

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доц.

Семикопенко И.А.

Белгород, 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ.....	13
1.1 Анализ технологического оборудования для измельчения и смешивания ..	13
1.1.1 Шаровые мельницы	14
1.1.2 Молотковые мельницы.....	15
1.1.3 Вибрационные мельницы.....	17
1.1.4 Среднеходные мельницы	19
1.1.5 Дезинтеграторы.....	21
1.2 Современные конструкции дезинтеграторов и основные направления их совершенствования	23
1.3 Существующие методики расчёта конструктивно-технологических параметров дезинтегратора.....	32
1.4 Предлагаемое конструктивно-техническое решение.....	36
1.5 Цель и задачи исследований	38
1.6 Выводы по главе.....	39
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	41
2.1 Теоретическое исследование процесса смешивания различных компонентов в рабочей камере дезинтегратора	41
2.1.1 Расчёт массовой пропускной способности дезинтегратора	42
2.1.2 Расчёт концентрации выделенной компоненты смеси на выходе из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок....	47
2.2 Кинетика разрушения частиц материала в дезинтеграторе в рамках статистического подхода.....	54
2.3 Описание процесса движения частицы измельчаемого материала в пространстве между рядами ударных элементов	61

2.4 Описание процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок	66
2.5 Выводы по главе.....	74
ГЛАВА 3. ПЛАН, ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	77
3.1 Цель и задачи экспериментальных исследований.....	77
3.2 Описание лабораторной установки дезинтегратора	79
3.3 Физико-механические свойства материалов, используемых в экспериментальных исследованиях	84
3.4 Описание методики проведения экспериментов	86
3.4.1 Определение производительности по готовому продукту	87
3.4.2 Определение коэффициента неоднородности получаемой смеси.....	89
3.4.3 Определение удельных энергозатрат лабораторной установки дезинтегратора.....	91
3.5 План многофакторного эксперимента	92
3.6 Выводы по главе.....	95
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ	
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ	
ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ	
ЭЛЕМЕНТОВ	97
4.1 Исследование параметров работы дезинтегратора	97
4.2 Регрессионный анализ	101
4.3 Зависимость производительности по готовому продукту от варьируемых факторов.....	103
4.4 Зависимость удельных энергозатрат от варьируемых факторов.....	109
4.5 Зависимость коэффициента неоднородности от варьируемых факторов....	119
4.6 Определение рациональных режимов процессов измельчения и смешивания в дезинтеграторе	129
4.7 Сравнение экспериментальных и теоретических результатов.....	132
4.8 Выводы по главе.....	136

ГЛАВА 5. ПРЕДЛОЖЕНИЕ К ВНЕДРЕНИЮ В ПРОИЗВОДСТВО ДЕЗИНТЕГРАТОРА С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	138
5.1 Технологический регламент на эксплуатацию дезинтегратора.....	138
5.2 Технологическая схема производства керамического кирпича методом полусухого формования.....	144
5.3 Определение физико-механических свойств лабораторных образцов керамического кирпича.....	148
5.4 Инженерная методика расчёта усовершенствованного дезинтегратора.....	153
5.5 Технико-экономическая эффективность использования дезинтегратора...	160
5.6 Выводы по главе.....	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	163
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	191
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	192

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Жилищное и дорожное строительство занимают важное место в социально – экономической системе всех стран. Для РФ выше сказанное наиболее актуально ввиду её большой территории, исчисляемой десятками тысяч километров, и требующей соответствующих объёмов строительства качественных дорог. Кроме этого порядка 70% населения нашей страны нуждается в улучшении жилищных условий и в соответствии с государственной программой «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» увеличение объёмов жилищного строительства является одним из важнейших направлений политики РФ [80, 82]. Вышесказанное обуславливает необходимость увеличения производства строительных материалов и изделий в 1,5 – 2 раза.

В масштабах отечественного электроэнергетического комплекса на процессы измельчения и смешивания сырья приходится значительная доля общего объема генерации электроэнергии [39]. Ключевыми факторами, определяющими высокий уровень ресурсных затрат, выступают конструктивно-технологические параметры используемых машин и установок, а не объёмы производства как таковые. В данных условиях стратегическим приоритетом для промышленности строительных материалов (ПСМ) становится освоение и совершенствование оборудования нового поколения с минимальным удельным энергопотреблением [6, 12, 87].

С постоянным ростом объёмов производства строительных материалов повышаются и требования к их качеству, а вместе с этим и к исходным компонентам, которые напрямую влияют на технологические свойства получаемых материалов. Именно с этим связано увеличение объёмов производства порошков, дисперсность которых не превышает 200 мкм [40]. Энергозатраты при этом также растут. Так, например, для получения порошка с дисперсностью частиц менее 200 мкм энергозатраты составляют 50 – 85 кВт·ч/т, а при необходимости получения порошка с дисперсностью частиц менее 10 мкм, энергозатраты резко возрастают до 200 кВт·ч/т [45, 79, 112].

Основным типом измельчителей, применяемым на предприятиях нашей страны, являются шаровые, молотковые, среднеходные, вибрационные мельницы. Для смешивания сыпучих компонентов используют лопастные, ленточные и шнековые смесители [86]. С целью снижения металлоемкости производственных линий, затрат на электроэнергию, эксплуатацию оборудования существуют примеры использования шаровых и молотковых мельниц в качестве измельчителей-смесителей [121]. 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. Наиболее характерными измельчителями данного типа являются дезинтеграторы [11]. Связано это с тем, что при измельчении материала, например, в шаровых мельницах основная часть подводимой электроэнергии расходуется на перемещение и подъём мелющих тел, тогда как на сам процесс разрушения материала идёт не более 20 % мощности [12]. Ввиду этого способ помола материала посредством динамического удара является наиболее эффективным, так как позволяет снизить мощность оборудования, увеличить их производительность и получить высококачественный материал. Кроме этого, данные измельчители имеют меньшие габариты, массу и стоимость [14, 137]. 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 [110, 111] и производителей дезинтеграторов, например, завода «Техприбор» (г. Тула) [66, 140]. В данной работе приведены результаты исследований процесса измельчения и смешивания в дезинтеграторе. Об использовании этих машин в сельскохозяйственной отрасли и строительстве известно ещё с 40-х годов прошлого столетия. В нашей стране развитие дезинтеграторной технологии измельчения материалов пришлось на период с

конца 50-х и начала 80-х годов. Наибольший вклад из советских учёных в развитие дезинтеграторов внёс И. А. Хинт [109, 110, 111].

Современная научная база, посвященная дезинтеграторам, располагает внушительным объемом теоретических, экспериментальных исследований и конструктивно-технических решений [14, 15, 50, 51]. Многообразие модификаций дезинтеграторов препятствует созданию универсальной методики их инженерного расчета.

Широкая номенклатура машин дезинтеграторного типа не снимает актуальности двух ключевых проблем: обеспечения однородности гранулометрического состава измельчаемого материала и высокого качества смешивания многокомпонентных систем. Решение данных задач диктует необходимость разработки принципиально новых конструктивно-технических решений для дезинтеграторов, позволяющих существенно повысить их эксплуатационные показатели в различных отраслях промышленности [9, 10].

Степень разработанности темы исследований. 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 [110, 111]. 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 завод «Техприбор» (г. Тула) [138, 140].

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 [17], И. Р. Клейса, В. Н. Блиничева [9], Н. М. Смирнова, В. Б. Лапшина [60, 61, 62], М. Я. Сапожникова [86], В. С. Богданова [12, 13], Г. С. Ходакова [112] 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 [102] и др.

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 исследований.

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.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.21 по следующим областям исследований:

1. Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов.

6. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и технологических процессов и оценки их экономической и энергетической эффективности и ресурса.

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 исследований. 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 журнале, индексируемом международной базой 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ

1.1 Анализ технологического оборудования для измельчения и смешивания

От выбора оборудования для измельчения и смешивания, а также применяемых технологий, во многом зависит то, насколько данные процессы в производстве строительных материалов будут эффективны. На основе научных исследований, изучения потребностей строителей и населения разрабатываются соответствующие стандарты, которые определяют размерные ряды основных видов машин. Происходит постоянное изменение и совершенствование конструкции машин. Минимальный размерный ряд машин значительно упрощает их производство, повышает надежность и облегчает эксплуатацию строительной техники и оборудования [8, 103, 114]. В настоящей работе рассмотрены измельчители и измельчители-смесители, наиболее распространенные в промышленности строительных материалов. Измельчение в данных машинах является основным процессом, смешивание – вспомогательным.

Машины для измельчения поддаются классификации по ряду ключевых признаков, одним из которых является преобладающий способ разрушения материала, заложенный в основу работы конкретного агрегата. По способу разрушения материала различают следующие типы машин [1, 56, 123]:

- работающие по принципу раскалывания;
- работающие по принципу истирания и раздавливания;
- работающие по принципу раздавливания;
- работающие по принципу динамического (ударного) воздействия.

Необходимо подчеркнуть, что данная классификация носит условный характер, поскольку в реальных производственных условиях рабочие органы большинства измельчителей воздействуют на материал комплексом способов его разрушения [88].

При разработке и создании оборудования для измельчения большое внимание должно уделяться таким факторам, как соблюдение допустимого уровня шума, вибрации, запыленности, обеспечения возможности их включения в автоматические линии цехов [2, 13]. Кроме этого конструкции машин должны быть максимально простыми, надёжными, экономичными и обеспечивать высокие технологические показатели [19, 119].

На современном рынке представлено большое разнообразие мельниц, используемых в технологических линиях предприятий строительной индустрии для измельчения, а также для измельчения и смешивания. Среди них наибольшее применение получили следующие типы мельниц: шаровые, вибрационные, среднеходные, молотковые, дезинтеграторы.

1.1.1 Шаровые мельницы

Наибольшим спросом, среди мельниц для тонкого помола, пользуется шаровая мельница, схема которой представлена на рисунке 1.1.

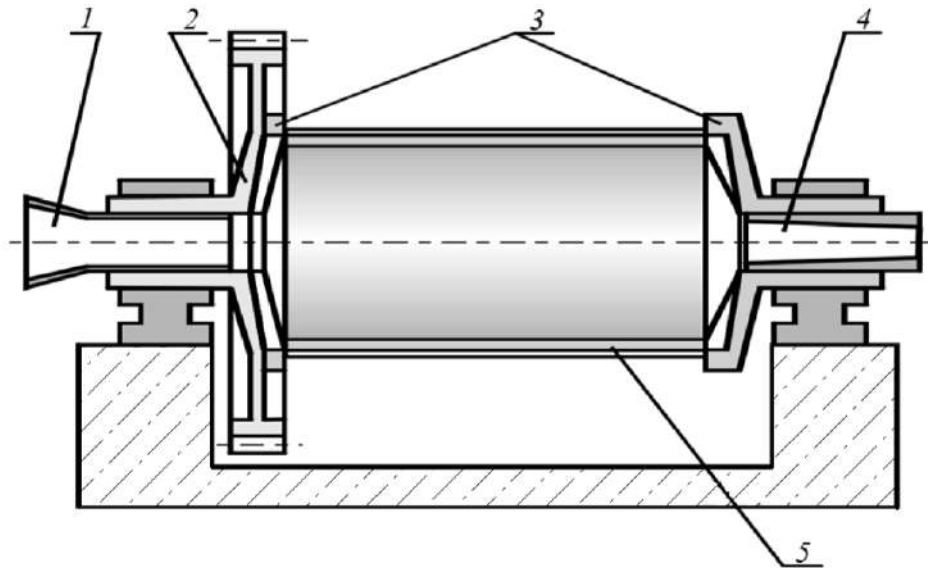


Рисунок 1.1 Схема шаровой мельницы:

1 – цапфа загрузочная; 2 – венец зубчатый; 3 – днища; 4 – цапфа разгрузочная; 5 – барабан

Шаровые мельницы отличаются многообразием конструктивных решений, которые в основном отражают специфику расположения различных, дополнительно интенсифицирующих устройств в рабочей зоне: с роторным интенсификатором, гладким катком, маятником, наклонными дисками,

электромагнитным вращающимся якорем и т. д. [18, 108]. Широкое распространение они получили благодаря надёжности конструкции и возможности получения продукта однородной крупности. Шаровые мельницы применяются как для сухого, так и для мокрого помола, а также для гомогенизации многокомпонентных шихт. Коэффициент неоднородности получаемой смеси может достигать 4 % [121, 130]. Эффективность работы шаровых мельниц определяется частотой вращения барабана, характеристиками мелющих тел, коэффициентом заполнения и физико-механическими свойствами сырья [19, 134].

При обработке глины, известняка шаровые мельницы обеспечивают высокую тонкость помола: удельная поверхность измельченного продукта составляет 2500 – 3500 см²/г, что соответствует остатку на сите № 008 в пределах 8 – 12 %. Производительность промышленных агрегатов варьируется в широком диапазоне (от 5 до 100 т/ч и более) [6, 18].

Однако шаровые мельницы имеют значительные габариты, массу, низкий КПД – не более 1...2 % (при обработке глины, известняка), высокую удельную энергоёмкость – 50...70 кВт·ч/т (при обработке глины, известняка), высокий уровень износа мелющих тел и бронеплит, который в среднем составляет 1,1 кг/т [3,120]. Также работа шаровых мельниц сопровождается высоким уровнем шума – порядка 150 Дб [19, 38, 108]. Вышеуказанные недостатки, которые отрицательно сказываются на стоимости продукции, качестве условий труда дают предпосылки к поиску новых конструкторско-технических решений.

1.1.2 Молотковые мельницы

Молотковые мельницы (рис. 1.2) применяют для грубого и тонкого измельчения материалов, влажность которых составляет не более 15 % [5, 41]. Также возможно их применение для получения двухкомпонентных сухих смесей с коэффициентом неоднородности менее 15 % [75, 122].

Область их применения весьма значительна, что связано с их сравнительно низкими затратами электроэнергии. Например, удельные энергозатраты молотковых мельниц в 1,5 – 2 раза ниже, чем у шаровых. При измельчении мягких и среднетвердых пород, таких как глина и известняк, удельные энергозатраты составляют в среднем 25 – 40 кВт·ч/т [71, 75, 83].

К достоинствам таких мельниц относят простоту конструкции, компактность пылеприготовительной установки, возможность регулирования производительности и тонкости помола за счёт изменения частоты вращения питателя 2 и изменения зазора между отражательными элементами крестовины 10 и стенкой камеры помола 6 соответственно [5, 7].

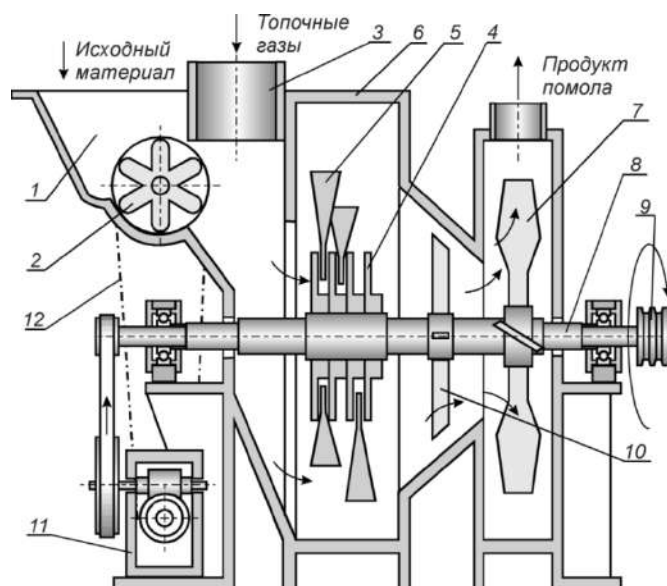


Рисунок 1.2 Схема молотковой мельницы:

1 – бункер загрузочный; 2 – питатель звёздчатый; 3 – короб горячего воздуха; 4 – ротор;
5 – молотки; 6 – камера помола; 7 – вентилятор; 8 – приводной вал; 9 – шкив; 10 – крестовина;
11 – редуктор; 12 – цепная передача

Производительность промышленных установок по известняку достигает 20 – 60 т/ч, а получаемый продукт характеризуется удельной поверхностью 1500 – 2200 см²/г с остатком на сите № 008 в пределах 15 – 25 % [7, 44, 75].

Основными недостатками молотковых мельниц являются сложность эксплуатации пневматической системы отбора продуктов помола, сравнительно быстрый износ молотков и необходимость их замены через 300 – 600 часов работы [48, 68, 107].

1.1.3 Вибрационные мельницы

Вибрационные мельницы являются одним из наиболее эффективных типов мельниц для тонкого помола различных материалов строительной индустрии. Например, их используют для помола портландцемента, силикатов, добавок к буровым растворам, а также компонентов для химической, лакокрасочной и горно-обогатительной отраслей [19]. Разрушение материала в них происходит за счет ударного и истирающего воздействия мелющих тел, что позволяет резко интенсифицировать процесс, а вследствие равномерной и значительной циркуляции мелющих тел получается продукт однородной крупности [115, 128]. При этом использование данных типов мельниц для смешивания материалов считается нецелесообразным, так как получаемая смесь имеет коэффициент неоднородности не менее 15 % [128].

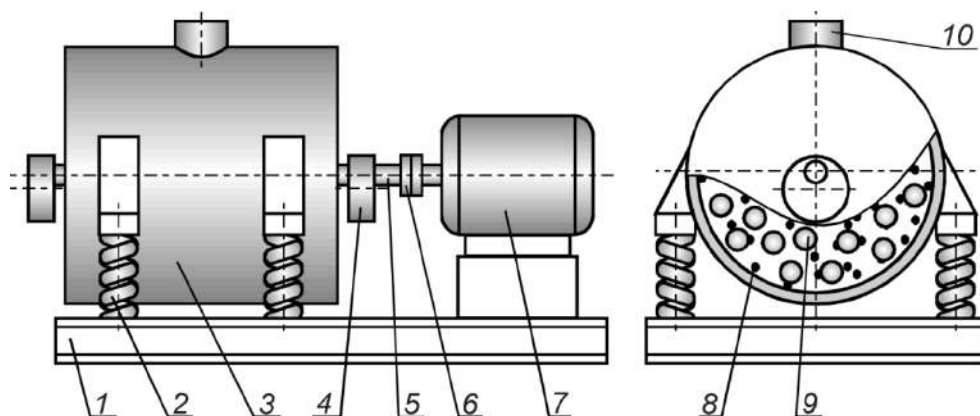


Рисунок 1.3 Схема вибрационной мельницы:

1 – станина; 2 – пружинные опоры; 3 – камера помола; 4 – вибровозбудитель; 5 – приводной вал; 6 – упругая муфта; 7 – электродвигатель; 8 – измельчаемый материал; 9 – мелющие тела

Эффективность эксплуатации вибрационных мельниц во многом зависит от частоты и амплитуды ее колебаний, геометрии и размеров мелющих тел, а также от материала, из которого изготовлены мелющие тела. Не менее важен показатель заполнения рабочей камеры мельницы мелющими телами и их количественное соотношение с объемом обрабатываемого сырья. Мельницы данного типа могут быть периодического и непрерывного действия, работать в условиях сухого и мокрого помола. Известны конструкции вибрационных мельниц с классифицирующим устройством и без него [19, 27].

Эффективность воздействия мелющих тел на обрабатываемое сырьё, расход электрической энергии, величина усилий в узлах вибрационной мельницы напрямую зависят от частоты и амплитуды колебаний корпуса. При этом частота колебаний корпуса имеет прямую зависимость от частоты вращения приводного вала. Величина амплитуды, равная половине общего размаха, определяется следующими показателями: моментом вибровозбудителя, общей массой заполненного корпуса с вибровозбудителем, массой мелющих тел, массой и консистенцией обрабатываемого сырья, а также частотой колебаний корпуса и соответственно частотой вращения приводного вала [115, 128]. Известно, что в рамках одной и той же величины ускорения процесс измельчения в вибрационной мельнице протекает значительно интенсивнее при переходе на повышенные частоты при малой амплитуде, нежели при обратном соотношении параметров. Вибрационные мельницы, поставляемые ВНИИТИСМ комплектуются двумя сменными вибровозбудителями. Один для работы мельницы при 1500 колебаний в минуту, второй – при 3000 колебаний в минуту. При этом максимальная амплитуда составляет не более 3–4 мм для частоты колебаний корпуса, равной 1500 колебаний в минуту и не более 2 мм для частоты колебаний корпуса, равной 3000 колебаний в минуту. Коэффициент заполнения корпуса вибрационной мельницы определяется отношением объема мелющих тел и сырья к полному объёму корпуса. В режиме сухого помола рекомендованные значения коэффициента заполнения находятся в диапазоне 0,75–0,85. В режиме мокрого помола от 0,7 до 0,75 [19, 133].

Максимальная производительность мельниц данного типа достигается при соотношении 1:1 объема обрабатываемого сырья к свободному объёму пространства между мелющими телами, либо при соотношении 2,5:1 общего объема мелющих тел к объёму сырья [56].

При одной и той же мощности привода производительность вибрационных мельниц в 2 раза больше производительности шаровых мельниц. Вибрационные мельницы менее требовательны к влажности материала. Так, например, при помоле в шаровой мельнице требуется предварительная сушка глины до

влажности 2 – 3 %, а в вибрационной мельнице можно измельчать глину с влажностью до 6 – 8 %. При измельчении глины вибрационные мельницы позволяют достигать высокой дисперсности продукта с удельной поверхностью 3000 – 5000 см²/г, что соответствует остатку на сите № 008 менее 2 – 5 %. Однако, такая эффективность сопряжена с высоким потреблением электроэнергии: удельные энергозатраты составляют 35 – 56 кВт·ч/т. Производительность мельниц данного типа сравнительно невелика и составляет 0,3 – 0,5 т/ч [1, 115].

Одним из достоинств вибрационных мельниц является возможность их использования для сухого и мокрого помола. Также мельницы данного типа отличаются компактностью, простым обслуживанием и ремонтом, регулировкой тонкости помола и сравнительно высоким КПД, который варьируется в зависимости от условий работы мельницы в пределах 50 – 80 % [19].

Существующие недостатки мельниц данного типа определяют необходимость совершенствования их конструкций. К основным из них следует отнести ограничение по крупности исходного материала (не более 2 мм), необходимость охлаждения корпуса мельницы и высокий уровень износа мелющих тел – 0,7...1,3 кг/т [115, 128].

1.1.4 Среднеходные мельницы

Среднеходные мельницы (рис. 1.4) применяют в основном для помола материалов слабой и средней прочности, например комовой извести, гипса, сухой глины, графита, каолина, угля. По конструкции различают шаровые (МШС) и валковые (МВС). Мельницы данного типа имеют рабочие органы в виде вращающихся шаров или конических валков, которые в процессе работы прижимают слой обрабатываемого материала к вращающемуся радиальному столу. Таким образом, за счет воздействия истирающих и раздавливающих сил происходит измельчение материала. Ввиду специфики силового воздействия и кинематики рабочей зоны, среднеходные мельницы не могут эффективно использоваться для качественного смешивания компонентов [6, 56].

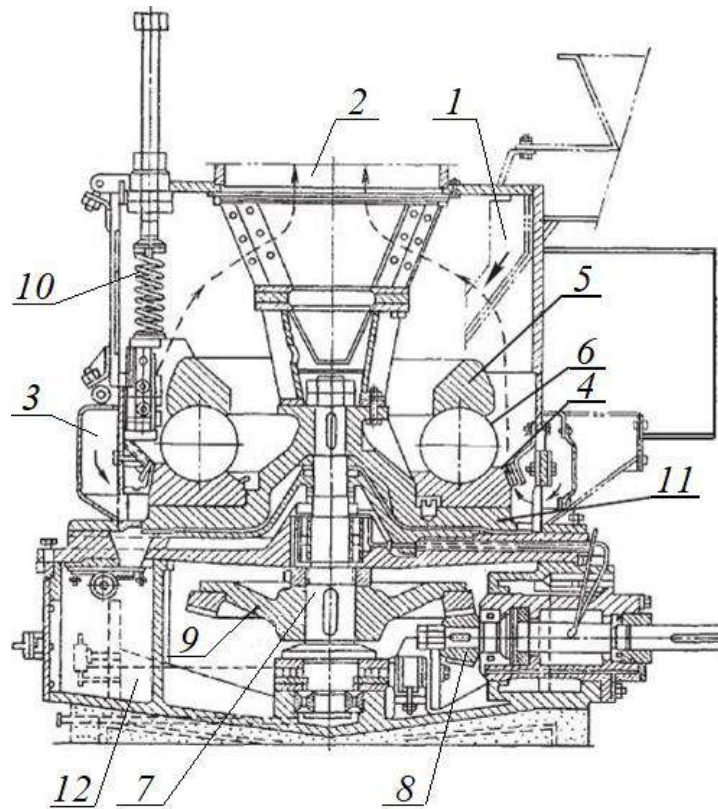


Рисунок 1.4 Схема среднеходной шаровой мельницы:

- 1 – точка подачи материалы; 2 – вращающийся сепаратор; 3 – короб подачи горячего воздуха;
 4 – нижнее размольное кольцо; 5 – верхнее размольное кольцо; 6 – мелющие шары;
 7 – вал мельницы; 8, 9 – конические шестерни привода; 10 – нажимные пружины;
 11 – размольный стол; 12 – сборник металлических отколов

При обработке глины и известняка среднеходные мельницы обеспечивают производительность в диапазоне от 10 до 50 т/ч. Получаемый продукт обладает высокой дисперсностью с удельной поверхностью 2000 – 3000 см²/г, что соответствует остатку на сите № 008 в пределах 10 – 15 % [135, 143].

Среднеходные мельницы являются компактными размольными устройствами, имеют широкий диапазон величины удельной энергоёмкости – 10...60 кВт·ч/т. К достоинствам данных мельниц стоит отнести низкий уровень шума – не более 80 дБ и возможность настройки тонкости готового продукта [19]. Недостатки среднеходных мельниц следующие: большие габариты, сложность в эксплуатации и ремонте, повышенный износ рабочих органов (шаров, конических валков, радиального вращающегося стола); чувствительность к попаданию в мельницу кусков металла; большое аэродинамическое сопротивление мельницы (6500 Па) из за чего в пылесистемах с среднеходными мельницами приходится

устанавливать мельничные вентиляторы – возрастают затраты электроэнергии на собственные нужды; ограниченность по измельчаемому материалу – для размолла многозольных, высокосернистых и влажных материалов они не пригодны. Многозольные и сернистые топлива вызывают износ меющих органов, а влажные – размазываются по столу [23, 117, 135].

1.1.5 Дезинтеграторы

Дезинтеграторы (рис. 1.5) имеют множество конструктивных модификаций, ввиду чего их широко используют в различных отраслях промышленности для измельчения хрупких материалов, таких как известняк, трепел, глина, мел, уголь и др. [77, 78, 84, 139].

