта d_k от: а – пропускной способности дезинтегратора Q_0 и частоты вращения его роторов ω ; б – среднего значения диаметра частицы загружаемого материала d_0 и времени пребывания частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов τ_0

Установлено, что разрабатываемая конструкция дезинтегратора позволяет прогнозировать получение продукта размером от 0,15 мм до 0,9 мм.

В рамках исследования движения частиц измельчаемого материала в пространстве между рядами ударных элементов получено математическое выражение (6), позволяющее определить минимальный радиальный размер R_r пространства между смежными рядами ударных элементов, необходимый для разрушения материала.

$$R_r \geq \frac{U_r}{\omega}, \quad (6)$$

$$U_r = \frac{\sigma_p}{\sqrt{E \cdot \rho_0 \left[\left(\frac{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_0}{2} \right)} \right)^{2\alpha_0} - 1 \right]}}, \quad (7)$$

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} \right), \quad (8)$$

$$\alpha_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu_{op}}{\omega \cdot \Delta_0 \cdot \rho_0 \cdot d_0}, \quad (9)$$

где σ_p – предельное растягивающее напряжение измельчаемого материала, МПа; E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа; ρ_0 – плотность частицы измельчаемого материала, кг/м³; Δ_0 – амплитуда периодически изменяющегося расстояния между рядами ударных элементов, м; $\Delta_{\max}$ – максимальный зазор между рядами ударных элементов, м; $\Delta_{\min}$ – минимальный зазор между рядами ударных элементов, м; μ_{op} – коэффициент псевдовязкого измельчения, Па·с.

С помощью выражения (6) исследованы закономерности изменения параметра R_r . На рисунке 4 представлены его графические зависимости от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора.

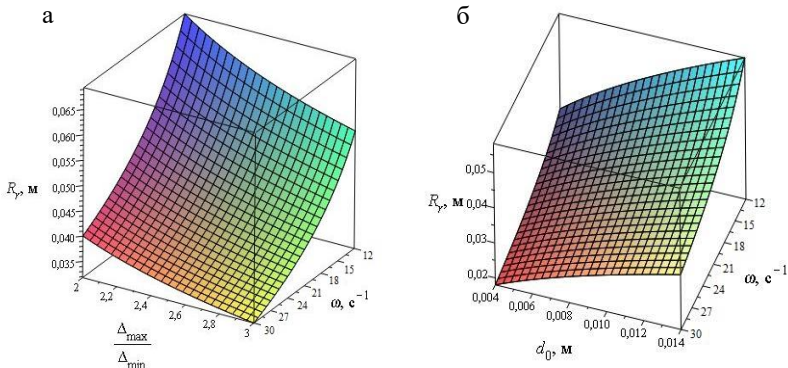


Рисунок 4. Графическая зависимость радиального размера R_r от: а – частоты вращения роторов ω и величины $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$; б – частоты вращения ω и исходного размера частиц d_0

Определены параметры дезинтегратора для достижения минимального значения радиального размера ($R_r = 0,018$ м): $\Delta_{max}/\Delta_{min} = 3$, $\Delta_{min} = 0,001$ м, $\omega = 30$ с⁻¹, $d_0 = 0,004$ м.

Рассмотрены условия вылета частиц материала из камеры помола в тангенциальный разгрузочный патрубок. В результате получено математическое выражение, с помощью которого рассчитывается значение минимального диаметра частиц d_1 , покидающих круговую траекторию двухфазного потока и поступающих в тангенциальный разгрузочный патрубок:

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{18\mu\Delta_1}{\gamma\omega\alpha_1 R}}, \quad (10)$$

где γ – плотность частицы материала, кг/м³; Δ_1 – зазор между внутренней стенкой камеры помола дезинтегратора и внешним рядом ударных элементов, м; μ – коэффициент динамической вязкости запыленного воздуха в зазоре Δ_1 , Па·с; α_1 – угловой размер тангенциального разгрузочного патрубка, рад; R – радиус внешнего ряда ударных элементов, м.

С помощью выражения (10) исследованы закономерности изменения диаметра частиц d_1 . На рисунке 5 представлены его графические зависимости от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора.