Основными конструктивными элементами дезинтеграторов являются корпус 9, два диска 1 и 2, вращающихся в противоположных друг другу направлениях. На дисках 1 и 2 установлены ударные элементы 3. Привод дисков индивидуальный и представляет собой электродвигатель (на рис. 1.5 не показан) и приводной вал 6, 7, установленный в подшипниковых узлах 8. Ударные элементы 3 каждого ряда для увеличения жесткости соединены между собой кольцами 4. Материал для помола подается через воронку 5, а выгружается через разгрузочный патрубок 10. Диски, ударные элементы и кольца в сборе называют роторами. Вращаются роторы разнонаправленно с высокой частотой вращения (до 4500 мин⁻¹) [11]. Ударные элементы роторов подвержены высокому износу (0,2 кг/т – 0,8 кг/т), поэтому их изготавливают из высокомарочных, износостойких сталей [51, 81, 116, 124].

Измельчение материала происходит под воздействием ударных, истирающих и частично разрывающих нагрузок, значения которых возрастают в каждом последующем ряду, что соответствует селективности процесса измельчения [17, 54, 65].

К достоинствам применения дезинтеграторов относятся их малые габариты, мобильность, простота перенастройки, доступный уровень капитальных затрат,

непрерывный характер процесса обработки материалов и высокий потенциал для автоматизации. Агрегаты данного типа позволяют гибко менять параметры внутренней среды, вводить добавки прямо в зону измельчения и смешивания, а также задействовать в работе нагнетаемый роторами воздушный поток. При этом дезинтеграторы характеризуются сравнительно низкой себестоимостью измельчения и смешивания [85, 127].

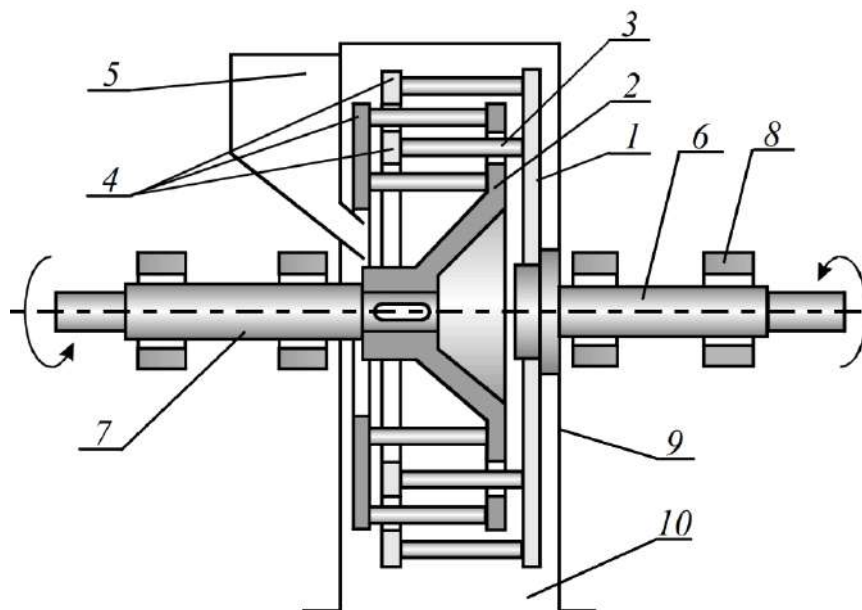


Рисунок 1.5 Схема дезинтегратора:

1, 2 – диски; 3 – ударные элементы; 4 – кольца; 5 – воронка;
6, 7 – приводные валы; 8 – подшипниковые узлы; 9 – корпус; 10 – разгрузочный патрубок

Сравним основные технические характеристики шаровой мельницы и дезинтегратора аналогичной мощности. Шаровая мельница «СМ6008А» весом в 3950 кг, из которой на мелющие тела приходится до 1700 кг, установленной мощностью 18,5 кВт имеет производительность (при измельчении известняка) до 1,5 т/ч, с остатком на сите № 0071 не более 20 %. Максимальный размер исходного продукта составляет 20 мм. Дезинтегратор «Ударник 18» весом 375 кг и установленной мощности 18,5 кВт имеет производительность (при измельчении известняка) до 3 т/ч, с остатком на сите № 0071 не более 30 %. Таким образом, дезинтегратор, весящий более чем в 10 раз меньше, имеет производительность в 2 раза превышающую производительность шаровой мельницы [14, 22, 126]. Как отмечалось ранее, объясняется это тем, что в шаровых мельницах измельчение

преимущественно происходит за счёт истирания, а в дезинтеграторах посредством динамического удара, являющимся наиболее эффективным способом измельчения [105, 106].

Также существуют факторы, сдерживающие использование дезинтеграторов более широко, чем это есть в настоящее время. Существуют большие проблемы с масштабированием дезинтеграторов, вызванные перегрузками роторов. Также имеет место значительный износ ударных элементов дезинтегратора, который увеличивается пропорционально росту скорости и крупности обрабатываемых частиц и сравнительно небольшое содержание готового продукта на выходе из камеры помола, что требует возврата материала на доизмельчение [57, 58, 101, 125].

Однако, несмотря на приведенные недостатки, дезинтеграторы остаются перспективным оборудованием для грубого и тонкого помола твердых сыпучих материалов [64]. Помимо непосредственного измельчения, дезинтегратор также способен эффективно решать задачи смешивания многокомпонентных продуктов. Данная особенность объясняется тем, что в сравнении с емкостными смесителями, в дезинтеграторе частицы материалов взаимодействуют друг с другом в небольшом пространстве, которое образуют смежные ряды ударных элементов, вращающиеся в противоположных направлениях. В данном пространстве перемешивание материалов происходит в турбулизированном потоке аэродисперсной среды, где исключено возникновение застойных зон, что предотвращает возникновение локальных не промешанных участков. [10, 61, 111].

1.2 Современные конструкции дезинтеграторов и основные направления их совершенствования

На современных российском и зарубежном рынках представлено большое количество производителей дезинтеграторов. Из российских наиболее известны такие предприятия как завод «ТЕХПРИБОР»; «МАРИЙАГРОМАШ»; «АЛТАЙСТРОЙМАШ»; «Тульские машины» [140, 141]. Однако, несмотря на их

востребованность, анализ конструктивных схем выявляет ряд ограничений, препятствующих достижению максимальной эффективности.

Ведущим российским предприятием в сфере производства дезинтеграторов и другого измельчительного оборудования является завод «ТЕХПРИБОР» (г. Тула). Коллективом данной компании выполнено много интересных работ в области усовершенствования конструкций дезинтеграторов, нашедших широкое применение. Например, для тонкого и среднего помола используют дезинтегратор «ГОРИЗОНТ-ДОМИНАТОР-9.5», использование которого ограничено твердостью материалов до 5 единиц по шкале Мооса [66, 140].

Конструкция данного дезинтегратора (рис. 1.6) включает раму 3, камеру помола, которая сформирована стационарной частью корпуса 1 и выдвижной 2 с загрузочным патрубком 6. Выдвижная часть корпуса 2 закреплена на роликах 5, которые перемещаются вдоль направляющих 4.

Вращательное движение приводным валам 11 и 12 и установленным на них большому и малому роторам сообщается от электродвигателей 7 и 8 соответствующими клиноременными передачами 9, 10.

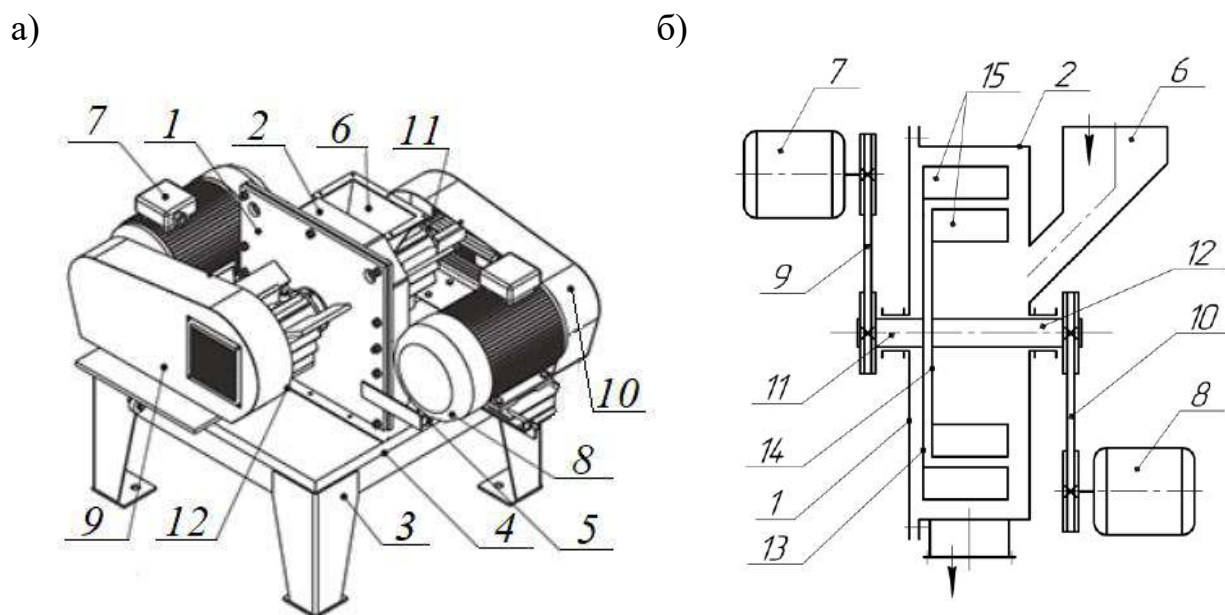


Рисунок 1.6 Дезинтегратор «ГОРИЗОНТ-ДОМИНАТОР-9.5»:

а) вид общий; б) схема кинематическая:

1 – стационарная часть корпуса; 2 – выдвижная часть корпуса; 3 – рама; 4 – направляющие; 5 – ролики; 6 – загрузочный патрубок; 7, 8 – электродвигатели; 9, 10 – клиноременная передача; 11, 12 – приводные валы; 13, 14 – диски роторов; 15 – ударные элементы

Большой и малый роторы служат рабочими органами дезинтегратора рассматриваемой конструкции и состоят из дисков 13, 14 с радиальными пазами, предназначенными для установки ударных элементов 15, геометрия которых подобна лопастям. Пазы в дисках 13 и 14 выполнены по концентрическим окружностям определенных диаметров. Диаметры расположения пазов определены из следующего условия: каждый последующий ряд ударных элементов должен располагаться внутри предыдущего [66].

Процесс дробления в описываемом дезинтеграторе протекает в такой последовательности: куски измельчаемого материала подаются в камеру помола посредством загрузочного патрубка 6 и направляется к центру малого ротора, а именно в зону действия внутреннего круга ударных элементов. Уже при первом контакте с ударными элементами происходит разрушение кусков материала. Последующее движение частиц в помольной камере дезинтегратора происходит в аэродисперсном состоянии. При движении частиц измельчаемого материала от центра к периферии малого ротора, они взаимодействуют друг с другом и с ударными элементами встречно вращающегося большого ротора. После прохождения всех рядов ударных элементов, частицы материала направляются в пространство камеры помола, откуда выводятся воздушным потоком [66, 140].

Применение однорядных роторов с ударными элементами прямоугольной формы направлено на увеличение их срока службы и снижение удельного расхода электроэнергии. Достигается это уменьшением количества рядов ударных элементов и снижением количества частиц, отскакивающих к предыдущему ряду, что снижает время пребывания частиц в зоне помола. Применение ударных элементов прямоугольной формы обусловлено тем, что уменьшение количества их рядов приводит к снижению качества помола ввиду проскока частиц без ударного воздействия. Плоские ударные элементы за счёт сравнительно большей площади рабочей поверхности и оптимального их расположения позволили снизить проскок частиц. Однако данный тип дезинтеграторов применим для грубого помола, так как не позволяет получить готовый продукт с размером частиц менее 200 мкм. Также на прямоугольные

ударные элементы налипают большее количество измельчаемого материала, что также является их недостатком [140].

В таблице 1.1 представлены основные технические характеристики дезинтегратора «ГОРИЗОНТ-ДОМИНАТОР-9.5».

Таблица 1.1 Технические характеристики дезинтегратора «ГОРИЗОНТ-ДОМИНАТОР-9.5»

Наименования параметров	Значения параметров
Производительность, м ³ /ч	3-5
Установленная мощность, кВт	48,5
Номинальная частота вращения роторов, об/мин	3000
Максимальная крупность исходных кусков материала, мм	20
Габаритные размеры (L×B×H), мм	1750×1250×1080
Масса, кг	860

Ещё одна конструкция дезинтегратора, разработанная заводом «ТЕХПРИБОР» представлена на рис. 1.7.

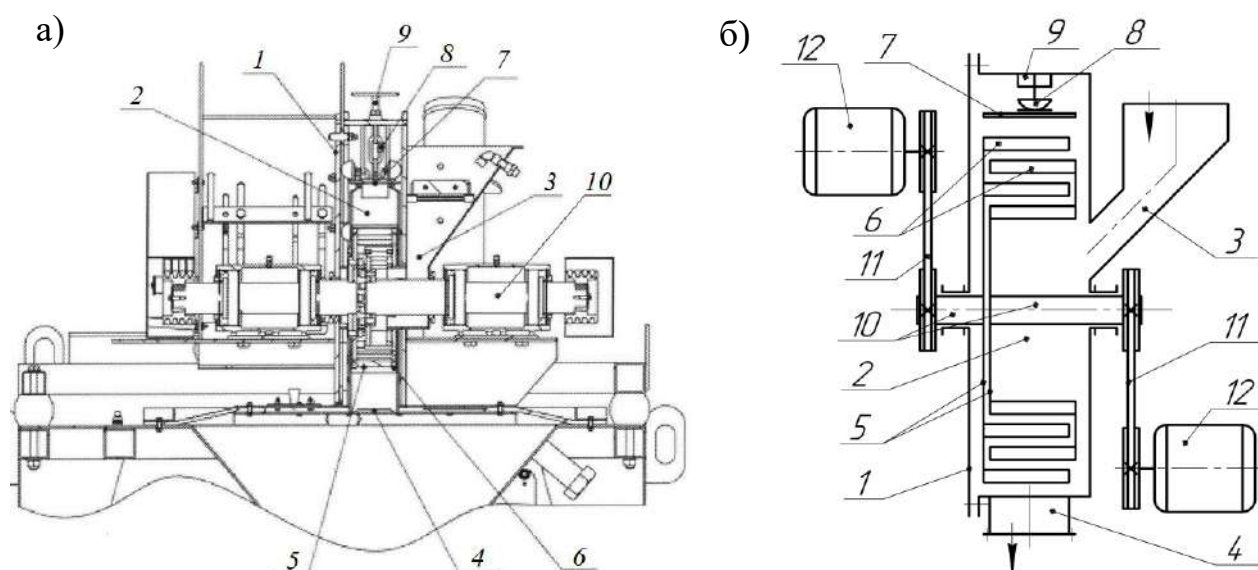


Рисунок 1.7 Дезинтегратор «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА»:

а) вид общий в разрезе; б) схема кинематическая:

1 – корпус; 2 – камера помола; 3 – загрузочный узел; 4 – разгрузочный узел;
5 – роторы; 6 – ударные элементы; 7 – бронепластины; 8 – шарниры; 9 – упоры; 10 – приводные валы; 11 – клиноременные передачи; 12 – электродвигатели

Данный дезинтегратор «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА» применяется для сухого и мокрого измельчения материалов, твердость которых не превышает 7 единиц по шкале Мооса. Конструктивно агрегат включает в себя металлический корпус 1,

внутреннее пространство которого формирует рабочую камеру помола 2. На торцевой крышке данного корпуса 1 размещен загрузочный узел 3. Разгрузка измельченного материала осуществляется через разгрузочный узел 4, расположенный в нижней зоне корпуса 1. Рабочими органами камеры помола 2 являются роторы 5, закрепленные непосредственно на приводных валах 10. Роторы 5 оснащены съёмными ударными элементами 6. Передача вращательного момента к указанным роторам 5 от электродвигателей 12 осуществляется через соответствующую приводную систему, состоящей из приводного вала 10 и клиноременной передачи 11. Посредством шарнирных соединений 8 к внутренней стороне стенок корпуса 1 подвешены защитные бронепластины 7, движение которых лимитируется специальными упорами 9. На поверхности бронепластин 7 выполнены крепежные элементы, предназначенные для монтажа вибрационных устройств различных модификаций [67, 140].

Процесс измельчения в дезинтеграторе происходит следующим образом.

Исходный материал и жидкость одновременно подаются в загрузочное устройство 3 и поступают в центральную часть роторов 5, откуда под действием центробежных сил перемещаются к периферии камеры помола 2. По мере своего движения частицы соударяются с ударными элементами 6, расположенными концентрическими рядами на роторах 5. При этом происходит их разрушение и перемешивание образованных осколков с жидкостью. После прохождения последнего ряда ударных элементов, получившаяся смесь ударяется о рабочую поверхность бронепластин 7. При этом бронепластины 7 отклоняются на шарнирах 8 до тех пор, пока не произойдёт их соударения об упоры 9. За счёт колебаний, вызванных данным ударом, происходит удаление налипшего материала [67, 140].

За счёт установленных бронеплит 7 и упоров 9 предотвращается налипание влажных материалов на стенки корпуса 1, забивание камеры помола 2 измельчаемым материалом и заклинивание роторов 5. Таким образом, рассмотренная конструкция дезинтегратора позволяет измельчать различные материалы естественной влажности и одновременно с измельчением получать

смеси, эмульсии, суспензии и растворы различных компонентов. Однако, при измельчении некоторых влажных материалов естественных колебаний недостаточно и требуется установка на бронеплитах 7 вибраторов, что приводит к усложнению его конструкции и удорожанию. Также наличие вибраций приводит к снижению надежности работы механизмов дезинтегратора [67].

В таблице 1.2 представлены основные технические характеристики дезинтегратора «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА».

Таблица 1.2 Технические характеристики дезинтегратора «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА»

Наименования параметров	Значения параметров
Производительность, м ³ /ч	3-5
Установленная мощность, кВт	41,4
Номинальная частота вращения роторов, об/мин	3000
Максимальная крупность исходных кусков материала, мм	12
Габаритные размеры (L×B×H), мм	2280×1900×1750
Масса, кг	1200

Исследования работы дезинтегратора «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА» при измельчении глины с влажностью 8 % показывают, что для достижения высокой дисперсности продукта с удельной поверхностью 3000 – 4000 см²/г (остаток на сите № 008 менее 5 %) требуется значительное увеличение частоты вращения роторов, что ведет к росту удельных энергозатрат до 30 – 35 кВт·ч/т и выше [67, 112]. Это ставит задачу поиска способов увеличения размольной мощности без пропорционального роста энергопотребления.

Из зарубежных предприятий – лидеров по производству оборудования для измельчения и, в том числе, дезинтеграторов являются Hosokawa Micron Powder Systems (США); Jiangsu Wheatstone Electrical Technology (Китай); «Dezintegrator» (Болгария); Desintegraator Tootmise OÜ (Эстония); BHS-Sonthofen GmbH (Германия); Munson Machinery (США); Shandong ALPA Powder Technology (Китай); NETZSCH (Германия) [142, 143, 144, 145].

Широкое распространение нашла универсальная мельница «Condux», разработанная компанией NETZSCH (Германия). В зависимости от поставленных

задач мельница «Condux» может быть выполнена как дезинтегратор (с двумя подвижными роторами) (рис. 1.8) и как дисмембратор (с одним подвижным ротором) (рис. 1.9). Кроме этого данная мельница имеет большой выбор сменных рабочих органов, что позволяет использовать её для сухого измельчения разнообразных материалов с твёрдостью до 3,5 единиц по шкале Мооса и осуществлять проектирование с учетом технических потребностей каждого заказчика [145].

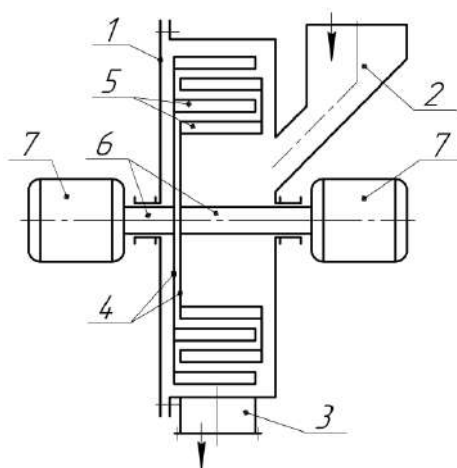


Рисунок 1.8 Схема кинематическая мельницы «Condux» (дезинтегратор):
1 – корпус; 2 – загрузочное устройство; 3 – разгрузочное устройство;
4 – роторы; 5 – ударные элементы; 6 – приводные валы; 7 – электродвигатели

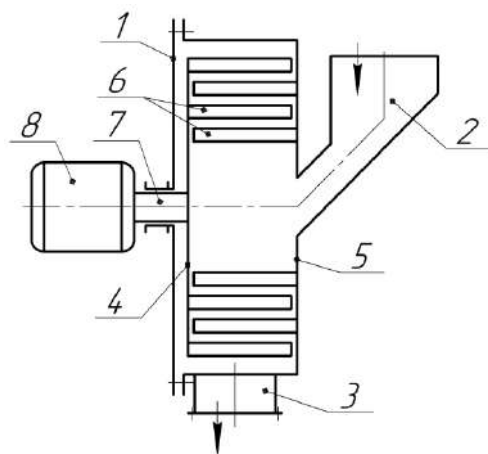


Рисунок 1.9 Универсальная мельница «Condux» (дисмембратор):
1 – корпус; 2 – загрузочное устройство; 3 – разгрузочное устройство; 4 – ротор подвижный;
5 – ротор неподвижный; 6 – ударные элементы; 7 – приводной вал; 8 – электродвигатель

За счёт сменных рабочих органов мельница «Condux» может работать по принципу дезинтегратора, воздуходувной мельницы, ударной мельницы с крестообразным ротором или мельницы с рифлёным ротором-диском. Основными

недостатками данных мельниц является ограничение по влажности измельчаемого материала (не более 3 %), частая замена рабочих органов ввиду абразивного износа. Данные недостатки присущи мельнице во всех исполнениях роторов (рис. 1.10, 1.11) Таким образом, снижение абразивного износа ударных элементов остается критическим фактором для стабильной работы оборудования.

На рис. 1.10 а представлена схема мельницы «Condux» с штифтовыми роторами, работающая по принципу дезинтегратора. Такую конструкцию компания NETZSCH предлагает использовать для измельчения кристаллических и хрупких материалов и получения готового продукта тонкостью менее 50 мкм. Настройка тонины готового продукта выполняется при помощи регулировки частоты вращения роторов, изменения количества ударных элементов (штифтов) и их геометрии.

а)

б)



Рисунок 1.10 Схемы мельницы «Condux» с различными видами рабочих органов:
а) с штифтовыми роторами; б) с воздуховым ротором

На рис. 1.10 б представлена схема мельницы «Condux» с воздуховым ротором, который за счёт большого количества сменных ударных элементов в виде лопастей производит большой объём собственного воздуха. Благодаря этому в данной конструкции мельницы возможно измельчение термочувствительных материалов. Использовать такую мельницу рекомендуется для измельчения хрупких, вязко-эластичных и кристаллических материалов сухой и влажной консистенции при получении готового продукта с тониной менее 100 мкм [145].

На рис. 1.11 а представлена схема мельницы «Condux» с ударным крестообразным ротором, который целесообразно использовать для измельчения

хрупких, вязко-эластичных и ломких материалов сухой и влажной консистенции при получении готового продукта с тониной менее 500 мкм [145].

На рис. 1.11 б представлена схема мельницы «Condux» с рифлёным ротором-диском, который за счёт режущих кромок отшлифованных на его рабочей поверхности может эффективно измельчать за счёт истирания и разламывания вязко-эластичные и ломкие материалы с малой остаточной влажностью при получении готового продукта с тониной менее 400 мкм. Тонину помола можно регулировать за счёт изменения количества режущих кромок, расстояния между дисками и скорости их вращения [145].

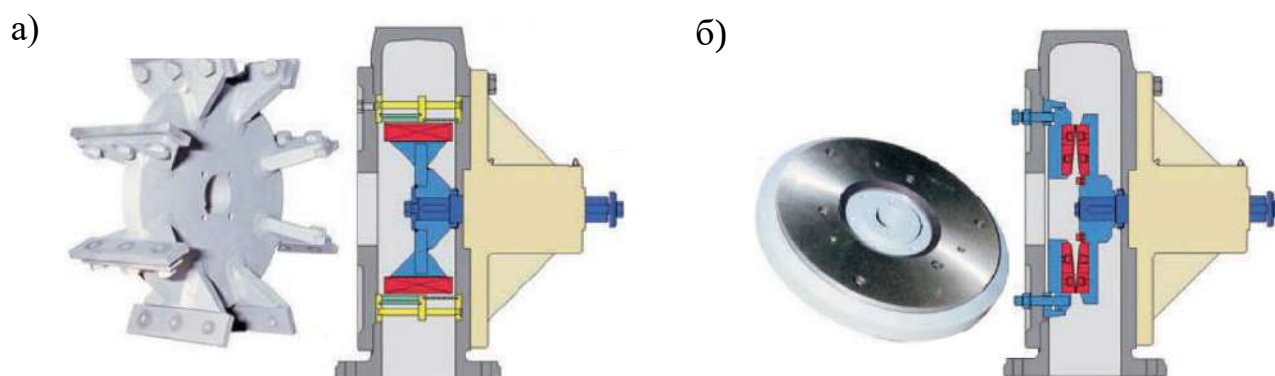


Рисунок 1.11 Схемы мельницы «Condux» с различными видами рабочих органов:
а) с ударным крестообразным ротором; б) с рифлёным ротором-диском

В таблице 1.3 представлены основные технические характеристики универсальной мельницы «Condux».

Таблица 1.3 Технические характеристики универсальной мельницы «Condux»

Наименования параметров	Значения параметров
Производительность, м ³ /ч	4-7
Установленная мощность, кВт	140
Номинальная частота вращения роторов, об/мин	1700 - 5500
Максимальная крупность исходных кусков материала, мм	30
Габаритные размеры (L×B×H), мм	2750×1200×2000
Масса, кг	2990

Таким образом, в зависимости от используемого типа роторов в универсальной мельнице «Condux» можно получать готовый продукт с тониной от 30 мкм до 800 мкм. Также выбор роторов зависит и от характеристик измельчаемого материала.

При производстве многокомпонентных строительных смесей существующие конструкции дезинтеграторов не эффективны, так как не обеспечивают требуемой гомогенности. Так, например, дезинтегратор «ГОРИЗОНТ-3000 МК-ВА» позволяет получать смеси с коэффициентом неоднородности 8 – 10 %, дезинтегратор «ГОРИЗОНТ-ДОМИНАТОР-9.5» и мельница «Condux» позволяют получать смеси с коэффициентом неоднородности не менее 10 – 13 % [65, 67, 140, 145]. Это ставит задачу поиска способов повышения эффективности смешивания компонентов в дезинтеграторах.

Анализ конструктивных решений ведущих производителей дезинтеграторов для строительной отрасли и данных научных публикаций позволил выявить ключевые тенденции совершенствования дезинтеграторов:

- 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.

1.3 Существующие методики расчёта конструктивно-технологических параметров дезинтегратора

Проектирование дезинтегратора под конкретные задачи начинается с анализа характеристик измельчаемого материала, требований, предъявляемых к конечному продукту и общих пожеланий заказчика, касающихся габаритов машины, эстетических, энергетических её показателей и др. [11, 72, 73].

К основным характеристикам исходного материала, влияющим на конструктивно-технологические параметры дезинтегратора, относят: прочность, твёрдость, абразивность, влажность, размер кусков, плотность, упругость, эластичность и др. [11, 118, 97].

Основными требованиями к конечному продукту являются: общая производительность, производительность по готовому продукту, тонкость помола, температура, однородность смеси и гранулометрического распределения.

Производительность и мощность являются параметрами, во многом определяющими конструкцию дезинтегратора и эффективность его работы. Ввиду большого разнообразия их конструктивных исполнений на сегодняшний день разработано достаточно много методик их расчёта, в том числе и сотрудниками БГТУ им. В. Г. Шухова [25, 26, 43, 53, 55, 63, 89, 90].

Известно, что пропускная способность первого ряда ударных элементов является ключевым параметром, влияющим на производительность дезинтегратора. В свою очередь пропускная способность зависит от геометрии камеры помола, роторов и частоты вращения роторов [14, 100, 110]. На основе этого строятся все существующие методики расчёта производительности дезинтеграторов.

Основоположником дезинтеграторной технологии Й. Хинтом были выведены формулы для определения производительности дезинтегратора с одинаковыми (1.1) и разными (1.2) частотами вращения роторов [110]:

$$Q = 10 \cdot \pi \cdot l \cdot s^2 \cdot \omega \cdot n_1, \quad (1.1)$$

$$Q = 10 \cdot \pi \cdot l \cdot s^2 \cdot \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2} \cdot n_1, \quad (1.2)$$

где l – длина ударных элементов, м;

ω – частота вращения роторов дезинтегратора, мин⁻¹;

s – расстояние между ближайшими точками соседних ударных элементов внутреннего ряда, м;

n_1 – количество ударных элементов первого ряда ударных элементов, шт.;

ω_1 и ω_2 – частоты вращения правого и левого роторов, мин⁻¹.

Более глубокие исследования процесса измельчения в дезинтеграторах позволили определить степень влияния свойств измельчаемого материала на производительность, ввиду чего формула для её определения приняла следующий вид [99]:

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot \sigma_{сж}^2 \cdot l \cdot s^2 \cdot \mu_p \cdot D_1 \cdot \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2} \cdot \sqrt{D_{cp} \cdot d_{cp}}}{120 \cdot W \cdot E \cdot (\sqrt{D_{cp}} - \sqrt{d_{cp}}) \cdot (s + b)}, \quad (1.3)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности измельчаемого материала на сжатие, МПа;

μ_p – коэффициент разрыхления измельчаемого материала, (0,1÷0,15);

D_1 – диаметр первого ряда ударных элементов, м;

D_{cp} – средневзвешенный размер кусков исходного материала, м;

d_{cp} – средневзвешенный размер частиц готового продукта, м;

E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа;

W – индекс работы по Бонду, кВт·ч/т;

b – ширина ударных элементов, м.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили достоверность математического выражения (1.3). Расхождение между расчетными и эмпирическими показателями составило менее 10%. Недостаток данного математического выражения заключается в том, что расчет верен лишь при измельчении сухих материалов с твердостью не более 7 единиц по Моосу [99].

Известно, что для классической конструкции дезинтегратора достоверна следующая формула определения мощности, потребляемой его приводом [14, 110]:

$$N_{прив.} = N_1 + N_2 + 2N_3 + N_4, \quad (1.4)$$

где N_1 – мощность, расходуемая на соударения частиц измельчаемого материала с подвижными элементами роторов, кВт;

N_2 – мощность, расходуемая на преодоление сил трения между измельчаемым материалом и ротором, кВт;

N_3 – мощность, расходуемая на преодоление сил трения в подшипниковых опорах валов роторов, кВт;

N_4 – мощность, расходуемая на перемещение воздушного потока, создаваемого роторами, кВт.

Далее приведены формулы определения каждого из слагаемых формулы (1.4).

$$N_1 = \frac{m \cdot \mathcal{G}_{y.э.}^2}{2} \cdot \omega \cdot n, \quad (1.5)$$

где $\mathcal{G}_{y.э.}$ – максимальная линейная скорость ударных элементов роторов, м/с,

m – масса измельчаемого материала, которую совместно воспринимают все ударные элементы роторов за одно столкновение, кг:

$$m = \frac{Q}{\omega \cdot n}. \quad (1.6)$$

$$N_2 = m \cdot \mathcal{G}_{y.э.}^2 \cdot f \cdot \omega \cdot \pi \cdot n, \quad (1.7)$$

где f – коэффициент трения измельчаемого материала по поверхности ударных элементов.

$$N_3 = P_p \cdot f_2 \cdot \pi \cdot d_{n.в.} \cdot \omega, \quad (1.8)$$

где P_p – вес соответствующего ротора, Н;

f_2 – коэффициент трения скольжения;

$d_{n.в.}$ – диаметр приводного вала, м.

$$N_4 = \frac{Q_э \cdot p \cdot (1 + k_{ц} \cdot \mu_n)}{\eta_p}, \quad (1.9)$$

где $k_{ц}$ – кратность циркуляции воздушного потока;

$Q_э$ – производительность дезинтегратора по воздуху, м³/ч;

p – разряжение, возникающее в камере помола дезинтегратора, Н/м²;

η_p – КПД роторов дезинтегратора как центробежного вентилятора.

μ_n – концентрация пыли в воздушном потоке, кг/м³.

Результаты последующих теоретических и экспериментальных исследований работы дезинтеграторов позволили выделить дополнительную составляющую в расчёте их общего энергопотребления – мощность, задействованную на разрушение частиц обрабатываемого сырья [14]:

$$N_5 = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{сж} \cdot Q \cdot (i_m - 1) \cdot n}{D_p \cdot \eta_{прив.} \cdot \eta_{дези.}}, \quad (1.10)$$

где i_m – степень измельчения материала;

D_p – диаметр ротора, м;

$\eta_{прив.}$ – КПД привода дезинтегратора;

$\eta_{дези.}$ – КПД дезинтегратора.

Подбор электродвигателей осуществляется по значению установленной мощности, определить которую можно по следующей формуле [2]:

$$N_{дв.} = \frac{N_{прив.} \cdot (1 - \eta_{прив.})}{\eta_{прив.}}. \quad (1.9)$$

Предполагается, что приведенные формулы определения производительности и мощности можно будет применить к усовершенствованному дезинтегратору. Адекватность этих выражений устанавливается путем сравнения их расчетных показателей с экспериментальными данными.

1.4 Предлагаемое конструктивно-техническое решение

Разработанное конструктивно-техническое решение дезинтегратора направлено на достижение поставленной цели за счет усовершенствования конструкции роторов в зоне взаимодействия ударных элементов с частицами обрабатываемых материалов.

Конструкция усовершенствованного дезинтегратора представлена на рисунке 1.12 и включает цилиндрический корпус 1 с примыкающими сбоку тангенциальным разгрузочным патрубком 2 и загрузочным бункером 3, расположенным на передней крышке. Рабочая зона измельчения образована противоположно вращающимися роторами. Каждый ротор приводится во вращение от независимых валов электродвигателей 8 и содержит несущие диски 4, 5. Левый ротор помимо диска 4 в своем составе имеет втулку 6, по наружной поверхности которой закреплена винтовая спираль. На дисках роторов жестко установлены ударные элементы 7, равномерно расположенные по соосным

окружностям в четыре ряда. 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}) [76].

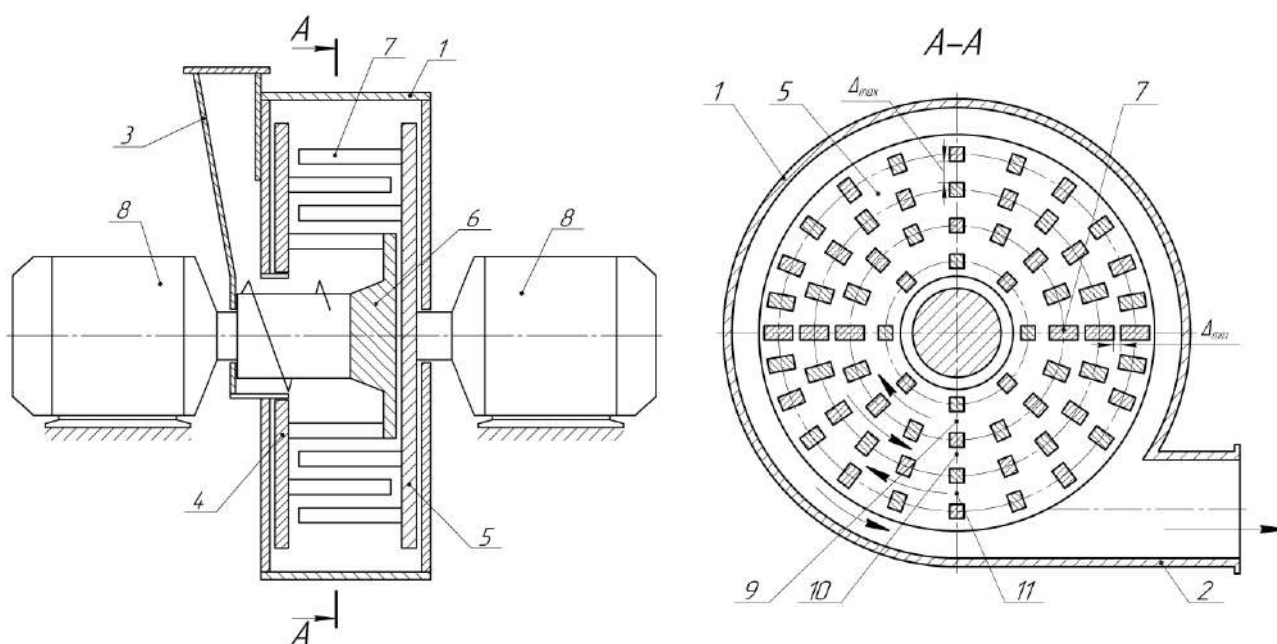


Рисунок 1.12 Схема дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов:
 1 – цилиндрический корпус; 2 – тангенциальный разгрузочный патрубок;
 3 – загрузочный бункер; 4, 5 – диски; 6 – втулка; 7 – ударные элементы; 8 – электродвигатели;
 9, 10, 11 – зазоры между рядами ударных элементов

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

Таким образом, в результате применения разработанной конструкции дезинтегратора достигается комплексный эффект: возрастает производительность по готовому продукту, уменьшаются удельные энергозатраты при его работе и повышается качество смешивания обрабатываемых материалов, характеризующееся снижением коэффициента неоднородности.

1.5 Цель и задачи исследований

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

Для достижения цели работы определены следующие **задачи**:

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.

1.6 Выводы по главе

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. Рассмотрены существующие методики расчёта производительности и мощности дезинтеграторов, которые позволят оценить достоверность экспериментальных исследований настоящей работы. Определена целесообразность создания инженерной методики расчета усовершенствованного дезинтегратора, состоящей из математических выражений для определения его ключевых конструктивных и технологических параметров.

3. Поставлена цель и определен комплекс сопутствующих исследовательских задач.

4. 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 коэффициента неоднородности смеси.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При комплектовании производственных технологических линий помольным оборудованием ключевое значение имеет баланс между производительностью по готовому продукту и затратами электроэнергии, дополненный требованиями к компактности и надежности машин при их длительной эксплуатации. С учётом данных требований и возможности использования дезинтеграторов для смешивания компонентов при их совместном измельчении данный тип оборудования является наиболее оптимальным для малотоннажных предприятий, например, при использовании в технологических линиях сухих строительных смесей, производстве керамического или силикатного кирпича [4, 20, 104, 113].

Однако, для эффективного использования дезинтеграторов как оборудования для измельчения и смешивания компонентов, необходимо разработать новую конструкцию роторов, которые обеспечат эффективное измельчение и смешивание компонентов за счёт интенсификации движения частиц измельчаемых материалов в междурядном объёме роторов и увеличения действующих на них истирающих нагрузок.

Реализация рассмотренной конструкции дезинтегратора с переменным рабочим объемом между смежными рядами ударных элементов предопределяет необходимость теоретического описания совмещенных процессов измельчения и смешивания, учитывая новое конструктивное исполнение роторов.

2.1 Теоретическое исследование процесса смешивания различных компонентов в рабочей камере дезинтегратора

Математическое описание процесса смешивания в усовершенствованном дезинтеграторе (рис. 2.1) базируется на определении массового расхода

материала, проходящего через его камеру помола за единицу времени. Нахождение этого показателя дает возможность перейти к оценке распределения частиц материалов и рассчитать концентрацию выделенной компоненты смеси после последнего (наружного) ряда ударных элементов [74, 92].

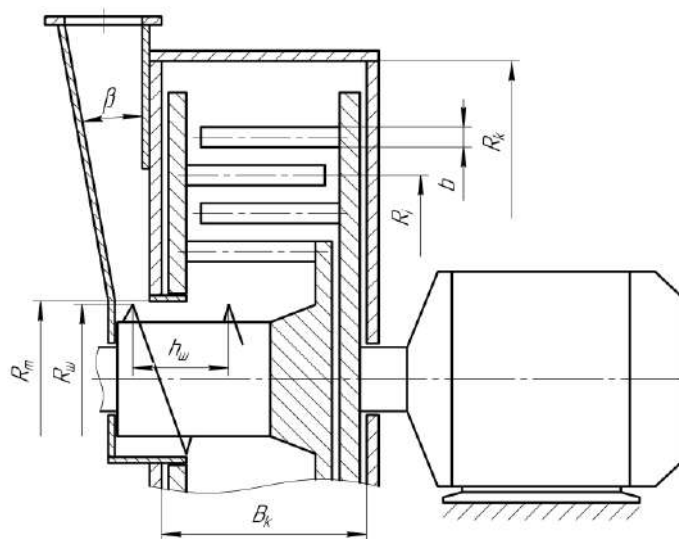


Рисунок 2.1. Схема камеры помола дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов

2.1.1 Расчёт массовой пропускной способности дезинтегратора

Массовая пропускная способность дезинтегратора Q_m определяется изменением во времени суммарной массы материала, заключенного в замкнутом объеме V камеры помола [16, 110]:

$$Q_m = \frac{d}{dt} \int_V \gamma(r) \cdot dV, \quad (2.1)$$

где величина $\gamma(r)$ отражает изменение насыпной плотности вдоль радиального вектора – начиная от зоны загрузки (поверхность шнека радиусом $R_{ш}$) и заканчивая внутренней поверхностью камеры помола R_k .

Допуская, что перераспределение частиц материала в рабочем объеме камеры помола дезинтегратора протекает по линейному закону, функцию $\gamma(r)$ можно связать с граничными величинами плотности материала (γ_0 и γ_k) посредством следующего соотношения:

$$\gamma(r) = \gamma_0 \frac{R_k - r}{R_k - R_{ш}} + \gamma_k \frac{r - R_{ш}}{R_k - R_{ш}}, \quad (2.2)$$

где γ_0 – насыпная плотность материала, поступающего на шнек, кг/м^3 ;

γ_k – насыпная плотность материала на выходе из камеры помола, кг/м³;

R_k – радиус корпуса дезинтегратора, м;

R_{uu} – радиус шнека, м;

Математическую оценку интегрального выражения (2.1) рационально проводить в цилиндрической системе координат. Элементарный объем dV , занимаемый дисперсной средой в произвольной точке помольной камеры, записывается следующим соотношением:

$$dV = r \cdot dr \cdot d\chi \cdot dz, \quad (2.3)$$

здесь r, χ, z – координаты цилиндрической системы координат.

Подстановка (2.2) и (2.3) в (2.1) приводит к результату:

$$Q_m = \frac{d}{dt} \int_0^{2\pi} d\chi \int_0^{B_k} dz \int_{R_{uu}}^{R_k} \frac{r}{R_k - R_{uu}} (\gamma_0 \cdot R_k - \gamma_0 \cdot r + \gamma_k \cdot r - \gamma_k \cdot R_{uu}) dr = \frac{2 \cdot \pi \cdot B_k}{R_k - R_{uu}} \cdot \int_{R_{uu}}^{R_k} \left(\gamma_0 \cdot R_k \cdot \frac{dr}{dt} - 2 \cdot \gamma_0 \cdot r \cdot \frac{dr}{dt} + 2 \cdot \gamma_k \cdot r \cdot \frac{dr}{dt} - \gamma_k \cdot R_{uu} \cdot \frac{dr}{dt} \right), \quad (2.4)$$

где B_k – ширина камеры помола, м.

Скорость перемещения частиц материала вдоль поверхности ударных элементов можно представить в следующем виде [49]:

$$\vartheta_1 = \frac{dr}{dt}. \quad (2.5)$$

Тогда с учетом (2.5) формула (2.4) примет вид:

$$Q_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot B_k}{R_k - R_{uu}} \int_{R_{uu}}^{R_k} \vartheta_r (\gamma_0 \cdot R_k - 2 \cdot \gamma_0 \cdot r + 2 \cdot \gamma_k \cdot r - \gamma_k \cdot R_{uu}) dr. \quad (2.6)$$

Изменение угла установки ударных элементов α относительно радиального направления оказывает прямое влияние на время их контакта и характер взаимодействия с частицами материала. Согласно известным данным [25], скорость ϑ_r по поверхности ударных элементов выражается уравнением:

$$\vartheta_r = \frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot f} (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha), \quad (2.7)$$

где f – коэффициент трения частицы материала о поверхность ударного элемента;

ω – частота вращения роторов с ударными элементами, с⁻¹;

ρ – расстояние от оси вращения ряда ударных элементов до точки встречи частицы материала с поверхностью ударного элемента, м;

α – угол поворота ударных элементов к радиальному направлению, град.

Данное расстояние равно:

$$\rho = R_i - \frac{b}{2}, \quad (2.8)$$

здесь R_i – расстояние от оси вращения роторов до i – того ряда ударных элементов;

b – ширина ударного элемента.

Согласно (2.7) и (2.8) величина скорости ϑ_r не зависит от радиальной координаты r , поэтому соотношение (2.6) можно привести к виду:

$$Q_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot B_k \cdot \vartheta_r}{R_k - R_{ш}} \int_{R_{ш}}^{R_k} [\gamma_0 \cdot R_k - \gamma_k \cdot R_{ш} + 2 \cdot (\gamma_k - \gamma_0) \cdot r] dr. \quad (2.9)$$

Вычисление интеграла (9) приводит к следующему результату:

$$Q_m = 2 \cdot \pi \cdot B_k \cdot \vartheta_r \cdot [R_{ш} \cdot (\gamma_0 - \gamma_k) + \gamma_k \cdot (R_k - R_{ш})]. \quad (2.10)$$

Приведем (2.10) к следующему виду:

$$Q_m = 2 \cdot \pi \cdot B_k \cdot \vartheta_r \cdot R_{ш} \cdot [\gamma_0 + \gamma_k \cdot (\chi_1 - 2)], \quad (2.11)$$

где введено следующее обозначение:

$$\chi_1 = \frac{R_k}{R_{ш}}. \quad (2.12)$$

Таким образом, на базе полученной зависимости (2.11) можно установить величину массовой пропускной способности дезинтегратора (рис. 2.1) с учетом свойств обрабатываемого материала, а также конструктивных параметров его ключевых узлов: камеры помола и загрузочного узла.

На рисунке 2.2 представлена графическая зависимость пропускной способности дезинтегратора Q_m от частоты вращения роторов ω и параметра ρ , определяющего расстояние от оси вращения роторов до точки соударения частиц с ударными элементами (эквивалентно радиусу первого ряда ударных элементов).

Графическая зависимость (рис. 2.2) позволяет определить, что увеличение радиуса расположения первого ряда ударных элементов и частоты вращения роторов способствуют увеличению пропускной способности дезинтегратора.

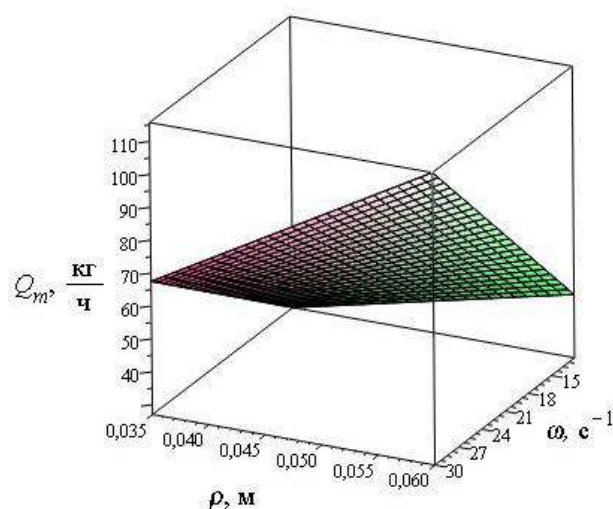


Рисунок 2.2 Зависимость пропускной способности Q_m от частоты вращения ω роторов и расстояния ρ от оси вращения ряда ударных элементов до точки встречи частицы материала с поверхностью ударного элемента при $B_k = 0,093$ м, $\alpha = 0$ град., $\gamma_0 = 1200$ кг/м³, $\gamma_k = 1650$ кг/м³, $f = 0,3$, $R_k = 0,155$ м, $R_{ш} = 0,036$ м

Это объясняется следующим образом. Увеличение ρ и ω приводит к росту линейной скорости ударных элементов, что улучшает эффективность измельчения и способствует более быстрому прохождению материала через зону измельчения. При неизменном параметре ρ , равным 0,045 м рост частоты вращения роторов с 12 с⁻¹ до 30 с⁻¹ приводит к интенсификации перемещения материала, при которой пропускная способность Q_m увеличивается от 34,7 кг/ч до 86,7 кг/ч. Аналогичным образом на производительность влияет и геометрический параметр ρ : при фиксированной частоте вращения ($\omega = 30$ с⁻¹) увеличение параметра ρ от 0,035 м до 0,060 м обеспечивает повышение пропускной способности с 67,5 кг/ч до 115,5 кг/ч.

На рис. 2.3 представлена графическая зависимость пропускной способности дезинтегратора Q_m от угла поворота ударных элементов α и ширины камеры помола B_k .

Данная графическая зависимость позволяет определить, что увеличение угла α приводит к снижению пропускной способности дезинтегратора ввиду перекрытия свободного пространства между смежными ударными элементами в ряду.

Увеличение ширины камеры помола B_k дезинтегратора позволяет увеличить пропускную способность Q_m за счёт соответственно роста объема камеры.

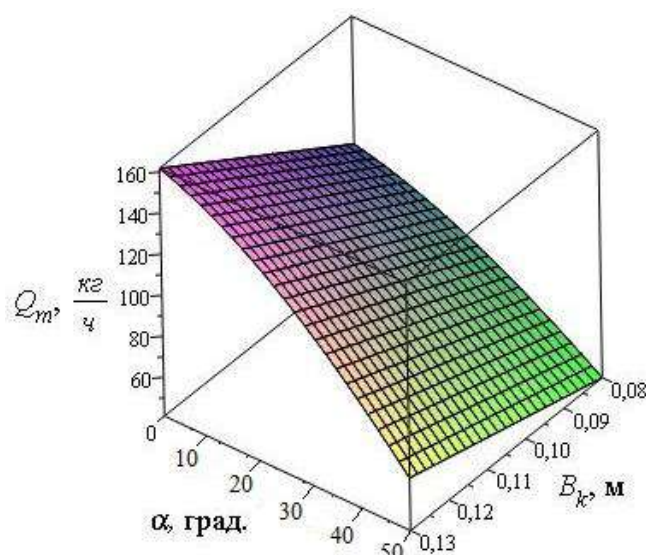


Рисунок 2.3 Зависимость пропускной способности Q_m от угла поворота ударных элементов α и ширины камеры помола B_k при $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$, $\rho = 0,06 \text{ м}$, $\gamma_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_k = 1650 \text{ кг/м}^3$, $f = 0,3$, $R_k = 0,155 \text{ м}$, $R_{ш} = 0,036 \text{ м}$

При значении угла поворота ударных элементов $\alpha = 0$ град. и варьировании размера B_k в диапазоне от 0,08 м до 0,013 м, пропускная способность дезинтегратора линейно возрастает от 99,6 кг/ч до 161,4 кг/ч. При ширине камеры помола $B_k = 0,13 \text{ м}$ и увеличении угла α в от 0 град. до 50 град. наблюдается снижение пропускной способности Q_m от 161,4 кг/ч до 66,8 кг/ч.

На рис. 2.4 представлена графическая зависимость пропускной способности дезинтегратора Q_m от радиуса шнека $R_{ш}$ и радиуса корпуса дезинтегратора R_k .

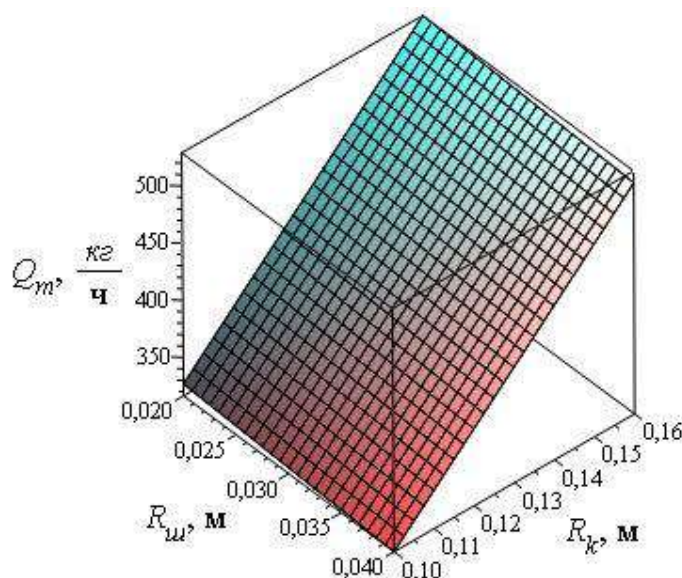


Рисунок 2.4 Зависимость пропускной способности Q_m от радиуса шнека $R_{ш}$ и радиуса корпуса дезинтегратора R_k при $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$, $\rho = 0,06 \text{ м}$, $\gamma_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_k = 1650 \text{ кг/м}^3$, $f = 0,3$, $B_k = 0,13 \text{ м}$, $\alpha = 0$ град.

Графическая зависимость, представленная на рис. 2.4 позволяет определить, что увеличение радиуса шнека $R_{ш}$ приводит к незначительному снижению пропускной способности дезинтегратора ввиду того, что при приближении шнека к первому ряду ударных элементов частицы материала ударяются не в просветы между ударными элементами, а непосредственно в их основание. Это создает эффект «отскока» материала обратно в сторону шнека, формируя турбулентные завихрения и противоток, который мешает подаче новой порции материала.

Увеличение радиуса корпуса дезинтегратора R_k позволяет увеличить пропускную способность Q_m за счёт роста объема камеры.