Определены параметры дезинтегратора, позволяющие выводить из зоны измельчения в тангенциальный разгрузочный патрубок более тонкие фракции измельченного материала ($d_1 = 0,012$ мм): $\Delta_1 = 0,020$ м, $\alpha_1 = 50^\circ = 5\pi/18$ рад., $\omega = 30$ с⁻¹, $R = 0,120$ м.

Рассмотрен процесс поворота скорости двухфазной среды при выходе последней из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок. Получено математическое выражение, описывающее изменение угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока при переходе в тангенциальный разгрузочный патрубок:

$$\psi(x) = \frac{\pi}{2} - 2\arctg \left[\tg \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{x}{x_L} \right) \right], \quad (11)$$

$$\psi_0 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{d - \Delta_1}{\sqrt{2d \cdot R_k - d^2}}, \quad (12)$$

где x_L – расстояние, на котором происходит поворот вектора скорости, м; x – длина тангенциального патрубка, м; d – размер патрубка, м.

С помощью выражения (11) исследованы закономерности изменения угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока от конструктивно-

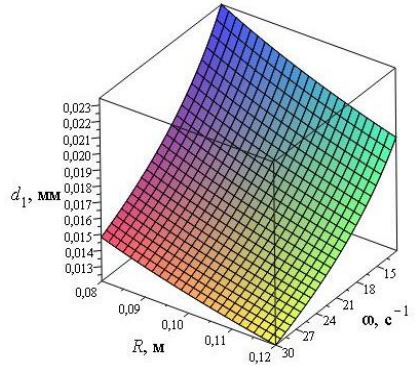


Рисунок 5. Графическая зависимость диаметра частиц d_1 от радиуса внешнего ряда ударных элементов R и частоты вращения роторов ω

технологических параметров дезинтегратора. На рисунке 6 представлены соответствующие графические зависимости, показывающие, что для полного разворота потока на 90° ($1,57$ рад.) требуется определенная длина патрубка x , зависящая от его размера d и расстояния x_l , на котором происходит поворот вектора скорости. Определены параметры дезинтегратора, при которых требуется минимальная длина патрубка ($x = 0,6$ м): $d = 0,04$ м, $x_l = 0,1$ м.

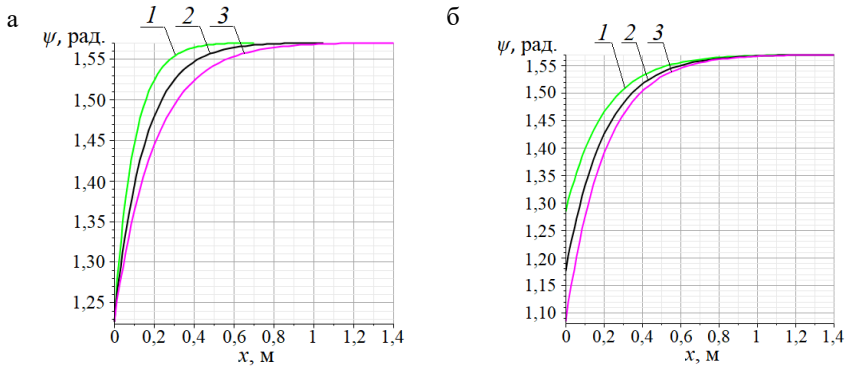


Рисунок 6. Графические зависимости функций $\psi(x)$:

а – 1 – $x_l = 0,1$ м; 2 – $x_l = 0,15$ м; 3 – $x_l = 0,2$ м; б – 1 – $d = 0,04$ м; 2 – $d = 0,06$ м; 3 – $d = 0,08$ м

В третьей главе определена методика проведения экспериментальных исследований процессов измельчения и смешивания материалов в усовершенствованном дезинтеграторе, выбран план полного факторного эксперимента, описан лабораторный измельчительный комплекс, разработанный на базе усовершенствованного дезинтегратора (рисунок 7). Приведены технические характеристики дезинтегратора, вспомогательного оборудования и контрольно-измерительных приборов. Также приведены фракционный состав и физико-механические характеристики исходных сырьевых материалов – известняка и глины.