Изменение радиуса корпуса R_k в пределах от 0,10 м до 0,16 м при фиксированном значении радиуса шнека ($R_{ш} = 0,02$ м) приводит к росту пропускной способности Q_m с 326,2 кг/ч до 527,3 кг/ч. Увеличение параметра $R_{ш}$ от 0,02 м до 0,04 м при фиксированном значении параметра $R_k = 0,16$ м вызывает обратный эффект – пропускная способность Q_m падает с 529 кг/ч до 518,6 кг/ч.

Таким образом, результаты графического анализа (рис. 2.2, 2.3 и 2.4) указывают на то, что пиковая пропускная способность дезинтегратора ($Q_m = 529$ кг/ч.) достигается при следующих параметрах: $\omega = 30$ с⁻¹, $\rho = 0,06$ м, $\alpha = 0$ град., $B_k = 0,13$ м, $R_k = 0,16$ м, $R_{ш} = 0,02$ м.

2.1.2 Расчёт концентрации выделенной компоненты смеси на выходе из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок

Характер изменения концентрации выделенной компоненты смеси по мере продвижения потока от первого к четвертому ряду ударных элементов проиллюстрирован на рисунке 2.5.

Опираясь на результаты исследований [42, 102], дифференциальное уравнение массопереноса выделенной компоненты принимает вид:

$$Q_{Vi} \cdot (C_{i-1} - C_i) = V_i \frac{dC_i}{dt}, \quad (2.13)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номера ячеек, через которые последовательно проходит материал;

C_i – концентрация выделенной компоненты смеси в i -ячейке, %;

C_0 – начальное значение концентрации выделенной компоненты (перед первым рядом ударных элементов), %;

Q_{Vi} – объемный расход материала, проходящего через i -ячейку равный, м³/с:

$$Q_{Vi} = \frac{Q_m}{\gamma_i}; \quad (2.14)$$

γ_i – насыпная плотность материала, проходящего через i -ю ячейку, кг/м³;

V_i – объем i -ой ячейки, значение которого определяется соотношением, м³:

$$V_i = \pi (R_{i+1}^2 - R_i^2) \cdot B_k, \quad (2.15)$$

здесь:

$$R_{i+1} = R_i + \Delta, \quad (2.16)$$

где Δ – расстояние между радиальными размерами $i + 1$ и i ячейками.

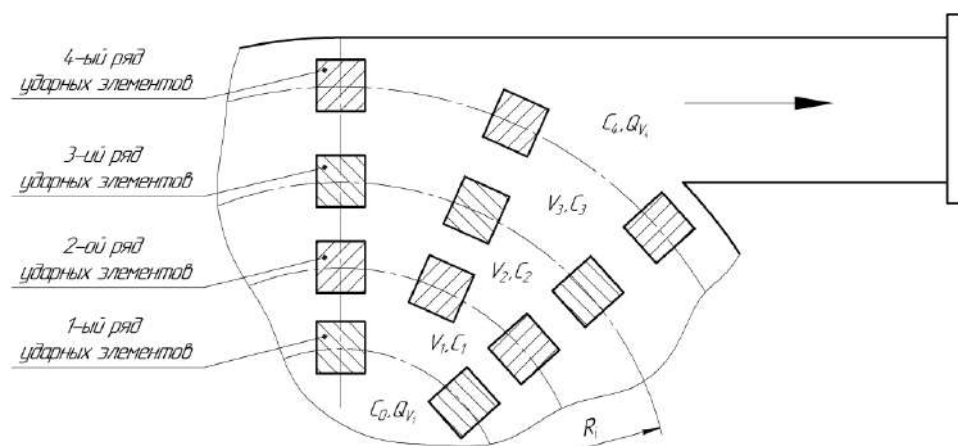


Рисунок 2.5 Схема к расчёту смешивания материалов в камере помола дезинтегратора

Вычислим:

$$R_{i+1}^2 = R_i^2 + 2R \cdot \Delta + \Delta^2. \quad (2.17)$$

Учитывая, что:

$$\frac{\Delta}{R_i} \ll 1, \quad (2.18)$$

тогда соотношение (2.17) можно представить в следующем виде:

$$R_{i+1}^2 = R_i^2 \left(1 + 2 \frac{\Delta}{R_i} + \frac{\Delta^2}{R_i^2} \right). \quad (2.19)$$

На основании (2.18), пренебрегая в (2.19) величинами второго порядка малости имеем:

$$R_{i+1}^2 \cong R_i^2 + 2R_i \cdot \Delta. \quad (2.20)$$

Подстановка (2.20) в (2.15) позволяет получить следующий результат:

$$V_i = 2 \cdot \pi \cdot B_k \cdot \Delta \cdot R_i. \quad (2.21)$$

Введем следующее обозначение:

$$\tau_i = \frac{V_i}{Q_{Vi}}, \quad (2.22)$$

которому с учетом (2.11), (2.14) и (2.21) можно придать вид:

$$\tau_i = \frac{\Delta \cdot R_i \cdot \gamma_i}{\vartheta_r \cdot R_{ui} \cdot (\gamma_0 + \gamma_k \cdot (\chi_1 - 2))}. \quad (2.23)$$

Легко убедиться, что величина (2.23) имеет размерность времени. На основании этого факта величине (2.23) можно придать смысл времени пребывания материала в i -ой ячейке.

Дальнейшее упрощение формулы (2.23) можно провести на основании соотношений (2.7) и (2.8).

Если учесть что величина:

$$\frac{b}{2R_i} \ll 1 \quad (2.24)$$

является малой величиной, то с учетом (2.24) формула (2.7) примет вид:

$$\vartheta_r \cong \frac{\omega R_i}{2f} (\cos \alpha - f \sin \alpha). \quad (2.25)$$

Подстановка (2.8) в (2.23) приводит к следующему соотношению:

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot \Delta \cdot \gamma_{cp} \cdot f}{\omega \cdot (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha) \cdot R_{ui} \cdot (\gamma_0 + \gamma_k \cdot (\chi_1 - 2))}. \quad (2.26)$$

Полученное соотношение (2.26) позволяет сделать вывод, что время нахождения материала с точностью до величин первого порядка малости не зависит от номера ячейки.

На рис. 2.6 представлена графическая зависимость времени τ_0 нахождения частицы материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов (ячейке) от частоты вращения роторов ω и угла поворота ударных элементов α .

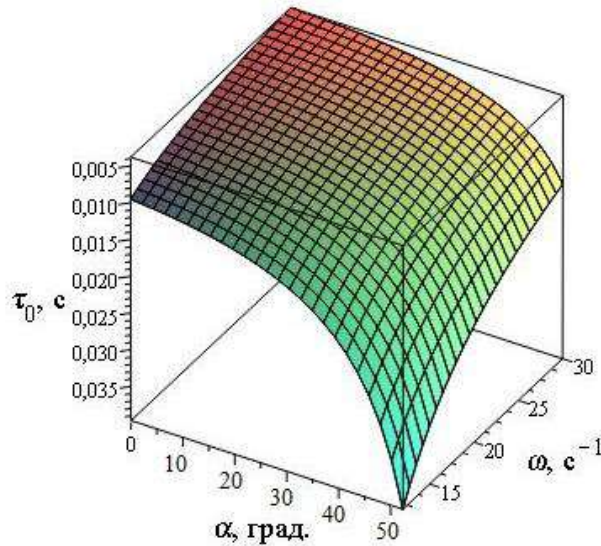


Рисунок 2.6 Зависимость времени τ_0 нахождения частицы материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов от частоты вращения ω роторов и угла α поворота ударных элементов при $\Delta=0,02$ м, $\gamma_0=1200$ кг/м³, $\gamma_k=1650$ кг/м³, $\gamma_{cp}=1425$ кг/м³, $f=0,3$, $R_k=0,155$ м, $R_{ш}=0,036$ м.

Графическая зависимость (рис. 2.6) позволяет определить, что увеличение угла поворота α ударных элементов ведёт к кратному увеличению значения времени τ_0 . Это объясняется уменьшением зазора между соседними ударными элементами одного ряда, через который частицы проскакивают к последующим рядам. Так, при частоте вращения роторов $\omega = 30$ с⁻¹ и варьировании угла α в пределах от 0 град. до 50 град., наблюдается рост времени нахождения частицы материала в междурядном пространстве с 0,004 с до 0,016 с.

Снижение частоты вращения роторов приводит к уменьшению значения времени τ_0 , что объясняется повышением линейной скорости частиц при столкновении с ударными элементами и увеличением скорости воздушного потока, создаваемого роторами. При значении угла поворота ударных элементов $\alpha = 0^\circ$ и варьировании частоты вращения роторов от 12 с⁻¹ до 30 с⁻¹, время нахождения частицы материала в междурядном пространстве снижается от 0,01 с до 0,004 с.

На рисунке 2.7 представлена закономерность изменения времени τ_0 пребывания частицы обрабатываемого материала в междурядном объеме (ячейке) от радиуса шнека $R_{ш}$ и радиуса корпуса дезинтегратора R_k .

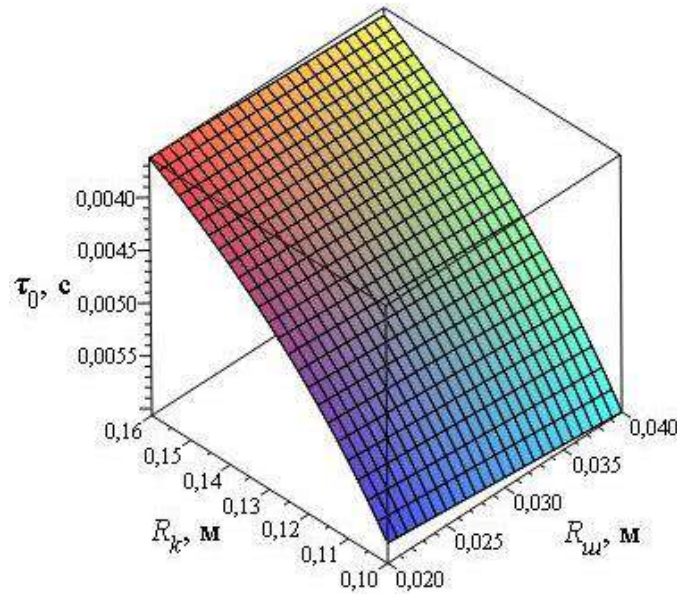


Рисунок 2.7 Зависимость времени τ_0 нахождения частицы материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов от радиуса шнека $R_{ш}$ и радиуса корпуса дезинтегратора R_k при $\Delta=0,02$ м, $\gamma_0=1200$ кг/м³, $\gamma_k=1650$ кг/м³, $\gamma_{cp}=1425$ кг/м³, $f=0,3$, $\alpha = 0$ град., $\omega = 30$ с⁻¹

Графическая зависимость, представленная на рис. 2.7 позволяет определить, что увеличение радиуса шнека $R_{ш}$ приводит к увеличению времени τ_0 ввиду эффекта «отскока» материала от ударных элементов обратно в сторону шнека. При фиксированном значении радиуса корпуса дезинтегратора $R_k = 0,16$ м и варьировании радиуса шнека $R_{ш}$ от 0,02 м до 0,04 м наблюдается рост времени τ_0 с 0,0036 с до 0,0038 с.

Увеличение радиуса корпуса R_k при фиксированных значениях остальных параметров дезинтегратора приводит к уменьшению времени τ_0 нахождения частицы материала в междурядном пространстве. Объясняется это увеличением свободного объема периферийной зоны камеры помола, что приводит к перераспределению разряжения и созданию более интенсивного эжекционного эффекта.

При значении радиуса шнека $R_{ш} = 0,02$ м и варьировании радиуса корпуса R_k от 0,10 м до 0,16 м, время нахождения частицы материала в междурядном пространстве снижается от 0,006 с до 0,0036 с.

Таким образом, на основании графических зависимостей, представленных на рис. 2.6 и 2.7, установлено, что минимальное значение времени τ_0 пребывания

частиц материала в камере помола дезинтегратора наблюдается при $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 0^\circ$, $R_k = 0,16 \text{ м}$, $R_{uu} = 0,02 \text{ м}$ и составляет $\tau_0 = 0,0036 \text{ с}$.

С учетом (2.22), (2.26) уравнение (2.13) принимает вид:

$$C_{i-1} - C_i = \tau_0 \frac{dC_i}{dt}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.27)$$

Для определения изменения концентрации выделенной компоненты смеси в рассматриваемых ячейках необходимо проинтегрировать систему (2.27), удовлетворяющую следующим начальным условиям:

$$C_i(t = 0) = 0, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4. \quad (2.28)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение концентрации выделенной компоненты смеси в объеме первой ячейки, согласно (2.27) имеем:

$$\tau_0 \frac{dC_1}{dt} = C_0 - C_1. \quad (2.29)$$

Уравнение (2.29) можно привести к следующему виду:

$$\frac{d(C_0 - C_1)}{C_0 - C_1} = -\frac{dt}{\tau_0}. \quad (2.30)$$

Интегрирование (2.30) позволяет получить:

$$C_0 - C_1 = A_{10} e^{-\frac{t}{\tau_0}}, \quad (2.31)$$

где A_{10} – постоянная интегрирования.

Значение постоянной интегрирования A_{10} находим из начального условия (2.28) для первой ячейки.

Применение (2.28) к (2.31) приводит к результату:

$$A_{10} = C_0. \quad (2.32)$$

Подстановка (2.32) в (2.31) приводит к результату:

$$C_1 = C_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right). \quad (2.33)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение концентрации выделенной компоненты смеси в объеме второй ячейки на основании (2.27) имеет вид:

$$\tau_0 \frac{dC_2}{dt} = C_1 - C_2. \quad (2.34)$$

Подстановка (2.33) в (2.34) приводит к следующему результату:

$$\tau_0 \frac{dC_2}{dt} + C_2 = C_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right). \quad (2.35)$$

Интегрирование уравнения (2.35) приводит к соотношению:

$$C_2 = A_{20} e^{-\frac{t}{\tau_0}} + C_0 \left(1 - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right). \quad (2.36)$$

На основании начального условия (2.28) применительно ко второй ячейке находим постоянную интегрирования:

$$A_{20} = -C_0. \quad (2.37)$$

Подстановка (2.37) в (2.36) приводит к соотношению:

$$C_2 = C_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right). \quad (2.38)$$

Далее запишем дифференциальное уравнение, описывающее изменение концентрации выделенной компоненты смеси в объеме третьей ячейки:

$$\tau_0 \frac{dC_3}{dt} = C_2 - C_3, \quad (2.39)$$

которое при подстановке (2.38) примет вид:

$$\tau_0 \frac{dC_3}{dt} + C_3 = C_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right). \quad (2.40)$$

Интегрирование уравнения (2.40) приводит к выражению:

$$C_3(t) = A_{30} e^{-\frac{t}{\tau_0}} + C_0 \left(1 - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t^2}{2\tau_0^2} e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right). \quad (2.41)$$

Применив начальное условие (2.28) для объема третьей ячейки, находим постоянную интегрирования A_{30} :

$$A_{30} = -C_0. \quad (2.42)$$

С учетом (2.42) решение (2.41) принимает вид:

$$C_3(t) = C_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t^2}{2\tau_0^2} e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right). \quad (2.43)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение концентрации выделенной компоненты смеси в объеме четвертой ячейки:

$$\tau_0 \frac{dC_4}{dt} = C_3 - C_4, \quad (2.44)$$

которое с учетом полученного соотношения (2.43) можно привести к виду:

$$\tau_0 \frac{dC_4}{dt} + C_4 = C_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t^2}{2\tau_0^2} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right). \quad (2.45)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка (2.45) имеет вид:

$$C_4 = C_0 \left(1 - \frac{t}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t^2}{2\tau_0^2} e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \frac{t^3}{6\tau_0^3} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) + A_{40} e^{-\frac{t}{\tau_0}}. \quad (2.46)$$

Постоянную интегрирования A_{40} на основании (2.28) необходимо положить равной:

$$A_{40} = -C_0. \quad (2.47)$$

Подстановка (2.47) в (2.46) позволяет получить следующий результат:

$$C_4 = C_0 \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left(1 + \frac{t}{\tau_0} + \frac{t^2}{2\tau_0^2} + \frac{t^3}{6\tau_0^3} \right) \right]. \quad (2.48)$$

Полученное соотношение (2.48) позволяет определить концентрацию выделенной компоненты смеси на выходе из корпуса дезинтегратора, а именно:

$$C_4 = (t = 4\tau_0) \cong 0,57C_0. \quad (2.49)$$

Математические выражения (2.48) и (2.49) позволяют сделать вывод о динамике формирования смеси в камере помола дезинтегратора. Установлено, что при прохождении материалом четырех последовательных рядов ударных элементов концентрация выделенной компоненты смеси на выходе C_4 составляет 0,57 от её начального значения C_0 .

2.2 Кинетика разрушения частиц материала в дезинтеграторе в рамках статистического подхода

Рассмотрим математическое описание ударного разрушения частиц материала в камере помола дезинтегратора в рамках неоднородного Марковского процесса [69, 93, 98, 136].

Основываясь на представлении о неоднородном Марковском процессе «рождения», запишем следующее уравнение, описывающее изменение статистической величины $m(t)$ – математического ожидания [26]:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \lambda \cdot m(t), \quad (2.50)$$

где λ – интенсивность Марковского процесса. При определении зависимости величины λ от времени будем исходить из предположения, что данная величина пропорциональна частоте вращения ω роторов дезинтегратора, умноженной на функцию времени $f(t)$:

$$\lambda(t) = k \cdot \omega \cdot f(t), \quad (2.51)$$

где k – коэффициент пропорциональности, который зависит от формы и размера ударных элементов ротора дезинтегратора (определяется эмпирическим путем).

Определим вид функции $f(t)$ при условии, что расстановка ударных элементов на дисках роторов обеспечивает соударение для абсолютно всей массы частиц на протяжении времени τ_0 их пребывания в междурядном объеме. Тогда функция $f(t)$ принимает следующий вид :

$$f(t) = 1 - \frac{t}{\tau_0}. \quad (2.52)$$

При допущении постоянства вероятности разрушения частиц при ударном контакте с ударными элементами значение математического ожидания оказывается пропорциональным количеству частиц $n(t)$. Ввиду этого соотношение (2.50) при подстановке выражений (2.51) и (2.52) приводится к следующему виду:

$$\frac{dn(t)}{dt} = k \cdot \omega \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right) \cdot n(t). \quad (2.53)$$

Решение уравнения (2.53) должно удовлетворять начальному условию:

$$n(t = 0) = n_0, \quad (2.54)$$

здесь n_0 – начальное число частиц, поступающее на первый ряд ударных элементов.

Значение величины n_0 можно найти на основании следующих соотношений:

$$n_0 \cdot \frac{\pi d_0^3}{6} = Q_0, \quad (2.55)$$

$$Q_0 = (2 \cdot R_{ш} \cdot \beta_0)^{\frac{5}{2}} \cdot \tau_0 \cdot \sqrt{\frac{g}{tg\beta}}, \quad (2.56)$$

$$n_0 = \frac{6Q_0}{\pi d_0^3}, \quad (2.57)$$

$$\beta_0 = \left(\frac{\Omega^2 h_{ш}^2 tg\beta \varphi^2}{4R_{ш}g} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (2.58)$$

где d_0 – среднее значение диаметра частицы загружаемого материала, м;

Q_0 – пропускная способность дезинтегратора, м³/с;

R_m – радиус трубы шнека, м;

$h_{ш}$ – шаг шнека, м;

Ω – частота вращения шнека, с⁻¹;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – угол наклона стенки бункера к вертикали, град.

Интегрирование уравнения (2.53) приводит к следующему результату:

$$\ln(n(t)) = k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) + \ln const. \quad (2.59)$$

Применив равенство (2.54) к (2.59) находим:

$$const = n_0. \quad (2.60)$$

Подстановка (2.60) в (2.59) приводит к результату:

$$n(t) = n_0 \exp \left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0} \right) \right). \quad (2.61)$$

Полученное соотношение (2.61) определяет закон изменения числа частиц при прохождении каждого ряда ударных элементов.

Число частиц, образовавшихся после взаимодействия с ударными элементами первого ряда ударных элементов:

$$n_{k_1} = n(t = \tau_0) = n_0 \exp \left(\frac{k \cdot \omega \cdot \tau_0}{2} \right). \quad (2.62)$$

Изменение числа частиц материала в междурядном пространстве первого и второго рядов определяется формулой (2.61), в которой в качестве n_0 необходимо подставить (2.62):

$$n_2(t) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{k \cdot \omega \cdot \tau_0}{2}\right) \cdot \exp\left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0}\right)\right). \quad (2.63)$$

На основании (2.63) число частиц, образовавшихся после взаимодействия с ударными элементами второго ряда, определяется следующим образом:

$$n_{k2} = n_2(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (2.64)$$

Изменение числа частиц материала в междурядном пространстве второго и третьего ряда ударных элементов дезинтегратора также будет определяться формулой (2.61), в которой необходимо сделать следующую замену:

$$n_0 \rightarrow n_{k2} = n_0 \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0), \quad (2.65)$$

поэтому с учетом (2.65) формула (2.61) принимает вид:

$$n_3(t) = n_0 \cdot \exp(k \cdot \omega \cdot \tau_0) \cdot \exp\left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0}\right)\right). \quad (2.66)$$

На основании (2.66) число частиц материала на выходе с третьего ряда ударных элементов камеры помола дезинтегратора будет равно:

$$n_{k3} = n_3(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0\right). \quad (2.67)$$

Изменение числа частиц материала в пространстве между третьим и четвертым рядом ударных элементов можно найти, если в формуле (2.61) произвести очевидную замену:

$$n_0 \rightarrow n_3(t = \tau_0) = n_0 \exp\left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0\right). \quad (2.68)$$

Подстановка (2.68) в (2.61) приводит к соотношению

$$n_4(t) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0\right) \cdot \exp\left(k \cdot \omega \cdot \left(t - \frac{t^2}{2\tau_0}\right)\right). \quad (2.69)$$

На основании (2.69) находим число частиц материала на выходе с последнего ряда ударных элементов камеры помола дезинтегратора:

$$n_k = n_4(t = \tau_0) = n_0 \cdot \exp(2k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (2.70)$$

С другой стороны, значение числа n_k в готовом продукте на выходе из камеры помола дезинтегратора можно найти на основании следующего равенства:

$$\frac{\pi d_k^3}{6} \cdot n_k = V_k, \quad (2.71)$$

где d_k – средний размер (диаметр) частицы готового продукта в объёме V_k между последним рядом ударных элементов и корпусом дезинтегратора.

На основании (2.71):

$$n_k = \frac{6V_k}{\pi d_k^3}. \quad (2.72)$$

Подстановка (2.72) в (2.70) с учетом (2.57) позволяет получить соотношение:

$$\frac{6 \cdot V_k}{\pi \cdot d_k^3} = \frac{6 \cdot Q_0}{\pi \cdot d_0^3} \cdot \exp(2 \cdot k \cdot \omega \cdot \tau_0). \quad (2.73)$$

На основании (2.73) находим:

$$d_k = \xi \cdot d_0, \quad (2.74)$$

где введено следующее обозначение:

$$\xi = \sqrt[3]{\frac{V_k}{Q_0}} \cdot \exp\left(-\frac{2}{3} k \cdot \omega \cdot \tau_0\right). \quad (2.75)$$

Следовательно, полученные выражения (2.74) и (2.75) отражают закономерность разрушения частиц в дезинтеграторе на основе статистического подхода, позволяя рассчитывать средний размер готового продукта после последнего ряда ударных элементов.

Коэффициент k в выражении (2.75) является параметром, учитывающим геометрию контактной поверхности ударных элементов, аэродинамические эффекты в рабочей камере и фактический вектор передачи кинетической энергии частице. Ввиду сложности аналитического описания процессов соударения, значение k определялось эмпирическим путем в четыре этапа:

1) Проводилась серия из 5 опытов при измельчении глины. В качестве варьируемого фактора принята частота вращения роторов при остальных фиксированных.

2) Для каждого режима работы определялся фактический средневзвешенный размер частиц готового продукта путем ситового анализа.

3) Далее из формулы (2.74), с учетом (2.75) выражался коэффициент k . Зная фактический средневзвешенный размер частиц готового продукта и значения остальных параметров дезинтегратора, определялось значение коэффициента.

4) После получения массива значений коэффициента k при разных частотах вращения роторов было определено его среднее арифметическое значение, равное 1,08. Таким образом, при анализе математических выражений (2.74) и (2.75), использовался коэффициент $k = 1,08$.

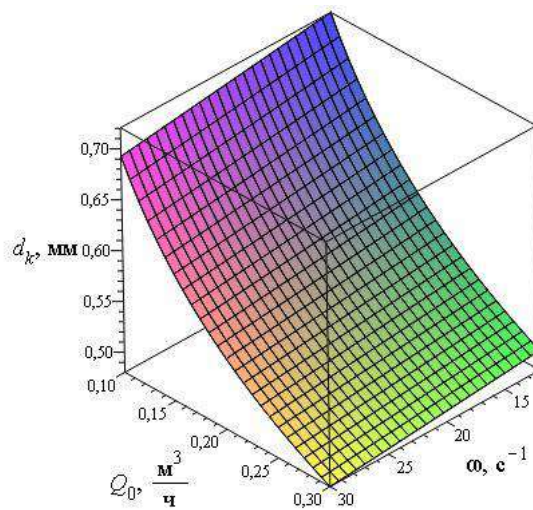


Рисунок 2.8 Графическая зависимость среднего размера частиц готового продукта от пропускной способности дезинтегратора Q_0 и частоты вращения его роторов ω

Влияние пропускной способности дезинтегратора Q_0 и частоты вращения его роторов ω на средний размер частиц готового продукта d_k показано на рисунке 2.8. Результаты анализа представленного графика указывают на увеличение тонкости помола: параметр d_k нелинейно снижается при росте как частоты вращения, так и пропускной способности дезинтегратора. К примеру, фиксированный показатель $Q_0 = 0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ при повышении частоты с 12 с^{-1} до 30 с^{-1} приводит к изменению параметра d_k от 0,6 мм до 0,5 мм. Если же удерживать частоту вращения на отметке $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$, то росту Q_0 с $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ соответствует снижение d_k с 0,7 мм до 0,5 мм.

Данный эффект связан с тем, что при большей пропускной способности через камеру помола проходит большее количество частиц материала, ввиду чего

количество их взаимодействий между собой многократно увеличивается, а увеличение частоты вращения роторов приводит к росту линейной скорости ударных элементов и увеличению силы удара.

На рис. 2.9 представлена графическая зависимость среднего размера частиц готового продукта от среднего значения диаметра частицы загружаемого материала и времени пребывания частиц материала в пространстве между рядами ударных элементов.