Рисунок 7. Лабораторный измельчительный комплекс:

1 – дезинтегратор; 2 – патрубки соединительные;
3 – частотные преобразователи; 4 – патрубок отводящий;
5 – шнековые транспортеры; 6 – загрузочный бункер;
7 – пылевая камера; 8 – циклон

В четвёртой главе приведены результаты поисковых экспериментов, которые подтвердили эффективность использования дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов. Основанием данного заключения является приведенный сравнительный анализ экспериментальных данных совместного измельчения известняка с глиной, который показал следующие результаты: производительность по готовому продукту Q_R увеличилась на 14 %, удельные энергозатраты q снизились на 12 %, коэффициент неоднородности смеси снизился на 26 %.

В результате анализа экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно описывающая процессы измельчения и смешивания известняка с глиной в усовершенствованном дезинтеграторе. Данная модель представлена в виде уравнений регрессии, описывающих зависимости производительности по готовому продукту Q_R ; удельных энергозатрат q и коэффициента неоднородности смеси V_C .

Уравнения регрессии в натуральном виде:

$$Q_R = 84,44 - 0,0612 \cdot \omega_1 - 0,0624 \cdot \omega_2 - 20,66 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1^2 + 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_2^2 + 3,39 \cdot (\Delta_{\max} / \Delta_{\min})^2 + 2,56 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + 0,0048 \cdot \omega_1 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 0,0048 \cdot \omega_2 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min}. \quad (13)$$

$$q = -85,33 + 11,6 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_1 + 31,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_2 + 63,7 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} - 0,573 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1^2 - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_2^2 - 15,1 \cdot (\Delta_{\max} / \Delta_{\min})^2 + 0,3 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_1 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_2 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min}. \quad (14)$$

$$V_C = 86,5 - 0,038 \cdot \omega_1 - 0,025 \cdot \omega_2 - 31,04 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 1,18 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1^2 + 0,619 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_2^2 + 6 \cdot (\Delta_{\max} / \Delta_{\min})^2 + 0,48 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + 0,0004 \cdot \omega_1 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 0,0008 \cdot \omega_2 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min}. \quad (15)$$

С целью определения рациональных значений факторов исследуемых процессов проведен совместный анализ трех функций отклика от каждого из варьируемых факторов (рисунки 8, 9, 10): Q_R , q , $V_C = f(\omega_1)$, Q_R , q , $V_C = f(\omega_2)$, Q_R , q , $V_C = f(\Delta_{\max} / \Delta_{\min})$. Чтобы установить рациональные рабочие параметры дезинтегратора при измельчении и смешивании в нем двух компонентов, были сформулированы условия для функций отклика: стремление к максимуму про-

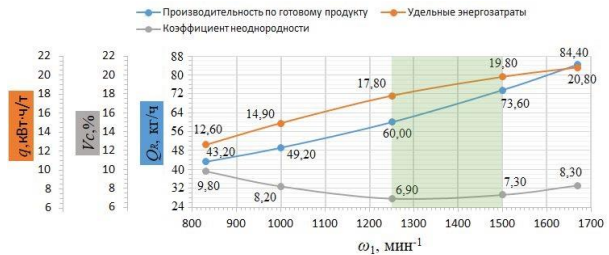


Рисунок 8. Графики зависимости Q_R , q , $V_C = f(\omega_1)$

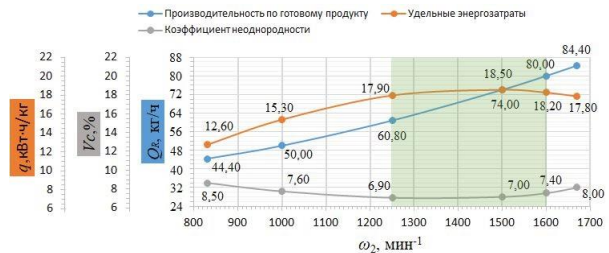


Рисунок 9. Графики зависимости Q_R , q , $V_C = f(\omega_2)$

изводительности по готовому продукту Q_R , а также минимизация удельных энергозатрат q и коэффициента неоднородности получаемой смеси V_C .

По результатам анализа графических зависимостей, представленных на рисунках 8, 9 и 10 установлен рациональный режим работы дезинтегратора при совместном измельчении известняка с глиной: частота вращения правого ротора $\omega_1 = 1250 - 1500 \text{ мин}^{-1}$; частота вращения левого ротора $\omega_2 = 1250 - 1600 \text{ мин}^{-1}$; отношение максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25 - 2,75$. В условиях рационального режима работы дезинтегратора максимальная производительность по готовому продукту составляет $Q_R = 82,4 \text{ кг/ч}$ (при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1600 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$), минимальные удельные энергозатраты составляют $q = 15 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ (при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1600 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$), минимальный коэффициент неоднородности смеси составил $V_C = 6,9 \%$ (при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$).

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей производительности Q_R , среднего размера частиц готового продукта d_k и удельных энергозатрат q от частоты вращения роторов подтвердил их высокую корреляцию. Величина расхождения между результатами не превышает 10 %, что укладывается в допустимые пределы.

В пятой главе рассматривается предложение к внедрению дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов в технологическую линию ОАО «ОКМ» (г. Россось) по производству керамического кирпича методом полусухого формования, предусматривающее использование дезинтегратора для грубого помола и смешивания легкоплавкой и дегидратированной глин в соотношении 2:1 соответственно. Представлены результаты лабораторных испытаний образцов кирпича, доказывающие, что снижение коэффициента неоднородности смеси в усовершенствованном дезинтеграторе существенно улучшает физико-механические свойства готовых изделий: предел прочности при сжатии возрастает на 18,8 %, предел прочности при изгибе – на 29,2 %, фактическая морозостойкость увеличивается на 26,1 %, а водопоглощение снижается на 33,3 %. Представлена разработанная инженерная методика расчета конструктивно-технологических параметров усовершенствованного дезинтегратора, которая успешно внедрена в образовательный процесс БГТУ им. В. Г. Шухова. Расчетный экономической эффект за 5 лет реализации проекта составил 1382,8 тыс. рублей. Подтверждена высокая конкурентоспособность как самого усовершенствованного дезинтегратора, так и выпускаемого с его применением керамического кирпича.

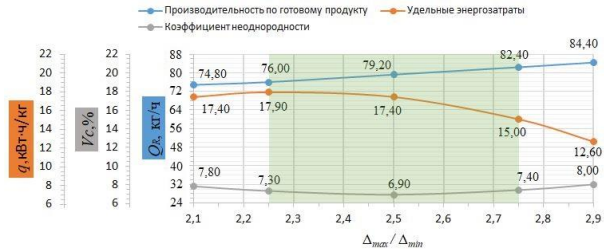


Рисунок 10. Графики зависимости Q_R , q , $V_C = f(\Delta_{\max} / \Delta_{\min})$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор и анализ передовой техники для измельчения, используемой в производстве строительных материалов, включая различные модификации дезинтеграторов, выпускаемых российскими и зарубежными предприятиями. По результатам проведенного анализа определены пути повышения эффективности их эксплуатационных параметров. Это позволило обосновать актуальность исследования процессов измельчения и смешивания в дезинтеграторе, характеризующимся переменным расстоянием между рядами ударных элементов.

2. Представлена конструкция дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов, защищенная патентом Российской Федерации. За счет разных типоразмеров ударных элементов и их поворота относительно радиального расположения реализован междурядный объём, быстроменяющийся через каждые 90° , который приводит к увеличению производительности по готовому продукту, снижению удельных энергозатрат и повышению качества смешивания.

3. Получены математические выражения для определения: массовой пропускной способности Q_m ; среднего размера частиц готового продукта d_k ; радиального размера R_r пространства между смежными рядами ударных элементов, необходимого для разрушения материала; порогового значения диаметра частиц d_1 , выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории. По результатам анализа данных выражений определены параметры дезинтегратора для достижения максимальной пропускной способности ($Q_m = 527,3$ кг/ч): $\omega = 30$ с $^{-1}$, $\alpha = 0^\circ$, $B_k = 0,13$ м, $R_k = 0,16$ м, $R_{ш} = 0,02$ м. Установлено, что разрабатываемая конструкция дезинтегратора позволяет прогнозировать получение продукта в диапазоне дисперсности от 0,15 мм до 0,9 мм. Определены параметры дезинтегратора для достижения минимального значения радиального размера ($R_r = 0,018$ м): $\Delta_{max}/\Delta_{min} = 3$, $\Delta_{min} = 0,001$ м, $\omega = 30$ с $^{-1}$, $d_0 = 0,004$ м. Определены параметры дезинтегратора, позволяющие выводить из зоны измельчения в тангенциальный разгрузочный патрубок более тонкие фракции измельченного материала ($d_1 = 0,012$ мм): $\Delta_1 = 0,020$ м, $\alpha_1 = 50^\circ = 5\pi/18$ рад., $\omega = 30$ с $^{-1}$, $R = 0,120$ м.