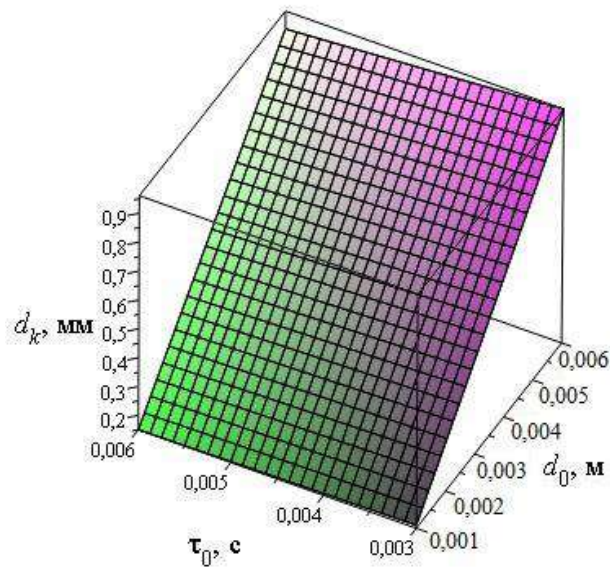


Рисунок 2.9 Графическая зависимость среднего размера частиц готового продукта от среднего значения диаметра частицы загружаемого материала и времени пребывания частиц материала в пространстве между рядами ударных элементов

Анализ графической зависимости позволяет сделать вывод, что средний размер частиц готового продукта d_k растет при увеличении диаметра частицы загружаемого материала, что обусловлено неизменным значением степени измельчения, зависящей от частоты вращения роторов, радиусов расположения рядов ударных элементов и их количества. При $\tau_0 = 0,006$ с и увеличении размера d_0 от 0,001 м до 0,006 м размер частиц d_k увеличивается с 0,15 мм до 0,9 мм.

Увеличение времени пребывания частиц материала в пространстве между рядами ударных элементов приводит к уменьшению частиц готового продукта ввиду того, что чем дольше частица находится в камере помола, тем большее количество ударов она совершает. При $d_0 = 0,005$ м и увеличении времени τ_0 от 0,003 с до 0,006 с размер частиц d_k уменьшается с 0,8 мм до 0,72 мм.

2.3 Описание процесса движения частицы измельчаемого материала в пространстве между рядами ударных элементов

Описать движение частиц измельчаемого материала в пространстве между рядами ударных элементов дезинтегратора (рис. 2.10), значения которого периодически изменяются от Δ_{min} до Δ_{max} и обратно можно следующим уравнением [60, 96]:

$$F_{\Delta} = m_0 \frac{d\vartheta_t}{dt}, \quad (2.76)$$

где F_{Δ} – величина силы, под действием которой происходит разрушение частицы измельчаемого материала в междурядье ударных элементов дезинтегратора, Н;

m_0 – масса частицы, находящейся в междурядье ударных элементов, кг;

ϑ_t – скорость частицы, движущейся в междурядье ударных элементов, м/с;

t – время, при котором частица материала находится в междурядье ударных элементов, с.

В процессе перемещения твердой частицы в междурядном объеме дезинтегратора происходит изменение ее скорости, сопровождающееся возникновением касательных напряжений τ . Связь силы F_{Δ} с действующими на частицу касательными напряжениями τ описывается соотношением [15]:

$$F_{\Delta} = \tau \cdot S_0, \quad (2.77)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения частицы, м².

Чтобы упростить дальнейшие математические преобразования, геометрия частиц измельчаемого материала принимается сферической. В данном контексте величина площади поперечного сечения частицы S_0 находится по известному соотношению:

$$S_0 = \frac{\pi d_{\Delta}^2}{4}, \quad (2.78)$$

где d_{Δ} – диаметр рассматриваемой частицы материала, находящейся в переменном пространстве между рядами ударных элементов, м.

Из результатов работы [37] известно, что касательные напряжения, возникающие в частице при её движении в переменном междурядье ударных элементов можно определить по следующей формуле:

$$\tau = \frac{\mu_{\partial p} v_t}{\Delta}, \quad (2.79)$$

здесь $\mu_{\partial p}$ – коэффициент псевдовязкого измельчения, равный 2618 Па·с [37];

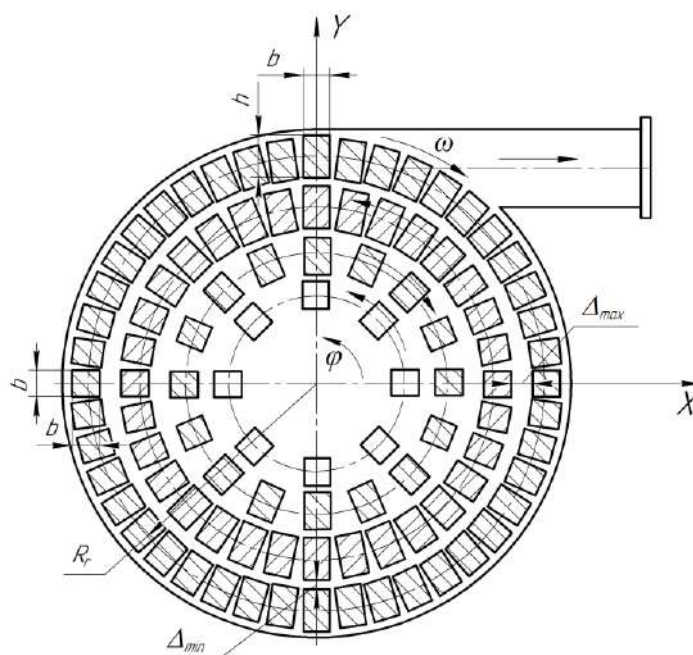


Рисунок 2.10 Поперечный разрез камеры помола дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов

Текущее расстояние Δ_i между рядами ударных элементов, учитывая условие его периодического изменения, можно определить следующим образом:

$$\Delta_i = \Delta_0 \cdot \sin(\varphi + \varphi_0), \quad (2.80)$$

где Δ_0 – амплитуда периодически изменяющегося расстояния между рядами ударных элементов, м;

φ_0 – значение начальной фазы;

φ – угол, отсчитываемый от начального направления оси «х» (рис. 2.10).

Значения параметров Δ_0 и φ_0 можно найти на основании следующих соотношений:

$$\text{при } \varphi = 0 \quad \Delta_i = \Delta_{\max} = \Delta_0 \sin \varphi_0; \quad (2.81)$$

$$\text{при } \varphi = \frac{\pi}{2} \quad \Delta_i = \Delta_{\min} = \Delta_0 \cos \varphi_0; \quad (2.82)$$

$$\text{при } \varphi = \pi \quad \Delta_i = -\Delta_{\max} = -\Delta_0 \sin \varphi_0; \quad (2.83)$$

$$\text{при } \varphi = \frac{3\pi}{2} \quad \Delta_i = -\Delta_{\min} = -\Delta_0 \cos \varphi_0. \quad (2.84)$$

На основании (2.81) – (2.84) получим:

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} \right). \quad (2.85)$$

$$\Delta_0 = \frac{\Delta_{\min}}{\cos \varphi_0} = \sqrt{\Delta_{\min}^2 + \Delta_{\max}^2}. \quad (2.86)$$

С учетом (2.85) и (2.86) формула (2.80) принимает вид:

$$\Delta_i = \sqrt{\Delta_{\min}^2 + \Delta_{\max}^2} \cdot \cos \left(\varphi + \arctg \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} \right) \right). \quad (2.87)$$

Массу частицы сферической формы определим по следующей формуле:

$$m_0 = \rho_0 \frac{\pi d_0^3}{6}, \quad (2.88)$$

где ρ_0 – плотность частицы измельчаемого материала, кг/м³.

Подставив (2.77) – (2.80), (2.88) в уравнение (2.76), получим следующее выражение:

$$\omega \frac{d\vartheta_t}{d\varphi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu_{\partial p} \vartheta_t}{\rho_0 d_0 \Delta_0 \sin(\varphi + \varphi_0)}. \quad (2.89)$$

Тогда, разделив переменные в дифференциальном уравнении (2.89), получим следующее соотношение:

$$\frac{d\vartheta_t}{\vartheta_t} = \alpha_0 \frac{d\varphi}{\sin(\varphi + \varphi_0)}, \quad (2.90)$$

здесь α_0 обозначает следующее:

$$\alpha_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu_{\partial p}}{\omega \Delta_0 \rho_0 d_0}. \quad (2.91)$$

Согласно расчетной схеме (рис. 2.6), проинтегрируем уравнение (2.90) в определенных пределах:

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_k} \frac{d\vartheta_t}{\vartheta_t} = \alpha_0 \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sin(\varphi + \varphi_0)}, \quad (2.92)$$

где ϑ_0, ϑ_k – соответственно начальная и конечная скорости частицы в объеме ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) между рядами ударных элементов.

Вычисление определенных интегралов в (2.92) позволяет получить следующий результат:

$$\ln \left| \frac{\vartheta_k}{\vartheta_0} \right| = \alpha_0 \ln \left| \frac{tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right|. \quad (2.93)$$

После математических преобразований уравнения (2.93), получим:

$$\vartheta_k = \vartheta_0 \left[\frac{tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right]^{\alpha_0}. \quad (2.94)$$

Процесс разрушения частицы измельчаемого материала в объёме между рядами ударных элементов с периодически изменяющимся расстоянием, значение которого определяется по формуле (2.80), будет осуществляться в следующем случае [37]:

$$\Delta E_k \geq \frac{\pi \sigma_p^2 d_0^3}{12E}, \quad (2.95)$$

где σ_p – предельное растягивающее напряжение измельчаемого материала, МПа;

E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа;

ΔE_k – величина изменения кинетической энергии измельчаемой частицы в результате её движения в междурядье ударных элементов с переменным зазором, определить которую можно через следующее соотношение [14]:

$$\Delta E_k = \frac{m_0}{2} (\vartheta_k^2 - \vartheta_0^2). \quad (2.96)$$

В результате подстановки (2.88) в (2.94) получим следующее соотношение:

$$\vartheta_0^2 \geq \frac{\sigma_p^2}{E \cdot \rho_0 \left[\left(\frac{tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{tg\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right)^{2\alpha_0} - 1 \right]}. \quad (2.97)$$

Допускаем, что начальная скорость частицы ϑ_0 в междурядье ударных элементов дезинтегратора связана с частотой вращения роторов следующим соотношением:

$$\vartheta_0 = \omega \cdot R_r, \quad (2.98)$$

здесь ω – частота вращения роторов дезинтегратора, c^{-1} ;

R_r – радиальный размер пространства между смежными рядами ударных элементов, м.

На основании (2.98) и (2.97) имеем:

$$R_r \geq \frac{U_r}{\omega}, \quad (2.99)$$

здесь введено следующее обозначение:

$$U_r = \frac{\sigma_p}{\sqrt{E \cdot \rho_0 \left[\left(\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi + \varphi_0}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)} \right)^{2\alpha_0} - 1 \right]}}. \quad (2.100)$$

Следовательно, полученные в рамках теоретических исследований аналитические зависимости (2.99) и (2.100) задают радиальный размер R_r между смежными рядами ударных элементов камеры помола модернизированного дезинтегратора. Разрушение частиц в периодически изменяющемся зазоре (2.80) происходит под влиянием возникающих касательных напряжений, величина которых определяется выражением (2.79). Из приведенных соотношений вытекает, что условие (2.99) является определяющим для радиуса первого ряда ударных элементов дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

На рисунке 2.11а приведены графические зависимости радиального размера R_r междурядного объема от частоты вращения роторов дезинтегратора ω и отношения максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному $\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$. График зависимости этого же параметра от исходного диаметра частиц d_0 и частоты ω представлен на рисунке 2.11б.

Из представленных на рисунке 2.11а графиков следует, что отношение максимального значения междурядного зазора к минимальному $\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$ при фиксированной частоте вращения ω на внутренних рядах ударных элементов выше, чем на наружных. Это объясняется последовательным уменьшением крупности частиц при их перемещении от центральной зоны камеры помола к ее периферийной области.

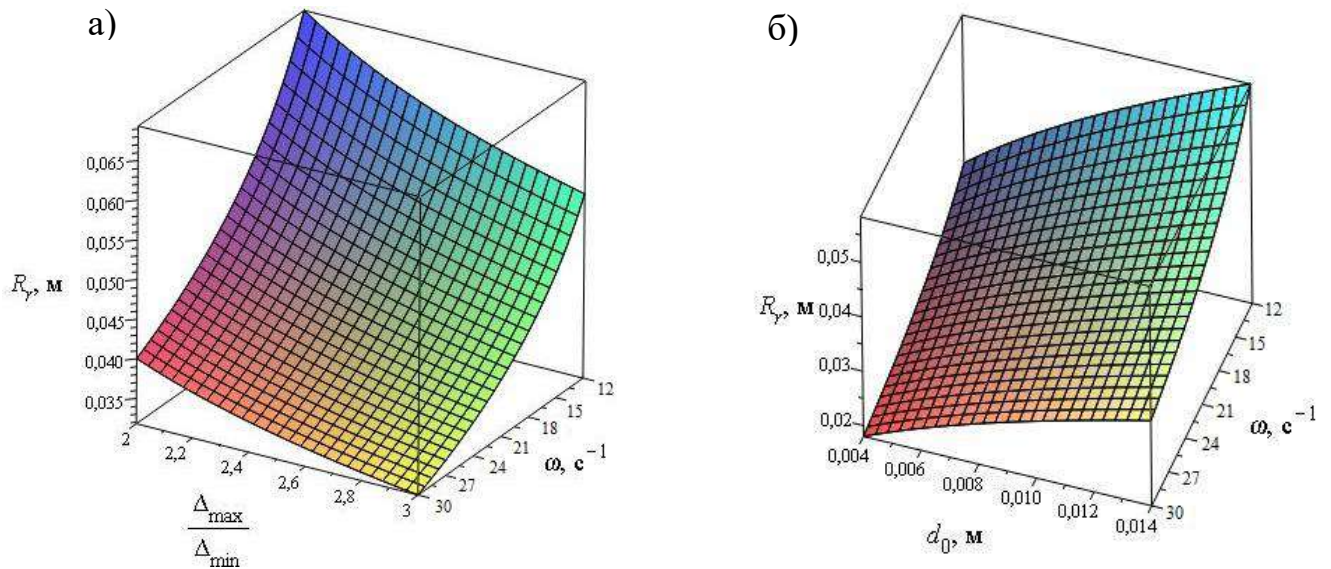


Рисунок 2.11 Графическая зависимость радиального размера R_r : а) от частоты вращения роторов ω и величины $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$; б) от частоты вращения роторов ω и исходного размера частиц материала d_0

Рост частоты вращения роторов ω при фиксированном значении параметра $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ приводит к снижению значения радиального размера R_r переменного пространства, требуемого для эффективного измельчения материалов. Это объясняется сопутствующим ростом нагрузок, воздействующих на частицы. Например, увеличение частоты вращения роторов ω с 12 с^{-1} до 30 с^{-1} при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2$ приводит к снижению параметра R_r с 0,07 м до 0,04 м, а при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$ – к снижению с 0,06 м до 0,03 м.

Графическая зависимость, представленная на рис. 2.11б позволяет сделать вывод, что увеличение диаметра исходных частиц измельчаемого материала d_0 приводит к росту радиального размера R_r . Это объясняется тем, что для эффективного измельчения частиц большего размера нужно затратить больше энергии, которая имеет прямую зависимость от линейной скорости ударных элементов. При этом линейная скорость ударных элементов увеличивается с ростом радиуса окружности их ряда и частоты вращения роторов.

2.4 Описание процесса истечения двухфазной среды из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок

На основании условий истечения воздушно-материальной среды от внешнего ряда ударных элементов в зону разгрузки, в настоящем разделе определяются

Угловой размер α_1 связан с частотой вращения ω роторов дезинтегратора следующим соотношением:

$$\alpha_1 = \omega \cdot t, \quad (2.102)$$

где t – время, за которое частица материала преодолевает участок длиной l_r , с.

Подстановка выражения (2.102) в (2.101) позволяет записать следующее выражение:

$$t = \frac{l_r}{(R + r) \cdot \omega}. \quad (2.103)$$

Для определения зависимости между радиальной скоростью $\mathcal{G}_r$ частиц материала и их диаметром d_r во время движения по равновесной траектории радиусом « $R+r$ » воспользуемся известным выражением [26, 131]:

$$\frac{m_r \mathcal{G}_r^2}{r + R} \leq 3\pi \mu d_r \mathcal{G}_r, \quad (2.104)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости запыленного воздуха в зазоре Δ_1 , $1,84 \cdot 10^{-6}$ Па·с [55];

d_r – диаметр частицы, м;

m_r – масса частицы, движущейся по траектории радиусом « $R+r$ », кг:

$$m_r = \frac{\pi \cdot d_r^3}{6} \cdot \gamma, \quad (2.105)$$

где γ – плотность частицы материала, кг/м³.

Также в выражении (2.104) введено следующее обозначение:

$$v_\varphi = \omega \cdot (r + R). \quad (2.106)$$

Подставив выражения (2.105) и (2.106) в (2.104) получим соотношение следующего вида:

$$\gamma \cdot \frac{d_r^2}{6} \cdot \omega^2 \cdot (r + R) \leq 3 \cdot \mu \cdot \mathcal{G}_r, \quad (2.107)$$

из которого выразим радиальную скорость частицы материала $\mathcal{G}_r$:

$$\mathcal{G}_r \geq \gamma \cdot \frac{\omega^2 \cdot d_r^2}{18 \cdot \mu} \cdot (r + R). \quad (2.108)$$

Известно, что для перехода частиц материала из камеры помола дезинтегратора в тангенциальный разгрузочный патрубок необходимо, чтобы за время t (2.103) частица, двигаясь в радиальном направлении, прошла не меньшее расстояние, чем расстояние Δ_2 [14]:

$$g_r \cdot t \geq \Delta_2, \quad (2.109)$$

где Δ_2 – значение минимального расстояния, необходимого для выхода частицы материала в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории, м.

Подставив выражения (2.103) и (2.108) в (2.109) получим соотношение следующего вида:

$$\gamma \frac{\omega d_r^2}{18\mu} l_r \geq \Delta_2. \quad (2.110)$$

Для круговой траектории, равной:

$$r = \frac{d_1}{2}, \quad (2.111)$$

зададимся следующим условием перехода с неё частиц материала:

$$\Delta_2 = \Delta_1. \quad (2.112)$$

В соотношении (2.111) d_1 – диаметр частиц, совершающих переход из камеры помола в тангенциальный разгрузочный патрубок, м.

Применив выражения (2.111) и (2.112) к формулам (2.101) и (2.110) получим следующее соотношение:

$$\gamma \frac{\omega d_1^2}{18\mu} \left(R + \frac{d_1}{2} \right) \alpha_1 \geq \Delta_1. \quad (2.113)$$

Заметим, что отношение:

$$\frac{d_1}{2 \cdot R} \ll 1 \quad (2.114)$$

является малой величиной первого порядка малости, которой можно пренебречь. Тогда на основании соотношения (2.113) определим диаметр частицы, выходящей в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории (2.111):

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{18\mu\Delta_1}{\gamma\omega\alpha_1 R}}. \quad (2.115)$$

На рис. 2.13 представлена графическая зависимость диаметра частиц d_1 от радиуса внешнего ряда ударных элементов R и частоты вращения роторов ω .

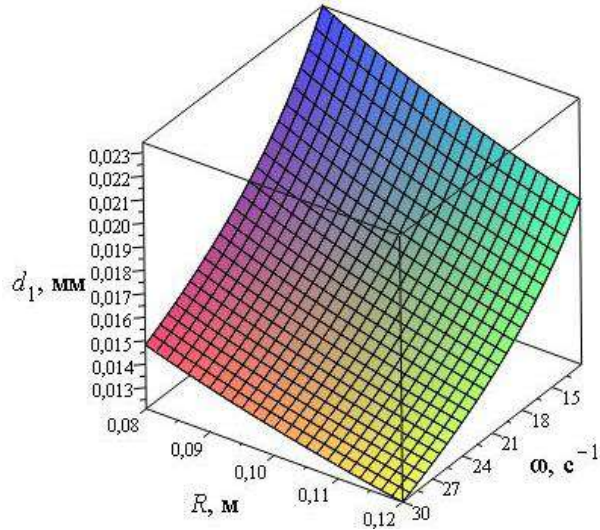


Рисунок 2.13 График изменения диаметра частиц материала, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок в зависимости от радиуса внешнего ряда ударных элементов R и частоты вращения роторов ω

В соответствии с математическим выражением (2.115) и представленной на рисунке 2.13 графической зависимостью, параметры R и ω находятся в обратной зависимости с диаметром частиц d_1 . Увеличение частоты вращения ω с 12 с^{-1} до 30 с^{-1} (при $R = 0,090 \text{ м}$) влечет за собой снижение порогового значения диаметра d_1 с $0,022 \text{ мм}$ до $0,014 \text{ мм}$. При $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$ и увеличении R от $0,090 \text{ м}$ до $0,120 \text{ м}$ диаметр частиц d_1 уменьшается с $0,014 \text{ мм}$ до $0,012 \text{ мм}$. Таким образом, минимальный диаметр частиц, выходящих в тангенциальный разгрузочный патрубок, равный $d_1 = 0,012 \text{ мм}$, достигается при следующих параметрах дезинтегратора: $\Delta_1 = 0,020 \text{ м}$, $\alpha_1 = 50^\circ = 5\pi/18 \text{ рад.}$, $\omega = 30 \text{ с}^{-1}$, $R = 0,120 \text{ м}$.

Снижение диаметра d_1 с ростом радиуса R и частоты вращения ω объясняется интенсификацией режима работы дезинтегратора, в результате чего скорость частиц возрастает. Это приводит к тому, что даже частицы с малой массой приобретают достаточную центробежную силу для преодоления сопротивления несущего воздушного потока и вылета в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории.

Ниже проанализирована динамика изменения направления скорости двухфазной среды при её переходе из камеры помола в тангенциальный разгрузочный патрубок. Данный процесс рассматривается в плоскости, перпендикулярной оси вращения роторов.

Принимается допущение, что в условиях установившегося движения двухфазной среды её перемещение из камеры помола дезинтегратора в разгрузочный патрубок происходит с постоянной по модулю скоростью.

$$\vec{v}^2 = \text{const.} \quad (2.116)$$

При этом происходит только поворот вектора скорости.

На основании расчетной схемы, представленной на рис. 2.12, поворот вектора скорости $\vec{v}$ будет описываться с помощью изменения угла $\psi(x)$ вдоль оси «ОХ».

В силу сделанных выше предположений вектор скорости «хоу» можно представить в следующем виде:

$$\vec{v} = \{v_x, v_y, 0\}, \quad (2.117)$$

$$v_x = \sqrt{\vec{v}^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi(x)\right) = \sqrt{\vec{v}^2} \cdot \sin \psi(x), \quad (2.118)$$

$$v_y = \sqrt{\vec{v}^2} \cos \psi(x). \quad (2.119)$$

Для нахождения координаты точки $A (X_L, d)$ рассмотрим уравнение окружности радиусом R_k цилиндрического корпуса в системе координат «хоу», представленной на рис. 2.12:

$$x^2 + (y - R_k)^2 = R_k^2, \quad (2.120)$$

совместно с уравнением вертикальной прямой:

$$y = d. \quad (2.121)$$

Подстановка (2.121) в (2.120) приводит к следующему выражению:

$$x^2 + d^2 - 2dR_k = 0. \quad (2.122)$$

На основании (2.122) находим:

$$x_L = \sqrt{2d \cdot R_k - d^2}, \quad (2.123)$$

где d – размер тангенциального патрубка по оси «у», м.

Уравнение прямой, соединяющей точки А и В, имеет вид:

$$y = \frac{x(d-\Delta_1)}{\sqrt{2d \cdot R_k - d^2}} + \Delta_1. \quad (2.124)$$

Исходя из выражения (2.124), находим значение угла в точке $x = 0$:

$$\psi(x = 0) = \psi_0 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{d-\Delta_1}{\sqrt{2d \cdot R_k - d^2}}. \quad (2.125)$$

Для нахождения уравнения, описывающего изменение угла при движении двухфазной среды вдоль оси «ох», необходимо найти минимальное значение следующего функционала кинетической энергии:

$$E\left(\psi(x), \frac{d\psi}{dx}\right) = \rho \frac{\bar{g}^2}{2} \int [\cos^2 \psi(x) + x_L^2 (\nabla \vec{g})^2] dV, \quad (2.126)$$

где ρ – плотность двухфазной среды;

x_L – расстояние, на котором происходит поворот вектора скорости, описываемый функцией $\psi(x)$ с граничными условиями вида:

$$\text{при } x = 0 \quad \psi(0) = \psi_0, \quad \frac{d\psi}{dx} = 0, \quad (2.127)$$

$$\text{при } x = \infty \quad (x \gg x_L) \quad \psi(\infty) = \frac{\pi}{2}, \quad \frac{d\psi}{dx} = 0. \quad (2.128)$$

Первое слагаемое в (2.126) представляет собой плотность единицы объема кинетической энергии потока вдоль оси «оу», а второе слагаемое представляет собой изменение плотности единицы объема энергии, затрачиваемой на поворот вектора скорости относительно оси «оу».

Минимизация функционала (2.126), удовлетворяющая условиям (2.127) и (2.128), позволяет получить следующее уравнение:

$$x_L^2 \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \sin \psi(x) \cdot \cos \psi(x) = 0. \quad (2.129)$$

Вычисление первого интеграла (2.129) приводит к следующему соотношению:

$$\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2 + \sin^2 \psi(x) = c_1. \quad (2.130)$$

Применив граничное условие (2.128) к (2.130) находим, что:

$$c_1 = 1. \quad (2.131)$$

С учетом (2.131) уравнение (2.130) принимает вид:

$$\frac{d\psi(x)}{\cos\psi(x)} = \pm \frac{dx}{x_L}. \quad (2.132)$$

Интегрирование уравнения (2.132) приводит к следующему результату:

$$\ln \left| tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi(x)}{2}\right) \right| = \pm \frac{x}{x_L} + c_2. \quad (2.133)$$

Применив граничное условие (2.127) к соотношению (2.133), находим, что:

$$c_2 = \ln \left| tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2}\right) \right|. \quad (2.134)$$

Подстановка (2.134) в (2.133) позволяет получить выражение, описывающее изменение угла поворота вектора скорости в тангенциальный патрубок:

$$\psi(x) = \frac{\pi}{2} - 2 \arctg \left[tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x}{x_L}\right) \right], \quad (2.135)$$

$$\vartheta_x = \sqrt{\vec{\vartheta}^2} \cos \left[2 \arctg \left(tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x}{x_L}\right) \right) \right], \quad (2.136)$$

$$\vartheta_y = \sqrt{\vec{\vartheta}^2} \sin \left[2 \arctg \left(tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x}{x_L}\right) \right) \right]. \quad (2.137)$$

Полученные зависимости (2.136) и (2.137) позволяют смоделировать процесс поворота вектора скорости двухфазной среды в момент истечения в тангенциальный разгрузочный патрубок дезинтегратора. В свою очередь, математическое выражение (2.135) служит для расчета угла поворота ψ данного вектора. Использование этих математических зависимостей дает возможность подобрать оптимальные геометрические характеристики тангенциального разгрузочного патрубка. Это способствует снижению риска турбулентных завихрений, оказывающих деструктивное влияние на производительность выгрузки из дезинтегратора.

Графические зависимости изменения угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока $\vec{\vartheta}$ вдоль оси «ОХ» (на основе рисунка 2.12) представлены на рисунках 2.14 и 2.15.

В частности, на рисунке 2.14 изображены кривые при варьируемых значениях расстояния x_L , в то время как на рисунке 2.15 приведены результаты для различных значений параметра d .

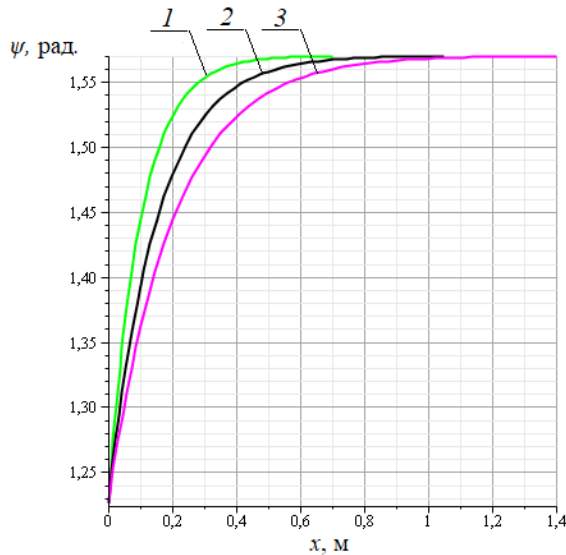


Рисунок 2.14 Графики функции $\psi(x)$:
1 – $x_L = 0,1$ м; 2 – $x_L = 0,15$ м; 3 – $x_L = 0,2$ м

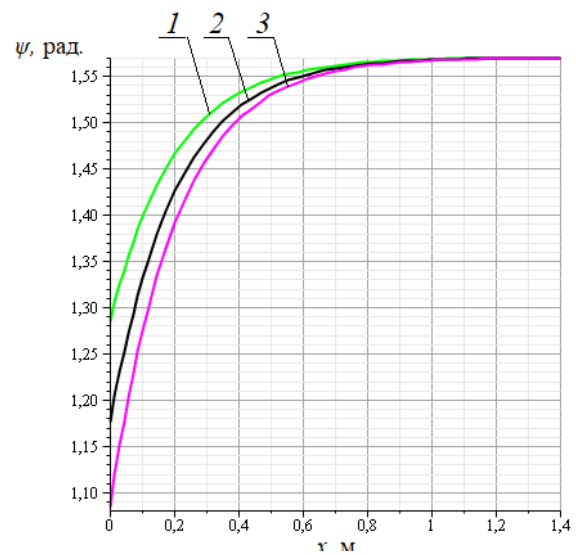


Рисунок 2.15 Графики функции $\psi(x)$:
1 – $d = 0,04$ м; 2 – $d = 0,06$ м; 3 – $d = 0,08$ м

Из анализа графиков, представленных на рис. 2.14 делаем следующий вывод. По мере приближения потока к зоне разгрузки (к точке на расстоянии x_i) происходит плавное нелинейное увеличение угла поворота ψ до тех пор, пока он не повернется на 90 град. или 1,57 рад. После поворота движение потока выравнивается и происходит параллельно оси тангенциального патрубка. Исходя из данных графиков установлено, что для камеры помола дезинтегратора с параметром $x_L = 0,1$ м длина тангенциального патрубка x , отсчитываемая от оси камеры помола, должна быть не менее 0,6 м, при $x_L = 0,15$ м длина $x = 0,9$ м, при $x_L = 0,2$ м длина $x = 1,2$ м.

Графики, представленные на рис. 2.15 показывают, что чем больше значение диаметра разгрузочного патрубка, тем большая его длина необходима для разворота двухфазного потока. При диаметре патрубка $d = 0,04$ м его длина должна составлять $x = 1,15$ м, при $d = 0,06$ м длина $x = 1,21$ м, при $d = 0,08$ м длина $x = 1,26$ м.

2.5 Выводы по главе

1. Получено математическое выражение (2.11), позволяющее определить массовую пропускную способность Q_m дезинтегратора предложенной конструкции в зависимости от конструктивных параметров узла загрузки, камеры

помола, свойств материала и частоты вращения роторов. Определены параметры дезинтегратора для достижения максимальной пропускной способности дезинтегратора ($Q_m = 527,3$ кг/ч): $\omega = 30$ с⁻¹, $\alpha = 0^\circ$, $B_k = 0,13$ м, $R_k = 0,16$ м, $R_{uu} = 0,02$ м.

2. На основании ячеечной модели исследован процесс смешивания материалов в камере помола дезинтегратора. В результате получено математическое выражение (2.26) для определения времени τ_0 пребывания частиц материала в пространстве между смежными рядами ударных элементов. Установлены закономерности изменения времени τ_0 от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора. 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, $R_{uu} = 0,02$ м. Также получено математическое выражение (2.48), 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.

3. Основываясь на математическом описании ударного разрушения частиц материала в камере помола дезинтегратора, в рамках неоднородного Марковского процесса, получено математическое выражение (2.74) для определения среднего размера d_k частиц готового продукта от конструктивно-технологических параметров дезинтегратора. Установлено, что разрабатываемая конструкция дезинтегратора позволяет прогнозировать получение продукта в диапазоне дисперсности от 0,15 мм до 0,9 мм.

4. Получено математическое выражение (2.99), определяющее минимальный радиальный размер R_r пространства между смежными рядами ударных элементов, необходимый для разрушения материала. Таким образом, радиус расположения первого ряда ударных элементов должен быть не менее значения параметра R_r . Установлено, что увеличение отношения максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному $\Delta_{max}/\Delta_{min}$ ведет к

интенсификации нагрузок, что позволяет сократить необходимый радиальный размер R_r зоны разрушения. Это подтверждает эффективность конструкции дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов. 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.

5. Получено математическое выражение (2.115), с помощью которого рассчитывается значение минимального диаметра частиц d_1 , покидающих круговую траекторию двухфазного потока и поступающих в тангенциальный разгрузочный патрубок. Выявлено, что рост радиуса внешнего ряда ударных элементов R и частоты вращения роторов ω приводит к снижению диаметра частиц d_1 . 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.

6. Получено математическое выражение (2.135), описывающее изменение угла поворота ψ вектора скорости двухфазного потока при переходе в тангенциальный 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.

ГЛАВА 3. ПЛАН, ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Цель и задачи экспериментальных исследований

Для подтверждения эффективности усовершенствованного дезинтегратора, адекватности математического описания процессов измельчения и смешивания необходимо провести экспериментальные исследования по измельчению компонентов в его лабораторном прототипе. Проведение серии опытов позволит установить взаимосвязь между основными конструктивными и технологическими параметрами дезинтегратора на его энергетические и качественные показатели, а также установить рациональные значения данных параметров для оптимизации исследуемого процесса.

Ввиду вышесказанного задачей проводимых экспериментальных исследований является определение рациональных значений основных конструктивных и технологических параметров дезинтегратора, при которых исследуемый процесс будет протекать наиболее эффективно.

Для удобства подготовки и проведения экспериментального исследования процесса совместного измельчения компонентов в лабораторной установке дезинтегратора выделим несколько этапов:

- проектирование, конструирование и разработка рабочей документации, изготовление, сборка и апробация лабораторного прототипа усовершенствованного дезинтегратора с роторами двух исполнений (классический ротор – с постоянным междурядным расстоянием; усовершенствованный – с периодически изменяющимся расстоянием между рядами)

- определение целевых функций (параметров), на основании которых будет выполняться оценка эффективности процесса совместного измельчения компонентов в лабораторной установке дезинтегратора;

- проведение поисковых экспериментов, по результатам которых определим конструктивно-технологические параметры (факторы) дезинтегратора, оказывающие наибольшее влияние на целевые функции;

- формирование матрицы планирования в соответствии с выбранным планом полного факторного эксперимента (ПФЭ);
- определение комплекса контрольно-измерительных средств и выбор методики регистрации варьируемых параметров и целевых функций;
- проведение эксперимента, в ходе которого выполняется регистрация значений целевых функций;
- построение математической модели исследуемого процесса, её графический анализ и определение рациональных режимов работы дезинтегратора;
- сравнение теоретических результатов исследования с экспериментальными.

На рис. 3.1 приведена схема последовательности проведения экспериментальных исследований процесса совместного измельчения компонентов в лабораторной установке дезинтегратора.



Рисунок 3.1 Схема последовательности проведения экспериментальных исследований процесса совместного измельчения компонентов в лабораторной установке дезинтегратора

3.2 Описание лабораторной установки дезинтегратора

Разработка лабораторной установки дезинтегратора (см. рис. 3.2 – 3.4) осуществлялась на основе запатентованного технического решения. При этом учитывались требования к исследовательскому оборудованию с учётом выбранного плана и программы ПФЭ [14, 36, 59, 119, 129]. Конструкция данной установки имеет два больших ротора (до усовершенствования и после, рис. 3.5), один малый ротор (общий, рис. 3.6а), набор ударных элементов (рис. 3.6б) и позволяет регулировать режимы её работы за счёт изменения варьируемых факторов в установленных пределах.

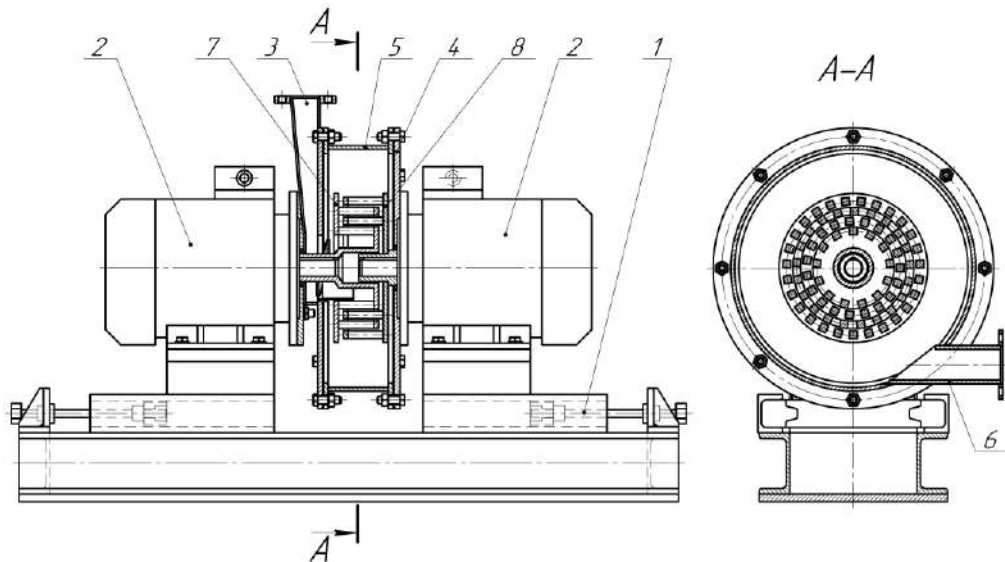


Рисунок. 3.2 Конструкция лабораторной установки дезинтегратора:
1 – рама; 2 – электродвигатели; 3 – загрузочное устройство; 4 – крышка;
5 – корпус; 6 – разгрузочное устройство; 7, 8 – роторы

Данная установка имеет несущее основание в виде металлической рамы 1, на которой с помощью болтовых соединений установлены два электродвигателя 2. К фланцам электродвигателей прикреплены загрузочное устройство 3 и крышка 4. Корпус дезинтегратора 5 имеет цилиндрическую форму, в нижней части которого тангенциально установлено разгрузочное устройство 6. Роторы левый 7 и правый 8 являются сменными элементами и крепятся шпоночным соединением на валах электродвигателей 2. На дисках каждого ротора установлены два ряда ударных элементов, которые располагаются равномерно по соосным окружностям. Роторы в «классическом» исполнении имеют в составе

ударные элементы квадратного поперечного сечения. Усовершенствованные роторы оснащаются различными по размеру ударными элементами: наряду с квадратным сечением применяются прямоугольные элементы. Причём размеры большей стороны прямоугольных ударных элементов также отличны друг от друга. Таким образом, отличие усовершенствованного дезинтегратора от «классического» заключается в использовании ударных элементов не только квадратного, но и прямоугольного сечения различного размера, что позволяет обеспечить периодическое изменение расстояния между их рядами.

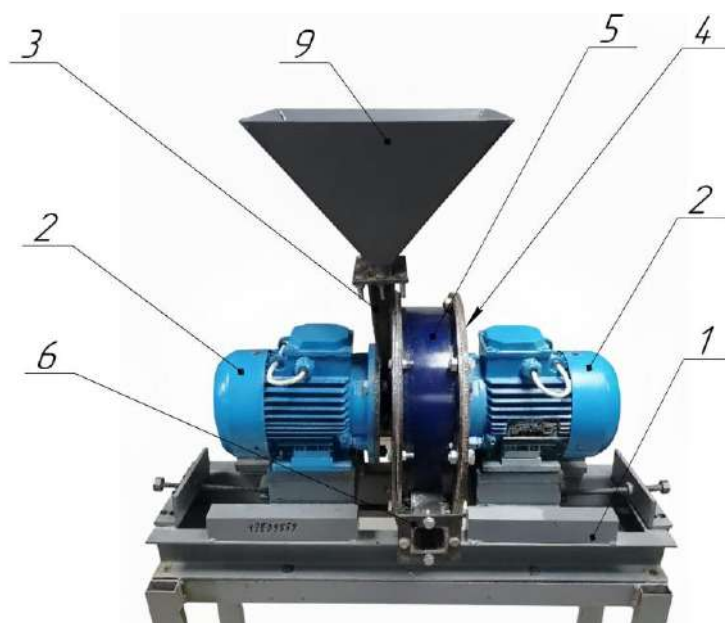


Рисунок. 3.3 Общий вид лабораторной установки дезинтегратора:
1 – рама; 2 – электродвигатели; 3 – загрузочное устройство; 4 – крышка;
5 – корпус; 6 – разгрузочное устройство; 9 – загрузочный бункер

Циклично повторяющееся сжатие рабочего объема между рядами ударных элементов при сужении междурядного зазора приводит к резкому увеличению концентрации частиц и, как следствие, к увеличению действующих на них нагрузок. Следовательно, роторы с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов обеспечивают возрастание эффекта разрушения за счёт повышения величины нагрузок, действующих на частицы обрабатываемых материалов, а также интенсификации их соударений друг с другом и с ударными элементами. В результате вышесказанного дезинтегратор с усовершенствованными роторами имеет больший выход готового продукта требуемой фракции.

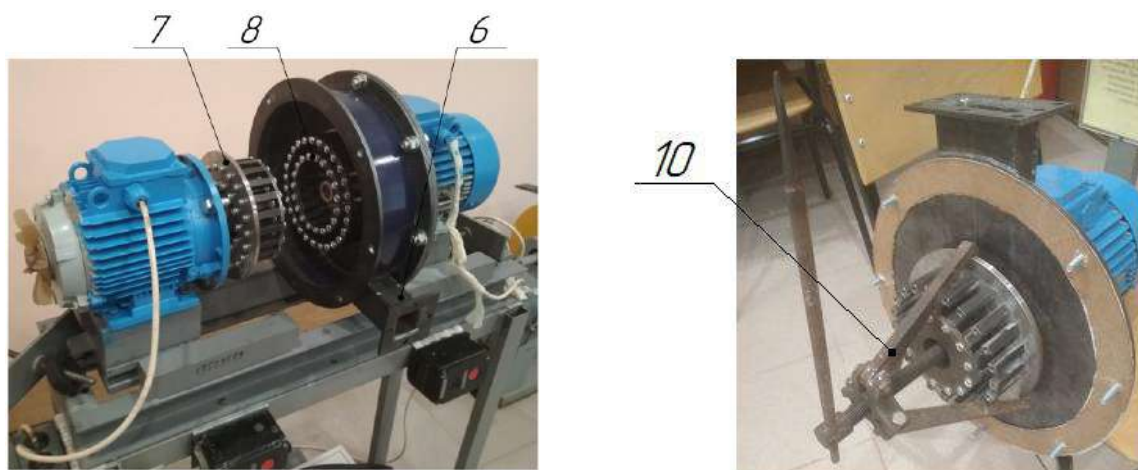


Рисунок. 3.4 Общий вид лабораторной установки дезинтегратора на этапе смены роторов:
6 – разгрузочное устройство; 7, 8 – роторы; 10 – съёмник

Работа дезинтегратора осуществляется по следующей схеме. Обрабатываемые материалы непрерывным потоком подаются в загрузочный бункер 9 специальным оборудованием для транспортировки, в частности шнековыми транспортерами. Бункер 9 через фланцевое соединение закреплен на патрубке загрузочного устройства 3, через которое реализована боковая подача материалов. В нижней части устройства 3 на валу электродвигателя установлена втулка ротора 7, по наружной поверхности которой закреплена винтовая спираль. Данная спираль выполняет функцию транспортера и направляет компоненты к первому ряду ударных элементов, где происходит первая стадия измельчения. При вращении роторов возникают центробежные силы, перемещающие частицы обрабатываемых материалов в радиальном направлении от центральной части камеры помола к её периферии. В процессе данного перемещения частицы материала испытывают высокоинтенсивное комбинированное воздействие со стороны ударных элементов последующих рядов, сочетающее в себе как истирающие, так и динамические ударные нагрузки. Удаление измельченного продукта из камеры помола осуществляется через разгрузочное устройство 6 посредством несущего аэродинамического потока, самопроизвольно генерируемого высокоскоростным вращением роторов 7 и 8.

Интенсификация процессов измельчения и смешивания в усовершенствованном дезинтеграторе достигается за счет того, что при перемещении материала через междурядное пространство переменного

поперечного сечения частицы подвергаются циклическому динамическому нагружению. Величина зазоров между рядами ударных элементов напрямую влияет на эффективность измельчения и на качество получаемой смеси. Поэтому для осуществления прецизионной регулировки величины зазоров ударные элементы можно поворачивать относительно их радиального расположения.

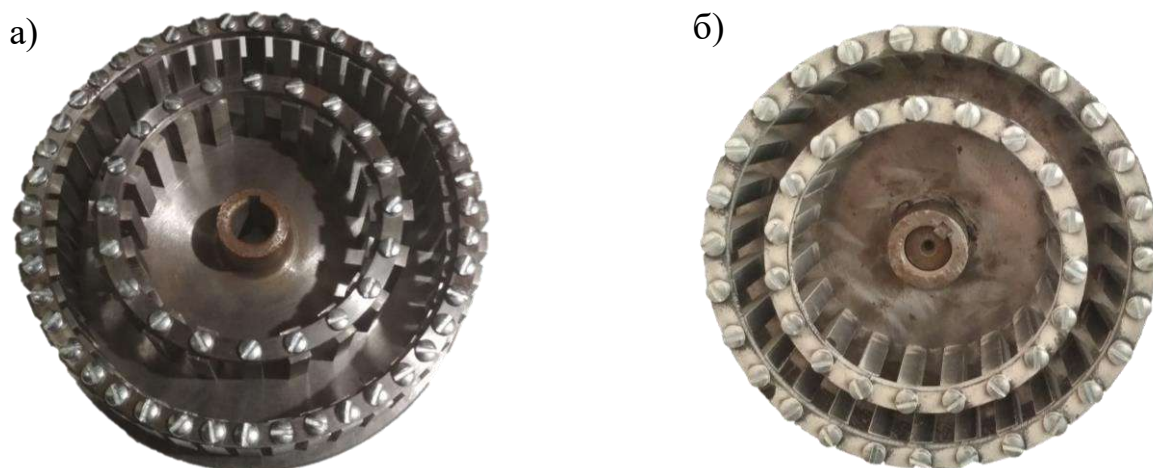


Рисунок. 3.5 Роторы дезинтегратора:
а) после усовершенствования; б) до усовершенствования



Рисунок. 3.6 а) малый ротор; б) набор ударных элементов

Подводя итог, можно утверждать, что оснащение дезинтегратора роторами, характеризующимися периодическим изменением расстояния между рядами ударных элементов, интенсифицирует комплексное воздействие на частицы обрабатываемых материалов, в результате чего достигается совокупный эффект: выраженный рост производительности по готовому продукту, снижение удельных энергозатрат и улучшение качественных показателей смешивания.

В табл. 3.1 представлены основные конструктивно-технологические характеристики лабораторной установки дезинтегратора.

Таблица 3.1 Конструктивно-технологические характеристики дезинтегратора

Показатель	Единица измерения	Численное значение
Номинальная производительность	кг/ч	70
Номинальная мощность	кВт	0,9
Радиусы рядов ударных элементов: - первый ряд - второй ряд - третий ряд - четвертый ряд	м	0,048 0,061 0,074 0,087
Длина ударных элементов:	м	0,046
Количество ударных элементов: -левый ротор -правый ротор	шт.	34 64
Номинальная частота вращения роторов: -левый ротор -правый ротор	мин ⁻¹ мин ⁻¹	1395 1395
Радиус камеры помола	м	0,115
Ширина камеры помола	м	0,093

На рис. 3.7 представлен лабораторный измельчительный комплекс, включающий дезинтегратор 1, два шнековых транспортера 5 для загрузки материалов в дезинтегратор через загрузочный бункер 6, пылевую камеру 7, циклон 8, управляющий стенд, на котором установлены частотные преобразователи 3.

Равномерная подача материалов выполняется посредством двух шнековых транспортеров 5 мощностью 0,3 кВт каждый. Диапазон расхода у транспортеров составляет от 5 до 70 кг/ч, регулируемый посредством частотных преобразователей [47].

Измельченный материал из камеры помола дезинтегратора 1 направляется с воздушным потоком в пылевую камеру 7, где ввиду потери скорости за счёт

резкого возрастания объёма, основная масса частиц измельченного продукта осаждается в нижней конической части камеры. Окончательная очистка воздушного потока от пылевидных частиц осуществляется в циклоне 8. Очищенный воздушный поток патрубком 4 отводится в безопасное место.



Рисунок. 3.7 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

3.3 Физико-механические свойства материалов, используемых в экспериментальных исследованиях

Известно, что эффективность процессов измельчения и смешивания напрямую зависит от физико-механических свойств компонентов и конструктивно-технологических параметров используемого оборудования [14].

Выбор сырьевых компонентов для измельчения и смешивания обусловлен функциональным назначением и областью применения дезинтеграторных установок. В частности, дезинтеграторы находят широкое применение в

технологии строительной керамики. Так, при производстве керамического кирпича методом полусухого формования дезинтеграторы используются для грубого помола легкоплавких и дегидратированных глин [24, 34, 117].

В рамках экспериментальных исследований настоящей работы в качестве объектов измельчения и смешивания были приняты легкоплавкая глина (Беленихинское месторождение) и известняк (Коломенское месторождение). Данный выбор позволил комплексно оценить эффективность дезинтеграторного способа обработки материалов, обладающих различающимися физико-механическими свойствами. Исследования проводились при фиксированном соотношении компонентов 1:1. Принятое равное соотношение компонентов смеси обусловлено необходимостью создания равнокомпонентной системы для выявления закономерностей совместного измельчения материалов с различающимися физико-механическими свойствами. Использование данной пропорции в качестве базовой позволяет исключить превалирующее влияние структурных особенностей одного из компонентов на энергетические показатели процесса и обеспечивает наиболее репрезентативные данные при анализе кинетики формирования гранулометрического состава смеси.

Физико-механические свойства используемых компонентов (известняка и глины) представлены в таблице 3.2. Размеры частиц измельчённого материала не должны превышать 630 мкм (Контрольное сито № 063) [117].

Таблица 3.2 Физико-механические свойства известняка и глины

Материал	Насыпная плотность, кг/м ³	Влажность по массе, %	Твердость по Моосу	Размеры исходных фракций, мм
Известняк	1400	3	3	1 – 5
Глина	1200	3	1	1 – 5

Определение исходной влажности материалов выполнялось весовым способом на основании массы проб до и после высушивания). Высушивание проводилось при температуре 105 °С в сушильном шкафу марки КВС-G 100/250 с объёмом камеры 1 м³ и температурным диапазоном от 40 до 250 °С.

В таблице 3.3 представлен исходный фракционный состав известняка и глины, подготовленных к измельчению в дезинтеграторе.

Таблица 3.3 Фракционный состав известняка и глины

Фракция, мм	Содержание, %	
	Известняк	Глина
3,15 – 5,0	57	41
2,0 – 3,15	25	33
1,0 – 2,0	18	26

3.4 Описание методики проведения экспериментов

В настоящей работе рассматриваются закономерности совместного измельчения и смешивания двух компонентов в лабораторной установке дезинтегратора до и после усовершенствования. Основной программе экспериментальной части предшествовал этап поисковых экспериментов, в ходе которых осуществлялись измерение и контроль размеров частиц исходных материалов и частиц готового продукта при различных комбинациях значений конструктивных и технологических параметров дезинтегратора [46].

Для обеспечения идентичности энергетического воздействия во всех сериях опытов проводился контроль линейных размеров ударных элементов при помощи штангенциркуля ШЦ-II-400-0,05 с ценой деления 0,05 мм и погрешностью не более $\pm 0,05$ мм.

Ввиду малых величин расстояний между рядами ударных элементов (от 1 мм до 3,5 мм), их контроль осуществлялся с помощью набора щупов №2 и №3 по ГОСТ 882-75 с шагом 0,05 мм. Данный метод позволил обеспечить точность настройки геометрии пространства между смежными рядами ударных элементов с погрешностью, не превышающей $\pm 0,02$ мм.

Контроль угла установки призматических ударных элементов осуществлялся с помощью универсального угломера типа УНИ модель 127 по ГОСТ 5378-88 с ценой деления 2'. Диапазон измерений данного инструмента составляет 0 – 180°, погрешность – не более $\pm 2'$.

Целью поисковых экспериментов являлось определение наиболее значимых факторов, влияющих на процессы измельчения и смешивания в дезинтеграторе, а также определение их уровней варьирования.

На следующем этапе необходимо провести экспериментальные исследования согласно плану полного факторного эксперимента и проанализировать полученные результаты путем построения математической модели исследуемых процессов, представленной системой уравнений регрессии и характеризующей связь между функциями отклика и основными факторами [28, 46, 59, 132].

3.4.1 Определение производительности по готовому продукту

Производительность является одним из важнейших параметров, характеризующих эффективность измельчителей.

В рамках данной работы были выполнены экспериментальные исследования производительности дезинтегратора по готовому продукту, которая определяется массовым количеством измельчённого продукта с размером частиц менее 630 мкм, отделение которого проводилось методом ситового анализа [35]. Данный метод основан на механическом способе разделения материала на фракции с частицами определенной крупности.

Сущность ситового анализа заключается в следующем. Измельченный материал загружается на сито с необходимым размером ячеек, а далее за счёт механического воздействия (вибрации, встряхивания и др.) происходит разделение материала на две части. Долю материала, оставшегося на контрольном сите называют остатком, а долю материала, прошедшего через сито – проход. Выражают данные параметры в процентах от общей массы, загружаемого на сито материала. Данный метод можно использовать как для сухого материала, так и для материала в виде взвеси [35].