4. Получено математическое выражение для определения времени τ_0 пребывания частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов. Определены параметры дезинтегратора для достижения минимального значения времени ($\tau_0 = 0,0036$ с): $\omega = 30$ с $^{-1}$, $\alpha = 0^\circ$, $\Delta = 0,02$ м, $R_k = 0,16$ м, $R_{ш} = 0,02$ м. Получено математическое выражение, которое позволило установить, что при прохождении четырех последовательных рядов ударных элементов концентрация выделенной компоненты смеси на выходе составляет 0,57 от её начального значения. Это подтверждает эффективность предлагаемой конструкции дезинтегратора для процессов совместного измельчения и смешивания.

5. Получено математическое выражение, описывающее изменение угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока при переходе в тангенциаль-

ный разгрузочный патрубок, что критично для минимизации завихрений и повышения эффективности выгрузки. Установлено, что для полного разворота потока на 90° (1,57 рад.) требуется определенная длина патрубка x , зависящая от его размера d и расстояния x_l , на котором происходит поворот вектора скорости. Определены параметры дезинтегратора, при которых требуется минимальная длина патрубка ($x = 0,6$ м): $d = 0,04$ м, $x_l = 0,1$ м.

6. С использованием разработанного лабораторного измельчительного комплекса на базе дезинтегратора проведены экспериментальные исследования процесса измельчения и смешивания известняка с глиной. В результате поисковых экспериментов подтверждена эффективность использования усовершенствованного дезинтегратора. Вывод о преимуществах нового конструктивно-технического решения основан на сравнительном анализе исследуемых выходных параметров дезинтегратора при совместном измельчении известняка и глины: зафиксировано увеличение на 14 % производительности по готовому продукту Q_R , а также снижение на 12 % удельных энергозатрат q и на 26 % – коэффициента неоднородности получаемой смеси V_C . Зависимости функций отклика (Q_R , q , V_C) от варьируемых факторов (ω_1 , ω_2 , $\Delta_{max}/\Delta_{min}$) описаны математической моделью в виде уравнений регрессии, полученных по результатам многофакторного эксперимента. Установлены диапазоны значений факторов ($\omega_1 = 1250 - 1500$ мин⁻¹; $\omega_2 = 1250 - 1600$ мин⁻¹; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,25 - 2,75$), соответствующих рациональным режимам работы дезинтегратора при совместном измельчении известняка и глины. Выход установки на данные режимы обеспечивает достижение максимальной производительности по готовому продукту, равной $Q_R = 82,4$ кг/ч (при $\omega_1 = 1500$ мин⁻¹; $\omega_2 = 1600$ мин⁻¹; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,75$). При этом минимальные удельные энергозатраты составляют $q = 15$ кВт·ч/т (при $\omega_1 = 1500$ мин⁻¹; $\omega_2 = 1600$ мин⁻¹; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,75$), минимальный коэффициент неоднородности смеси – $V_C = 6,9$ % (при $\omega_1 = 1250$ мин⁻¹; $\omega_2 = 1250$ мин⁻¹; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,5$).

7. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей исследуемых параметров продемонстрировало их высокую корреляцию. Величина расхождения между результатами не превышает 10 %, что укладывается в допустимые пределы.

8. Разработана инженерная методика расчета дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов, позволяющая рассчитать его основные конструктивно-технологические параметры.