Ситовой анализ можно проводить ручным и механизированным способами. В рамках данной работы применялся механизированный способ с использованием ситового анализатора «ERSTVAK SSM-300» и одним ситом №063 по

ГОСТ Р 51568-99. Частота вращения двигателя анализатора составляет 1420 об/мин, установленная мощность – 0,125 кВт, максимальная масса загрузки – 2 кг. Время встряхивания каждой навески составило от 15 до 20 мин, что фиксировалось на электронной панели анализатора. Просев считался окончанным в случае, когда после повторного двухминутного встряхивания масса остатка на сите уменьшалась не более чем на 0,2%. По завершению рассева каждой навески материала, остаток и проход взвешивались на лабораторных электронных весах «ВК-1500.1» 2-го класса точности по ГОСТ OIML-R-1-76-2011, максимальный предел взвешивания – 1,5 кг. В соответствии с установленными требованиями необходимо, чтобы сумма масс полученных долей материала составляла не менее 98 % от исходной массы навески. С учётом времени измельчения (10 мин) и массы материала, прошедшего через контрольное сито определялась производительность по готовому продукту дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

На рис. 3.8 представлены дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц по размерам (гранулометрический состав) смеси.

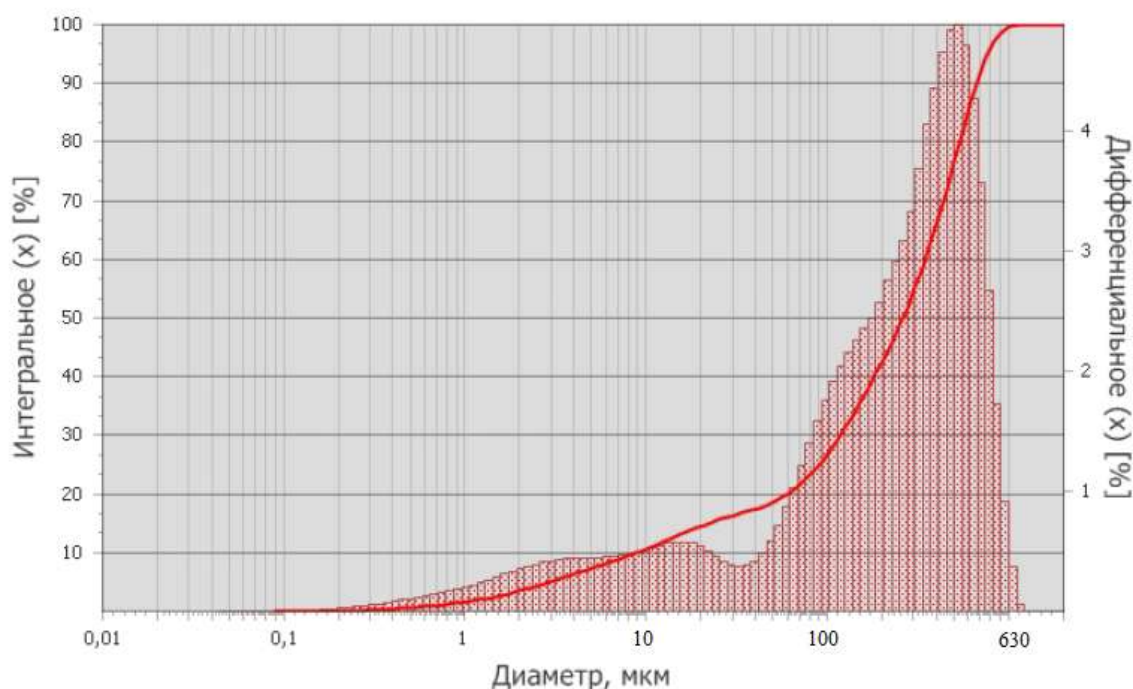


Рисунок 3.8. Дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц по размерам в двухкомпонентной сухой смеси известняка и глины, полученной на усовершенствованной лабораторной установке дезинтегратора при частоте вращения роторов 1000 об/мин

Гранулометрический состав проб получаемой смеси определялся на лазерном анализаторе размеров частиц «ANALYSETTE 22 NanoTec plus». Диапазон измерений данного анализатора составляет 0,01 – 2000 мкм.

Анализ интегральной и дифференциальной кривых распределения (рис. 3.8) показывает, что при заданном режиме измельчения основная масса частиц (72 %) сосредоточена в интервале крупности от 100 до 630 мкм. Полученные данные позволяют классифицировать данный процесс как грубый помол.

3.4.2 Определение коэффициента неоднородности получаемой смеси

Для оценки качества смешивания сырья в различных отраслях промышленности традиционно применяется коэффициент неоднородности распределения ключевого компонента V_C , измеряемый в процентах. Данный показатель представляет собой статистическую метрику и используется в не зависимости от типа или конструктивного исполнения оборудования [10, 102].

Расчет коэффициента неоднородности распределения ключевого компонента V_C базируется на предварительном измерении концентрации ключевого компонента. В экспериментальной части настоящей работы роль ключевого компонента была отведена известняку.

Метод ситового анализа является наиболее востребованным и апробированным методом определения концентрации ключевого компонента в общей массе пробы. Однако в данном случае он не может быть использован ввиду малого расхождения между размерами частиц измельчённого материала. Ввиду чего содержание ключевого компонента в каждой пробе смеси определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре серии ARL 9900 в соответствии с ГОСТ Р 55410-2013 – «Огнеупоры. Химический анализ рентгенофлуоресцентным методом». В табл. 3.4 приведены результаты РФА сухой смеси известняка с глиной, полученной при частоте вращения роторов 1000 об/мин. Ключевое преимущество рассматриваемого метода заключается в возможности анализа проб без разделения на компоненты [33].

Таблица 3.4 Результаты рентгенофлуоресцентного анализа смеси

C:\UQ5\USER\ARL\JOB\JOB.521 2023-09-07					
Sample ident = 22JL521					
Remark =					
ARL 99WS-753 Rh 60kV LiF200 LiF220 PET AX03 Method : X_UQ.					
C:\UQ5\USER\ARL\Appl\AnySample.kap					
Calculated as : Oxides Matrix (Shape & ImpFc) : 1 Teflon					
X-ray path = Vacuum Film type = No supporting film					
Case number = 0 All known					
Eff.Diam. = 25.0 mm Eff.Area = 490.6 mm2					
KnownConc = 0 %					
Rest = 0 % Viewed Mass = 18000.00 mg					
Dil/Sample = 0 Sample Height = 5.00 mm					
Compound	m/m%	StdErr%	El	m/m%	StdErr%
CaO	30,72000	0,25000	Ca	24,09	0,18
SiO2	38,05000	0,26000	Si	31,53	0,12
Fe2O3	2,31000	0,06000	Fe	1,916	0,04
Al2O3	24,80800	0,04000	Al	12,428	0,021
MgO	1,77200	0,03800	Mg	0,86600	0,023
K2O	1,16700	0,00800	K	0,13900	0,007
P2O5	0,14700	0,00700	Px	0,06440	0,0032
Na2O	0,35810	0,00840	Na	0,04310	0,0062
SO3	0,04610	0,00230	Sx	0,01850	0,0009
TiO2	0,03370	0,00220	Ti	0,02020	0,0013
SrO	0,02550	0,00130	Sr	0,02160	0,0011
PtO2	0,01940	0,00160	Pt	0,01670	0,0016
MnO	0,41940	0,00160	Mn	0,01500	0,0013
CeO2	0,01260	0,00620	Ce	0,01030	0,005
ZnO	0,01070	0,00120	Zn	0,00860	0,0009
Cr2O3	0,00890	0,00150	Cr	0,00610	0,001
Nd2O3	0,00770	0,00340	Nd	0,00660	0,0029
V2O5	0,00660	0,00180	V	0,00370	0,001
ZrO2	0,00620	0,00180	Zr	0,00460	0,0013
Nb2O5	0,00420	0,00190	Nb	0,00290	0,0014
Au	0,00410	0,00140	Au	0,00410	0,0014
NiO	0,00260	0,00110	Ni	0,00200	0,0009
KnownConc= 0 REST= 0 D/S= 0					
Sum Conc's before normalisation to 100% : 76.6 %					
Total % stripped Oxygen: 40.182					

Таким образом, процедура определения коэффициента неоднородности выполнялась в следующей последовательности. По завершению каждого опыта осуществлялся последовательный отбор 12 точечных проб, масса каждой из которых составляла 50 г. На следующем этапе, с применением метода квартования, из каждой отобранной пробы выделялась аналитическая навеска массой 5 г. С целью последующего проведения рентгенофлуоресцентного анализа, полученную навеску подвергали механическому истиранию до достижения дисперсности частиц менее 0,071 мм.

На основе экспериментальных данных и в соответствии с математическим выражением (3.1) производился расчет коэффициента неоднородности [102].

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}. \quad (3.1)$$

где n – общее количество исследованных проб;

$\bar{c}$ – среднеарифметическое значение концентрации ключевого компонента, %;

c_i – значение концентрации ключевого компонента в i -й пробе.

Оценка качества смеси выполнялась по следующим критериям [102, 117]:
 $V_c < 5\%$ – высокое качество; $5\% < V_c < 7\%$ – хорошее качество; $7\% < V_c < 15\%$ – удовлетворительное качество; $V_c > 15\%$ – неудовлетворительное качество.

3.4.3 Определение удельных энергозатрат лабораторной установки дезинтегратора

Удельные энергозатраты лабораторной установки дезинтегратора определялись по следующей формуле:

$$q = \frac{N}{Q_R}, \quad (3.2)$$

где N – мощность, расходуемая на измельчение, кВт;

Q_R – производительность по готовому продукту, кг/ч.

Проводимые экспериментальные исследования предполагают регистрацию и изменение частот вращения роторов дезинтегратора. Для этих целей использовались два преобразователя частоты DELTA VFD-EL (VFD037EL43A, 3,7 кВт, 380В).

Регистрация потребляемой мощности электропривода дезинтегратора осуществлялась в режиме реального времени путем считывания данных из внутреннего регистра 2106H преобразователя частоты DELTA VFD-EL по протоколу Modbus RTU. Обработка и визуализация данных производилась на ЭВМ с использованием программного обеспечения VFDSOft.

Приведенные приборы позволяют определять затраты электроэнергии с погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$. Данный уровень точности гарантирует высокую надежность измерений при проведении экспериментов.

3.5 План многофакторного эксперимента

В основу выбора плана полного факторного эксперимента положены результаты поисковых экспериментов, направленных на изучение совместного измельчения и смешивания глины с известняком в дезинтеграторе [46].

Сложный многофакторный характер процесса и большое количество параметров, критически влияющих на эффективность измельчения и смешивания в дезинтеграторе, обусловили выбор центрального композиционного рототабельного плана (ЦКРП-2³) в рамках проведения полного факторного эксперимента (ПФЭ). Преимущество рототабельного плана перед центральным композиционным ортогональным планом заключается в том, что во всех точках факторного пространства, находящихся на равном удалении от центра плана, сохраняется одинаковая дисперсия, что существенно повышает точность математической модели [28]. В отличие от дробного факторного эксперимента полный факторный эксперимент обеспечивает независимую оценку факторов, исключая взаимное наложение (смещение) линейных эффектов с эффектами взаимодействия [59].

На основании полученных экспериментальных данных и на базе уравнения регрессии (3.3) разработана математическая модель, которая позволяет достоверно исследовать характер влияния факторов на функции отклика.

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k b_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} \cdot x_j^2, \quad (3.3)$$

где y – исследуемая функция отклика;

b_0 – свободный член уравнения регрессии;

b_j – коэффициенты, отражающие линейное влияние факторов;

b_{uj} – коэффициенты парных эффектов взаимодействия;

b_{jj} – коэффициенты при квадратичных членах уравнения;

x_u, x_j – уровни варьирования исследуемых факторов.

Расчёт неизвестных параметров уравнения (3.3) выполняется посредством метода наименьших квадратов. Алгоритм вычислений базируется на минимизации квадратичной суммы расхождений между экспериментальными y_{ε} и теоретическими y_p значениями функций отклика.

Далее оценивается статистическая надежность вычисленных параметров уравнения регрессии. Проверка значимости коэффициентов осуществляется с помощью t -критерия Стьюдента [129]:

$$t = \frac{|b_j|}{S_{\{b_j\}}}, \quad (3.4)$$

где $S_{\{b_j\}}$ – квадратичная ошибка соответствующего коэффициента уравнения.

Незначимые коэффициенты уравнения регрессии приравниваются к нулю. Проверка адекватности математической модели выполняется по критерию Фишера (3.5) [129].

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_{табл.}, \quad (3.5)$$

где S_{ad} – дисперсия адекватности (сумма квадратов отклонений экспериментальных y_{ε} и расчётных y_p значений функции отклика в каждом опыте);

S_y – дисперсия воспроизводимости (среднее значение дисперсий всех опытов). Дисперсия воспроизводимости S_y характеризует средний разброс результатов повторных измерений во всех опытах относительно своих математических ожиданий.

Чтобы нивелировать влияние внешних факторов на исследуемые функции отклика и не допустить возникновения систематических ошибок, порядок выполнения экспериментов отличался от порядка, заданного матрицей планирования.

Функциями отклика экспериментальных исследований являются:

- Q_R – производительность по готовому продукту, кг/ч;

- q – удельные энергозатраты, кВт·ч/т;
- V_C – коэффициент неоднородности смеси, %.

Методология экспериментальных исследований базируется на варьировании ключевых параметров (факторов), влияющих на процесс. Для усовершенствованного дезинтегратора в качестве независимых управляемых факторов кинематического характера приняты частоты вращения роторов ω_1 и ω_2 . Конструктивно-геометрическая специфика исследуемой камеры помола выражена через безразмерный параметр – отношение междурядных зазоров $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$.

В таблице 3.5 приведен перечень исследуемых факторов, а также уровни их варьирования.

В таблице 3.6 представлена соответствующая матрица планирования, определяющая условия проведения опытов и предусматривающая фиксацию исследуемых факторов на пяти уровнях: среднем (0), нижнем (-1), верхнем (+1), а также в удаленных «звездных» точках со значениями -1,68 и +1,68.

Таблица 3.5 Факторы и уровни их варьирования

Исследуемые факторы	Обозначение	ΔX	Уровни варьирования				
			$-\alpha$	-1	0	1	α
Частота вращения правого ротора, мин ⁻¹	X_1	250	830	1000	1250	1500	1670
Частота вращения левого ротора, мин ⁻¹	X_2	250	830	1000	1250	1500	1670
Отношение междурядных зазоров $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$	X_3	0,25	2,1	2,25	2,5	2,75	2,9

Таблица 3.6 Матрица планирования ПФЭ ЦКРП 2³

Номер опыта	План		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1

Продолжение таблицы 3.6

Номер опыта	План		
	X_1	X_2	X_3
8	+1	+1	+1
9	-1,68	0	0
10	+1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	+1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	+1,68
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Изменение частоты вращения роторов ω_1 и ω_2 осуществлялось частотными преобразователями марки DELTA VFD-EL (VFD037EL43A, 3,7 кВт, 380В). Величина отношения максимального междурядного зазора к минимальному $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ изменялась за счёт наборов ударных элементов с разными размерами поперечного сечения и угла поворота ударных элементов α .

Для обеспечения требуемой достоверности и точности результатов экспериментальных исследований количество повторных опытов устанавливалось с учетом выбранной методики измерений и типа измерительных приборов. На основе методик, описанных в работах [44, 140], количество повторных опытов было принято равным пяти.

3.6 Выводы по главе

1. Разработана и научно обоснована комплексная программа экспериментальных исследований, обеспечивающая выявление закономерностей процессов измельчения и смешивания сырьевых материалов в усовершенствованном дезинтеграторе.

2. На базе лабораторной установки дезинтегратора разработан измельчительный комплекс, оснащенный вспомогательным оборудованием и обеспечивающий проведение достоверных экспериментальных исследований процессов измельчения и смешивания сырьевых материалов, оценку технологического потенциала усовершенствованной конструкции, а также определение рациональных режимов её эксплуатации.

3. Приведены марки и основные технические характеристики контрольно-измерительных приборов, задействованных в ходе экспериментов. Также приведены фракционный состав и физико-механические характеристики исходных сырьевых материалов – известняка и глины.

4. Определена и теоретически обоснована методика проведения экспериментальных исследований процессов измельчения и смешивания сырьевых материалов в усовершенствованном дезинтеграторе.

5. Выбран план полного факторного эксперимента – ЦКРП-2³, определены исследуемые технологические характеристики (функции отклика) дезинтегратора, а также варьируемые конструктивно-технологические параметры (факторы) и уровни их варьирования. Для обеспечения высокой степени достоверности и воспроизводимости получаемых экспериментальных данных определено количество повторных опытов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1 Исследование параметров работы дезинтегратора

Принцип работы дезинтеграторов с модернизированной и классической конструкцией роторов, а также сравнительный анализ их ключевых конструктивных различий рассмотрены в главе 3 настоящей работы. На основе анализа установок сформирован перечень ключевых факторов, определяющих как кинетику механического разрушения материалов, так и качество получаемой смеси. Выходными показателями эффективности (функции отклика) дезинтегратора являются: производительность по готовому продукту Q_R (фракция $-0,630 +0$), коэффициент неоднородности смеси V_C и удельные энергозатраты q . В обобщенном виде функциональная связь между исследуемыми факторами и функциями отклика имеет следующий вид:

$$Q_R, V_C, q = f(\omega_1, \omega_2, \Delta_{min}, \Delta_{max}, B_{\kappa}, D_{\kappa}, h, D_p, \sigma_{сж}, n, n_{\kappa p}),$$

где ω_1, ω_2 – частоты вращения роторов;

$\Delta_{min}, \Delta_{max}$ – минимальное и максимальное расстояние между рядами ударных элементов;

B_{κ} – ширина камеры помола;

h – высота ударных элементов;

D_{κ} – диаметр камеры помола;

D_p – диаметр роторов;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности измельчаемого материала;

n – количество ударных элементов.

Экспериментальный раздел работы посвящен комплексному исследованию процессов измельчения и смешивания двух компонентов (известняка и глины) в модернизированной лабораторной установке дезинтегратора.

С целью научно-практического обоснования эффективности предлагаемой конструкции была выполнена серия поисковых экспериментов. Главными задачами этого этапа являлись: сравнительный анализ работы модернизированного и классического дезинтеграторов в идентичных условиях, а также определение наиболее значимых факторов и уровней их варьирования. В качестве определяющих показателей работы установки рассматривались вышеуказанные функции отклика. Также, для определения удельных энергозатрат, проводились измерения потребляемой электрической мощности P .

Поисковые и основные эксперименты проводились следующим образом. Предварительно разогнав роторы до необходимой частоты вращения, в загрузочное устройство дезинтегратора равномерно, посредством конвейеров шнековых, подавались известняк и глина в соотношении 1:1. При этом были использованы материалы класса -5 +1. Подача материалов выполнялась непрерывно в течение 10 мин. По окончании времени измельчения регистрировалась мощность. Измельчённый материал просеивали через сито № 020, таким образом, определяя производительность по готовому продукту Q_R . Оценка качества смеси была основана на вычислении коэффициента неоднородности V_C . Для этой цели определялось содержание ключевого компонента (известняка) в каждой пробе смеси методом РФА. Ширина B_K и диаметр D_K камеры помола дезинтегратора принимались за постоянную величину. Линейная скорость ударных элементов роторов, от которой зависит разрушение частиц материала при соударении с ними, варьировалась за счёт изменения частоты вращения ω_1 правого ротора и частоты вращения ω_2 левого ротора. При этом, диаметральный размер расположения ударных элементов сохранялся неизменным. Также принимаем допущение о неизменности предела прочности $\sigma_{сж}$ на сжатие для материалов, подвергаемых измельчению. Количество ударных элементов n и их высота h также являются постоянными величинами, а отношение максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ варьировались в заданных пределах с целью

изучения их влияния на исследуемые параметры (Q_R , V_C и q), определяющие эффективность работы дезинтегратора. В результате поисковых экспериментов установлены следующие основные варьируемые факторы: ω_1 – частота вращения правого ротора, мин^{-1} ; ω_2 – частота вращения левого ротора, мин^{-1} ; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ – отношение максимального и минимального расстояний между рядами ударных элементов (таблица 3.3).

Производительность по готовому продукту Q_R является основным показателем эффективности работы дезинтегратора, на которую в свою очередь, наибольшее влияние оказывает частота вращения роторов ω_1 и ω_2 [14]. В таблице 4.1 приведены результаты сравнительного анализа производительности Q_R дезинтегратора с классическими и с усовершенствованными роторами, в условиях пропорционального роста частоты их вращения от 830 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} .

Таблица 4.1 Производительность дезинтегратора по готовому продукту

Частота вращения роторов, мин^{-1}	Производительность Q_R усовершенствованного дезинтегратора, кг/ч	Производительность Q_R дезинтегратора классической конструкции, кг/ч
830	17,4	15,3
1000	21,1	18,5
1250	33,9	29,7
1500	55,1	48,1
1670	74,6	65

Результаты поисковых экспериментов, представленные в таблице 4.1 показывают, что при увеличении частоты вращения роторов с 830 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} производительность дезинтегратора по готовому продукту Q_R растёт как с роторами классической конструкции, так и с усовершенствованными. Однако, значения производительности Q_R выше у дезинтегратора с усовершенствованными роторами, ориентировочно, на 14 %, что обусловлено меньшим остатком на сите за счёт большего эффекта помола. С увеличением частоты вращения разница в производительности возрастает и достигает своего максимума (14,8 %) при частоты вращения, равной: $\omega_1 = \omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

В ходе проведения поисковых экспериментов получены данные по удельному энергопотреблению q лабораторной установки в зависимости от частоты вращения её роторов. Результаты сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 Удельные энергозатраты дезинтегратора

Частота вращения роторов, мин ⁻¹	Удельные энергозатраты q усовершенствованного дезинтегратора, кВт·ч/т	Удельные энергозатраты q дезинтегратора классической конструкции, кВт·ч/т
830	15,7	17,6
1000	19,6	22
1250	23,5	26,3
1500	25,5	28,6
1670	26,6	29,9

Данные таблицы 4.2 показывают, что повышение частоты вращения роторов приводит к закономерному росту удельных энергозатрат q . Однако модернизированный дезинтегратор во всем диапазоне скоростей демонстрирует более высокую энергетическую эффективность: его удельные энергозатраты ниже, примерно, на 12 % по сравнению с дезинтегратором классической конструкции. Это обусловлено тем, что опережающий рост производительности Q_R перекрывает увеличение потребляемой электрической мощности P . Наибольшая разница по энергоэффективности (12,4 %) зафиксирована при максимальной частоте вращения роторов, равной $\omega_1 = \omega_2 = 1670$ мин⁻¹.

В таблице 4.3 представлены результаты исследования влияния скоростного режима роторов на коэффициент неоднородности смеси V_C .

Таблица 4.3 Коэффициент неоднородности смеси

Частота вращения роторов, мин ⁻¹	Коэффициент неоднородности V_C усовершенствованного дезинтегратора, %	Коэффициент неоднородности V_C дезинтегратора классической конструкции, %
830	11,4	14,4
1000	8,2	10,3
1250	6,9	8,7
1500	7,2	9,1
1670	7,8	9,9

Значения коэффициента неоднородности смеси V_C , представленные в таблице 4.3 показывают, что при измельчении компонентов в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов получается более качественная смесь, чем при измельчении в дезинтеграторе с роторами классической конструкции, на что указывает снижение коэффициента неоднородности на 26 %.

Лабораторный измельчительный комплекс на базе усовершенствованного дезинтегратора позволил получить экспериментальные данные по совместному измельчению известняка и глины. Далее представлены результаты их анализа.

4.2 Регрессионный анализ

В таблице 3.3 указаны факторы (конструктивно-технологические параметры) лабораторной установки дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов и их уровни варьирования. Изменение значений данных факторов перед проведением каждого опыта выполнялось на основании матрицы планирования, приведенной в таблице 3.6 и соответствующей ПФЭ ЦКРП 2^3 .

При выполнении опытов не учитывались факторы, которые в той или иной степени оказывают влияние на исследуемый процесс. Такими факторами являются: физико-механические свойства известняка и глины; их гранулометрический состав; температура, влажность и давление воздуха в лаборатории. Ввиду этого, для исключения систематических ошибок в результатах, каждая серия повторных опытов проводилась в случайной последовательности, установленной с помощью генератора случайных чисел. Для получения результатов необходимой точности и исключения неоправданных затрат средств и времени было рассчитано минимальное количество повторных опытов [46], равное пяти.

В таблице 4.4 указаны усреднённые результаты проведенных опытов и числовые значения факторов, соответствующие выбранному плану.

Анализ результатов экспериментальных исследований процесса измельчения и смешивания известняка с глиной в дезинтеграторе выполним по математической модели, состоящей из уравнений регрессии функций отклика. Расчёт коэффициентов данных уравнений и оценка их адекватности выполнены с помощью электронно-вычислительной машины (ЭВМ).

Таблица 4.4 Результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований

№ опыта	Варьирование фактора			Исследуемые параметры		
	x_1 (ω_1 , мин ⁻¹)	x_2 (ω_2 , мин ⁻¹)	x_3 ($\Delta_{max} / \Delta_{min}$)	Q_R , кг/ч	q , кВт·ч/т	V_c , %
1	1000	1000	2,25	25,2	20	9,4
2	1500	1000	2,25	38,4	25	7,8
3	1000	1500	2,25	38	23,3	7,5
4	1500	1500	2,25	56,8	28,3	7,3
5	1000	1000	2,75	25,6	18,3	9
6	1500	1000	2,75	39,2	23,4	7,7
7	1000	1500	2,75	38,8	21,7	7,5
8	1500	1500	2,75	59,6	28,3	7,2
9	830	1250	2,5	22,8	25	10
10	1670	1250	2,5	57,6	31,6	8,5
11	1250	830	2,5	23,6	24,9	8
12	1250	1670	2,5	56,8	28,4	8,5
13	1250	1250	2,1	30	28,3	6,5
14	1250	1250	2,9	44	25	7,3
15	1250	1250	2,5	36,8	26,6	7,1
16	1250	1250	2,5	36,8	28,4	6,8
17	1250	1250	2,5	37,2	26,5	7,1
18	1250	1250	2,5	37,2	26,7	7,1
19	1250	1250	2,5	37,2	26,5	7
20	1250	1250	2,5	36,8	28,2	6,9

4.3 Зависимость производительности по готовому продукту от варьируемых факторов

Используя общий вид уравнения регрессии и стандартный метод расчета его коэффициентов, соответствующий ЦКРП 2³, получаем уравнение регрессии в кодированном виде, описывающее поведение производительности по готовому продукту дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов:

$$Q_R = 36,684 + 9,144 \cdot X_1 + 8,832 \cdot X_2 + 2,076 \cdot X_3 + 1,344 \cdot X_1^2 + 1,344 \cdot X_2^2 + 0,212 \cdot X_3^2 + 1,6 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,3 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4.1)$$

Анализ структуры уравнения (4.1) позволяет сделать выводы о степени и характере воздействия исследуемых факторов на функцию отклика Q_R . Наибольшие величины линейных коэффициентов соответствуют факторам X_1 (9,144) и X_2 (8,832), определяющим частоты вращения правого ω_1 и левого ω_2 роторов соответственно. Следовательно, эти факторы и оказывают ключевое влияние на изменение производительности. Влияние частоты ω_1 на производительность немного выше, чем ω_2 , что связано с расположением на правом роторе большего количества ударных элементов и их более высокой линейной скоростью на внешнем ряду.