9. Предложено внедрение дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов в технологическую линию для получения рядового керамического кирпича методом полусухого формования на предприятии ОАО «ОКМ» (г. Россосы). На основании расчёта экономической эффективности установлено, что экономический эффект предложенного решения за 5 лет реализации проекта составит 1382,8 тыс. руб. Срок окупаемости проекта – 1,36 лет. Экономический эффект достигается за счет: повышения производительности дезинтегратора по готовому продукту на

14 %, снижения удельных энергозатрат на 12 %, снижения коэффициента неоднородности смеси на 26 %, что, в свою очередь, приводит к повышению конкурентоспособности дезинтегратора ($K = 1,4443 > 1$) и керамического кирпича ($K = 1,235 > 1$).

10. Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры «Механическое оборудование» БГТУ им. В. Г. Шухова.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в конструкторских бюро и на машиностроительных предприятиях при проектировании, расчете и модернизации дезинтеграторов, а также в образовательном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов» и инженеров по специальности 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в расширении сырьевой базы, заключающейся в исследовании эффективности работы усовершенствованного дезинтегратора при обработке других типов многокомпонентных смесей, в том числе повышенной влажности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Семикопенко, И.А. Определение мощности, затрачиваемой на измельчение частицы между двумя коническими поверхностями / И. А. Семикопенко, В. В. Флоринский, **Д. А. Беляев**, А. С. Маняхин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – №5. – С. 78-81.

2. Семикопенко, И.А. Расчет геометрических параметров цилиндрического калибрующего устройства в периферийной части дезинтегратора / И. А. Семикопенко, С. С. Латышев, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев** // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – №6. – С. 85-88.

3. Семикопенко, И. А. Определение условия выхода частицы материала в тангенциальный патрубок дезинтегратора / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев**, С. И. Ханин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – №11. – С. 122-125.

4. Семикопенко, И. А. Теоретическое исследование процесса смешения различных компонентов в рабочей камере дезинтегратора / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев** // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 7. – С. 102-107.

5. Семикопенко, И. А. Кинетика разрушения частиц материала в дезинтеграторе в рамках статистического подхода / И. А. Семикопенко, С. С. Латышев, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев** // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 9. – С. 121-125.

6. Семикопенко, И. А. Описание процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в плоскости, перпендикулярной оси вращения роторов / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев**, В. О. Чужинов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2020. – № 1. – С. 110-114.

7. Семикопенко, И. А. Описание процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в плоскости, перпендикулярной оси вращения роторов в тангенциальный полубесконечный патрубок / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев** // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2020. – № 4. – С. 108-113.

8. Семикопенко, И. А. Описание процесса движения частицы материала в междурядном пространстве дезинтегратора с изменяющимся междурядным расстоянием / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев** // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2020. – № 8. – С. 96-100.

9. Семикопенко, И. А. Центробежная противоточная мельница с классификацией материала в зоне загрузки / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, **Д. А. Беляев** // Цемент и его применение. – 2024. – №1. – С. 68–69.

В издании, индексируемом в международной базе данных Scopus:

10. Semikopenko, I. A. Theoretical Study of the kinetics of material destruction in a disintegrator with a preliminary grinding unit / I. A. Semikopenko, **D. A. Belyaev** // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 160. – P. 161-167.

В объектах интеллектуальной собственности:

11. Пат. 2630936 РФ, МПК В 02 С 13/22. Дезинтегратор / И. А. Семикопенко, Т. Л. Горбань, А. Е. Ченцов, **Д. А. Беляев**, И. О. Трофимов // заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – № 2016121539; заявл. 31.05.2016; опубл. 14.09.2017. – Бюл. №26.

12. Пат. 2745609 РФ, МПК В 02 С 13/22. Дезинтегратор / И. А. Семикопенко, А. Э. Севостьянов, Е. А. Бороздин, **Д. А. Беляев** // заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – № 2020134378; заявл. 20.10.2020; опубл. 29.03.2021. – Бюл. №10.

13. Пат. 2840465 РФ, МПК В 02 С 13/22. Центробежный дисковый измельчитель / И.А. Семикопенко, **Д. А. Беляев**, Н. А. Сечкарёв, Д. И. Семикопенко// заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – № 2024138253; заявл. 18.12.2024; опубл. 26.05.2025. – Бюл. №15.

Подписано в печать 01.10.2026 г.

Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № 112

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В. Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46