Перед коэффициентами факторов X_1 и X_2 в первой степени стоит знак «+», что свидетельствует о первоначально возрастающем характере кривых параболического вида. Коэффициенты, стоящие перед X_1^2 и X_2^2 также имеют положительные знаки, из чего следует, что увеличение частоты вращения роторов ω_1 и ω_2 приводит к постоянному увеличению производительности Q_R .

Величина значения коэффициента перед X_3 показывает влияние на значение производительности Q_R фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. Положительные знаки перед коэффициентами фактора X_3 в первой степени и X_3^2 свидетельствуют о том, что при увеличении значения фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ производительность Q_R растёт, что происходит за счёт резкого увеличения концентрации измельчаемых частиц между рядами ударных элементов и действующих на них нагрузок.

Далее определим значимости варьируемых факторов X_1 , X_2 , X_3 (рис. 4.1), для коэффициентов которых общая сумма по модулю равна 100 % [59, 132].

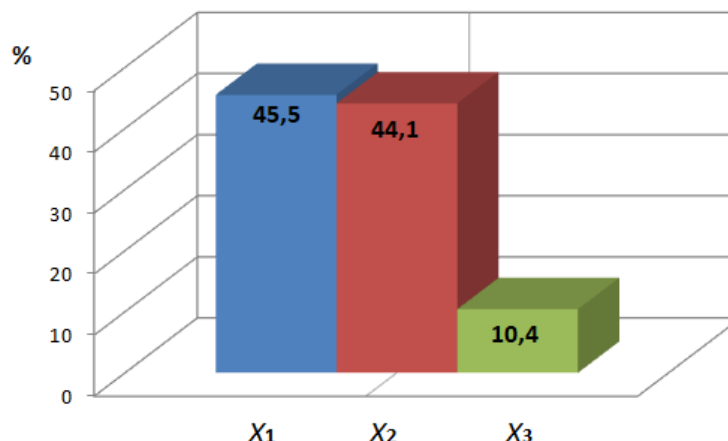


Рисунок 4.1. Значимость влияния факторов на производительность дезинтегратора по готовому продукту

Как видно из приведенной гистограммы, определяющий вклад в производительность вносят факторы X_1 (45,5 %) и X_2 (44,1 %) (соответственно частота вращения правого ротора ω_1 и левого ротора ω_2). Значимость фактора X_3 равна 10,4 %.

Для проверки однородности дисперсий использовался критерий Кохрена при выполнении условия $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$. Так как $G_{\text{расч}} = 0,11 < G_{\text{табл}} = 0,15$, то условие воспроизводимости опытов выполнено.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии выполнялась по критерию Стьюдента на основании условия $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$. В результате чего установлено, что все коэффициенты уравнения значимы: $154,9 > 2,571$; $149,7 > 2,571$; $35,2 > 2,571$; $23,6 > 2,571$; $23,6 > 2,571$; $3,7 > 2,571$; $20,8 > 2,571$; $3,9 > 2,571$; $3,9 > 2,571$.

Проверка адекватности уравнения регрессии проводилась по критерию Фишера на основании условия $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$. Так как $F_{\text{расч}} = 2,81 \leq F_{\text{табл}} = 4,74$, условие адекватности представленной математической модели выполнено.

Декодируем уравнение регрессии (4.1) в натуральный вид:

$$Q_R = 84,44 - 0,0612 \cdot \omega_1 - 0,0624 \cdot \omega_2 - 20,66 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1^2 + 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_2^2 + 3,39 \cdot (\Delta_{\max} / \Delta_{\min})^2 + 2,56 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + 0,0048 \cdot \omega_1 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 0,0048 \cdot \omega_2 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min}. \quad (4.2)$$

На рис. 4.2 приведена серия графических зависимостей изменения производительности по готовому продукту Q_R , анализ которых позволил провести всестороннюю оценку взаимодействия факторов и их воздействия на величину функции отклика.

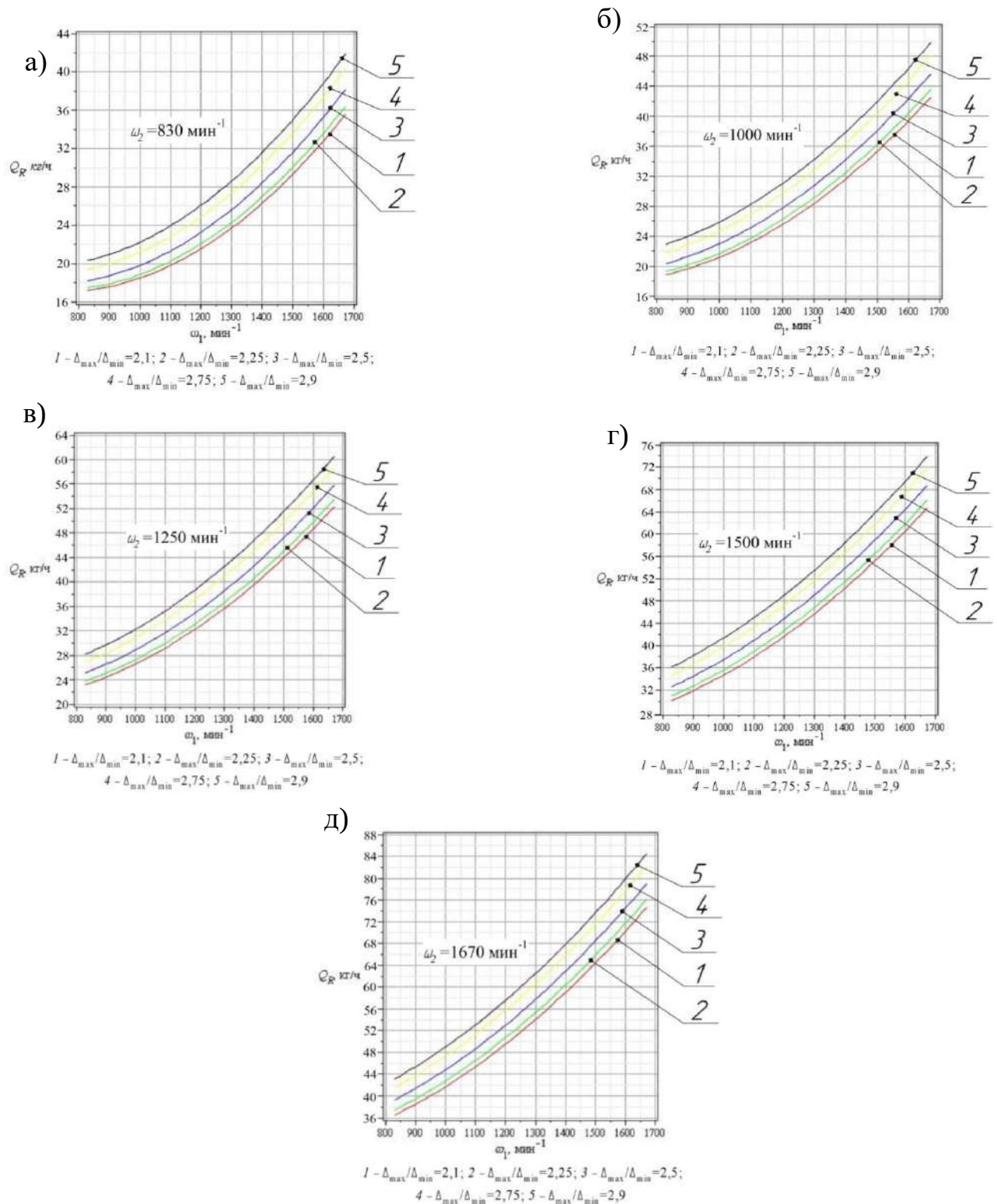


Рисунок 4.2. Зависимости производительности по готовому продукту Q_R от частоты вращения правого ротора ω_1 при фиксированных значениях факторов ω_2 и $\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$

Кривые, представленные на рисунке 4.2, наглядно демонстрируют, что при любых фиксированных значениях частоты вращения ω_2 и фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ увеличение значения частоты вращения ω_1 от 830 мин⁻¹ до 1670 мин⁻¹ оказывает положительное воздействие на производительность Q_R , приводя к её росту.

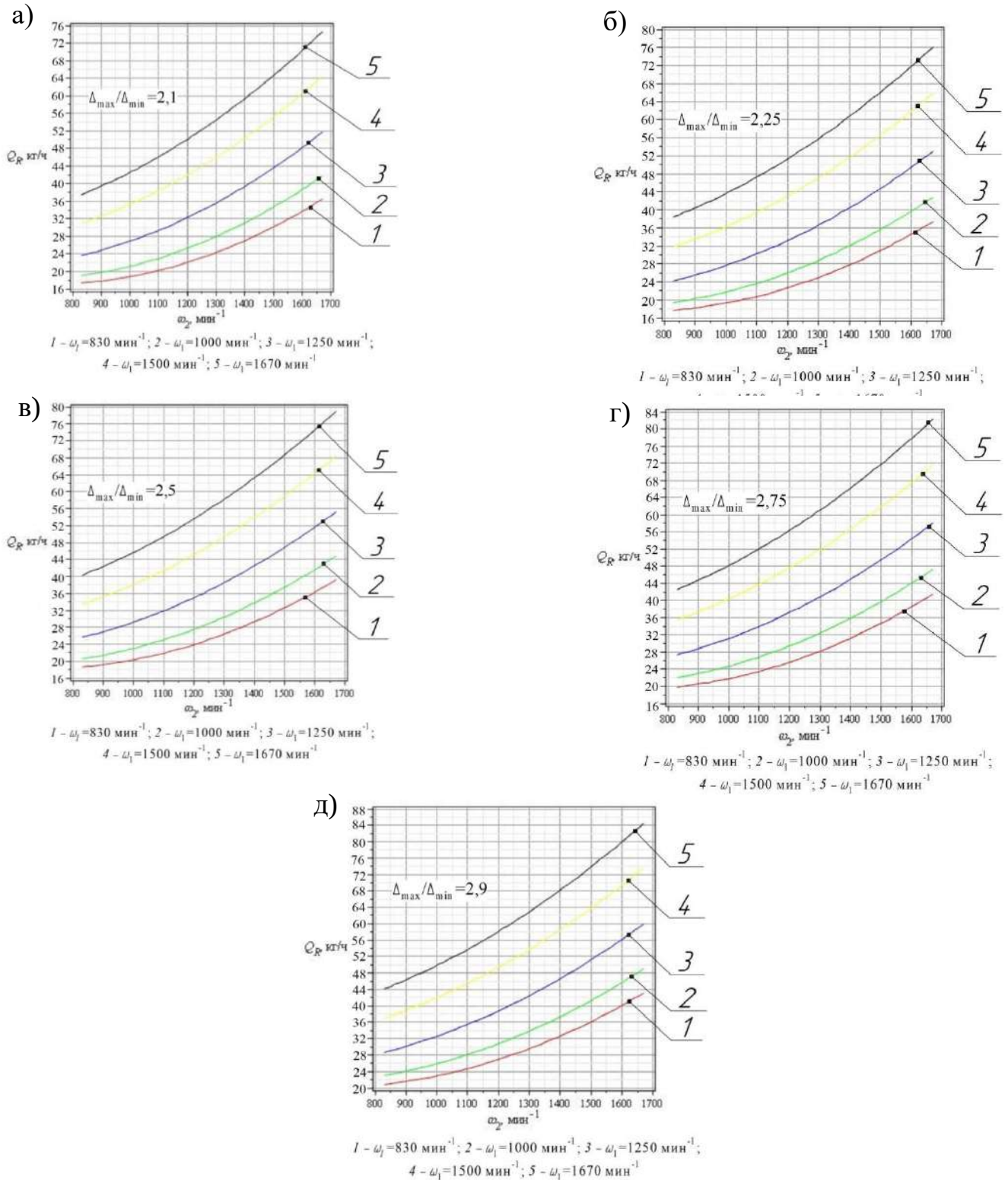


Рисунок 4.3. Зависимости производительности по готовому продукту Q_R от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях факторов $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ и ω_1

Аналогичный характер имеет зависимость $Q_R = f(\omega_2)$, что подтверждают кривые, представленные на рисунке 4.3. Данные кривые наглядно демонстрируют, что повышение частоты вращения ω_2 во всем исследуемом диапазоне сопровождается устойчивым ростом производительности Q_R .

Физический механизм влияния факторов частоты вращения роторов (ω_1 и ω_2) заключается в прямо пропорциональной связи между линейной скоростью ударных элементов и кинетической энергией частиц. При росте линейной скорости соударения динамический импульс удара увеличивается пропорционально квадрату скорости, что приводит к превышению предела прочности материала и глубокому трещинообразованию в частицах обрабатываемых материалов.

По результатам анализа кривых, представленных на рисунках 4.2 и 4.3, определены экстремальные значения производительности. Максимальное значение производительности достигается при наибольших значениях исследуемых факторов ($\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$) и составляет 84,4 кг/ч (рис. 4.2д и рис. 4.3д).

Производительность Q_R принимает минимальное значение при наименьших значениях исследуемых факторов ($\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$) и составляет 17,2 кг/ч (рис. 4.2а и рис. 4.3а).

На рис. 4.4 приведены графические зависимости изменения производительности по готовому продукту Q_R от величины фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ при фиксированных значениях частоты вращения правого ротора ω_1 и левого ротора ω_2 .

Кривые на представленных зависимостях показывают рост производительности Q_R при увеличении величины отношения $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ от 2,1 до 2,9 единиц при всех значениях частоты вращения роторов ω_1 и ω_2 . Максимальное значение производительности дезинтегратора получено при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$; $\omega_1 = \omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$ и составило 84,4 кг/ч (рис. 4.4д). Минимальное значение производительности дезинтегратора получено при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; $\omega_1 = \omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$ и составило 17,2 кг/ч (рис. 4.4а).

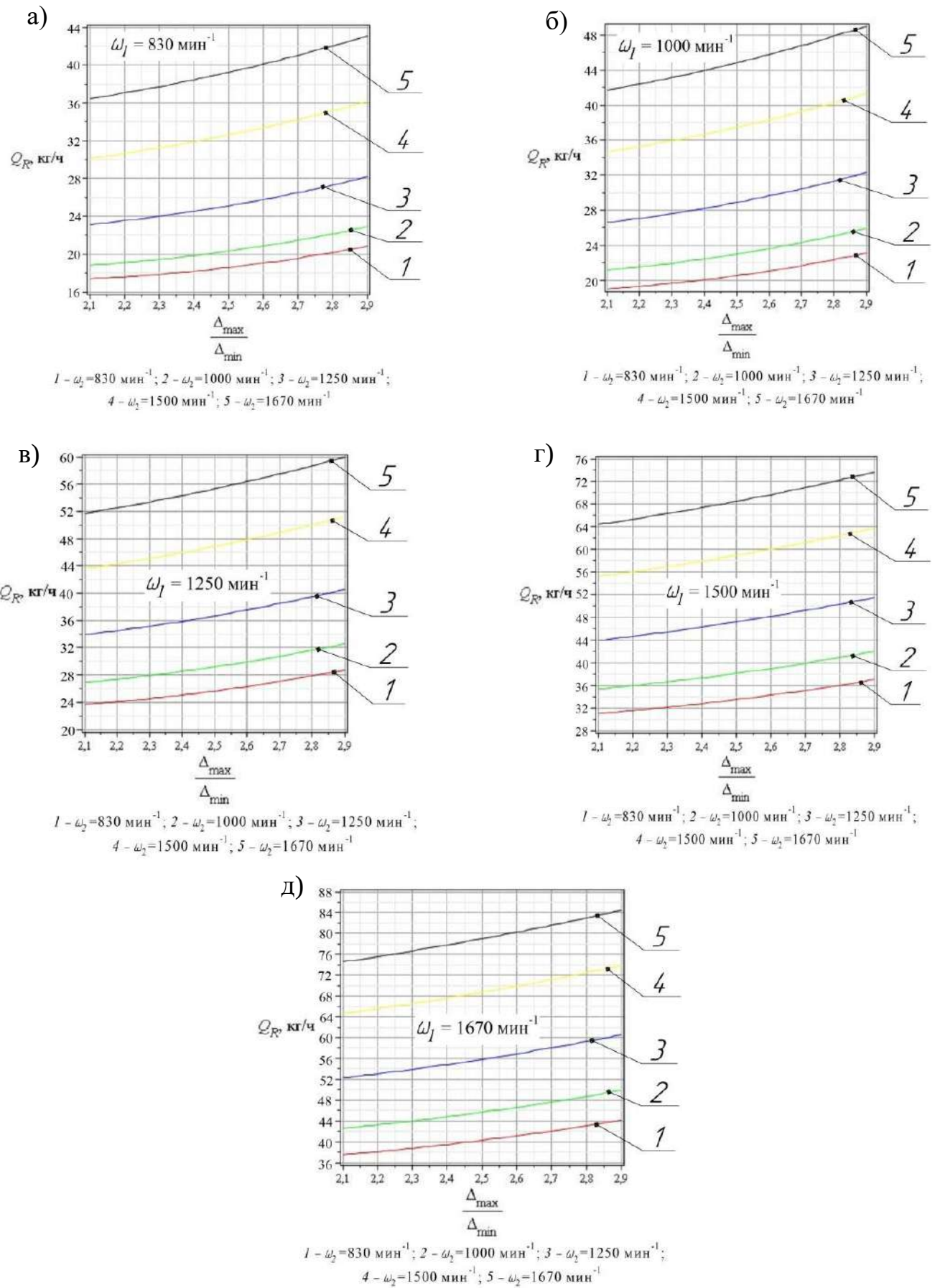


Рисунок 4.4. Зависимости производительности по готовому продукту Q_R от фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ при фиксированных значениях ω_1 и ω_2

Рост производительности Q_R (рис. 4.4) с увеличением фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ обусловлен селективным разрушением сырья в изменяющемся объеме между рядами. В области $\Delta_{\max}$ резко повышается концентрация тонкодисперсных частиц, что приводит к преобладанию раздавливающих, истирающих и сдвиговых нагрузок как за счет контакта с ударными элементами, так и за счет интенсивного взаимодействия частиц друг о друга.

Анализ кривых (рис. 4.2–4.4) подтверждает, что рост частот вращения роторов ω_1 и ω_2 резко повышает производительность Q_R . Данный эффект объясняется скачкообразным возрастанием кинетической энергии соударения: высокая линейная скорость ударных элементов, распложенных на вращающихся в противоположные стороны роторах, создает экстремальные динамические нагрузки, превышающие предел прочности обрабатываемого материала.

Фактор $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ позволяет обеспечить условие резкого увеличения раздавливающих и истирающих нагрузок на мелкие частицы измельчаемого материала за счёт повышения их концентрации в ограниченном пространстве между рядами ударных элементов (зона максимального зазора $\Delta_{\max}$), что также способствует росту производительности по готовому продукту Q_R .

4.4 Зависимость удельных энергозатрат от варьируемых факторов

Ввиду ежегодного роста цен на электроэнергию показатель энергоэффективности измельчителей очень важен для потребителей данного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований измельчения известняка с глиной в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов определялись значения удельных энергозатрат q (таблица 4.4). Данные значения позволили получить уравнение регрессии (4.3) в кодированном виде, описывающее изменения удельных энергозатрат

дезинтегратора при варьировании его конструктивных и технологических параметров:

$$q = 27,1 + 2,4 \cdot X_1 + 1,5 \cdot X_2 - 0,765 \cdot X_3 - 0,358 \cdot X_1^2 - 0,941 \cdot X_2^2 - 0,941 \cdot X_3^2 + 0,188 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,213 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,213 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4.3)$$

По значениям коэффициентов составленного уравнения регрессии (4.3) определим значимость каждого фактора в процентном соотношении.

Как видно из уравнения наибольшие коэффициенты имеют факторы X_1 (2,4) и X_2 (1,5). Из чего следует, что частоты вращения роторов дезинтегратора оказывают наибольшее влияние на изменение удельных энергозатрат. Правый ротор имеет значительно большее количество ударных элементов, а также больший вес в сравнении с левым ротором, что отражается в степени их влияния на функцию отклика.

Сочетание положительных знаков при коэффициентах линейных членов уравнения ($+2,4 X_1$, $+1,5 X_2$) и отрицательных знаков при коэффициентах квадратичных членов ($-0,358 X_1^2$, $-0,941 X_2^2$) свидетельствует о параболическом характере отклика, кривые которого обращены выпуклостью вверх. Это указывает на наличие экстремумов (максимумов): первоначальный рост частоты вращения роторов вызывает интенсивный рост удельных энергозатрат с последующим их снижением, при достижении критического скоростного режима.

Отрицательный знак при коэффициенте линейного члена уравнения ($-0,765 X_3$), соответствующего фактору $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$, а также при коэффициенте его квадратичного члена ($-0,941 X_3^2$), указывает на общую тенденцию к снижению удельных энергозатрат при увеличении значения отношения междурядных зазоров. Физическая причина заключается в том, что увеличение $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ приводит к росту производительности Q_R и незначительному повышению абсолютной потребляемой мощности.

Определяем значимости варьируемых факторов X_1 , X_2 , X_3 (рис. 4.5). Согласно полученной гистограмме, доминирующий вклад в изменение удельных энергозатрат вносит частота вращения правого ротора X_1 (51,9 %). На долю факторов X_2 и X_3 приходится 33,3 % и 14,8 % соответственно.

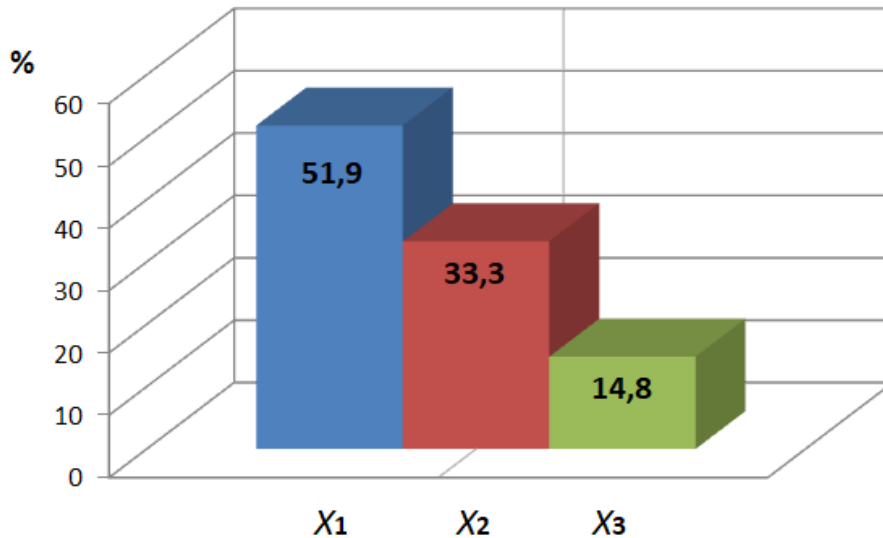


Рисунок 4.5. Значимость влияния факторов на удельные энергозатраты дезинтегратора

Для проверки однородности дисперсий использовался критерий Кохрена при выполнении условия $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$. Так как $G_{\text{расч}} = 0,095 < G_{\text{табл}} = 0,15$, то условие воспроизводимости опытов выполнено.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии выполнялась по критерию Стьюдента на основании условия $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$. В результате чего установлено, что все коэффициенты уравнения значимы: $20,6 > 2,571$; $17,3 > 2,571$; $8,4 > 2,571$; $4,6 > 2,571$; $6,3 > 2,571$; $6,3 > 2,571$; $2,9 > 2,571$; $3,1 > 2,571$; $3,1 > 2,571$.

Проверка адекватности уравнения регрессии проводилась по критерию Фишера на основании условия $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$. Так как $F_{\text{расч}} = 1,195 \leq F_{\text{табл}} = 4,74$, условие адекватности представленной математической модели выполнено.

Декодируем уравнение регрессии (4.3) в натуральный вид:

$$q = -85,33 + 11,6 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_1 + 31,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_2 + 63,7 \cdot \Delta_{\text{max}} / \Delta_{\text{min}} - 0,573 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1^2 - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_2^2 - 15,1 \cdot (\Delta_{\text{max}} / \Delta_{\text{min}})^2 + 0,3 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_1 \cdot \Delta_{\text{max}} / \Delta_{\text{min}} + 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_2 \cdot \Delta_{\text{max}} / \Delta_{\text{min}}. \quad (4.4)$$

Полученные результаты в ходе экспериментальных исследований влияния варьируемых факторов на удельные энергозатраты дезинтегратора представим в графическом виде и выполним их анализ.

На рис. 4.6 приведены графические зависимости изменения удельных энергозатрат q от частоты вращения правого ротора ω_1 при фиксированных

значениях факторов ω_2 и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. Каждый график соответствует разным значениям фактора ω_2 : рис. 4.6а при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.6б при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.6в при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.6г при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.6д при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$. Представленные на каждом графике пять кривых соответствуют различным значениям фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$: кривая 1 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; кривая 2 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; кривая 3 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; кривая 4 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; кривая 5 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

На всех пяти графиках наблюдается возрастание удельных энергозатрат с увеличением фактора ω_1 . Это происходит потому, что с увеличением ω_1 растёт скорость удара частиц материала об ударные элементы роторов. Энергия, передаваемая материалу при ударе, пропорциональна квадрату скорости удара, следовательно, более высокая скорость удара приводит к более интенсивному измельчению и, соответственно, к большему потреблению мощности ротором. Однако на начальных этапах повышения частоты вращения роторов прирост расхода абсолютной мощности привода происходит интенсивнее, чем прирост производительности Q_R .

Анализ приведенных кривых позволил определить, что при фиксации факторов ω_1 и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ увеличение фактора ω_2 от 830 мин^{-1} до 1500 мин^{-1} приводит к неизменному росту удельных энергозатрат q . Если $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$ значения следующие: $20,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $23,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $27,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $28,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$. При увеличении ω_2 с 1500 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} наблюдается снижение удельных энергозатрат до $28 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$, что свидетельствует о том, что производительность дезинтегратора растёт быстрее, чем мощность.

На каждом графике кривые 1 – 5 соответствуют возрастающему значению фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. Видно, что увеличение $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,1 до 2,5 (кривые 1 – 3) приводит к росту удельных энергозатрат q . Это можно объяснить тем, что рост мощности, затрачиваемой на обработку материала в пространстве между рядами ударных элементов опережает рост производительности Q_R .

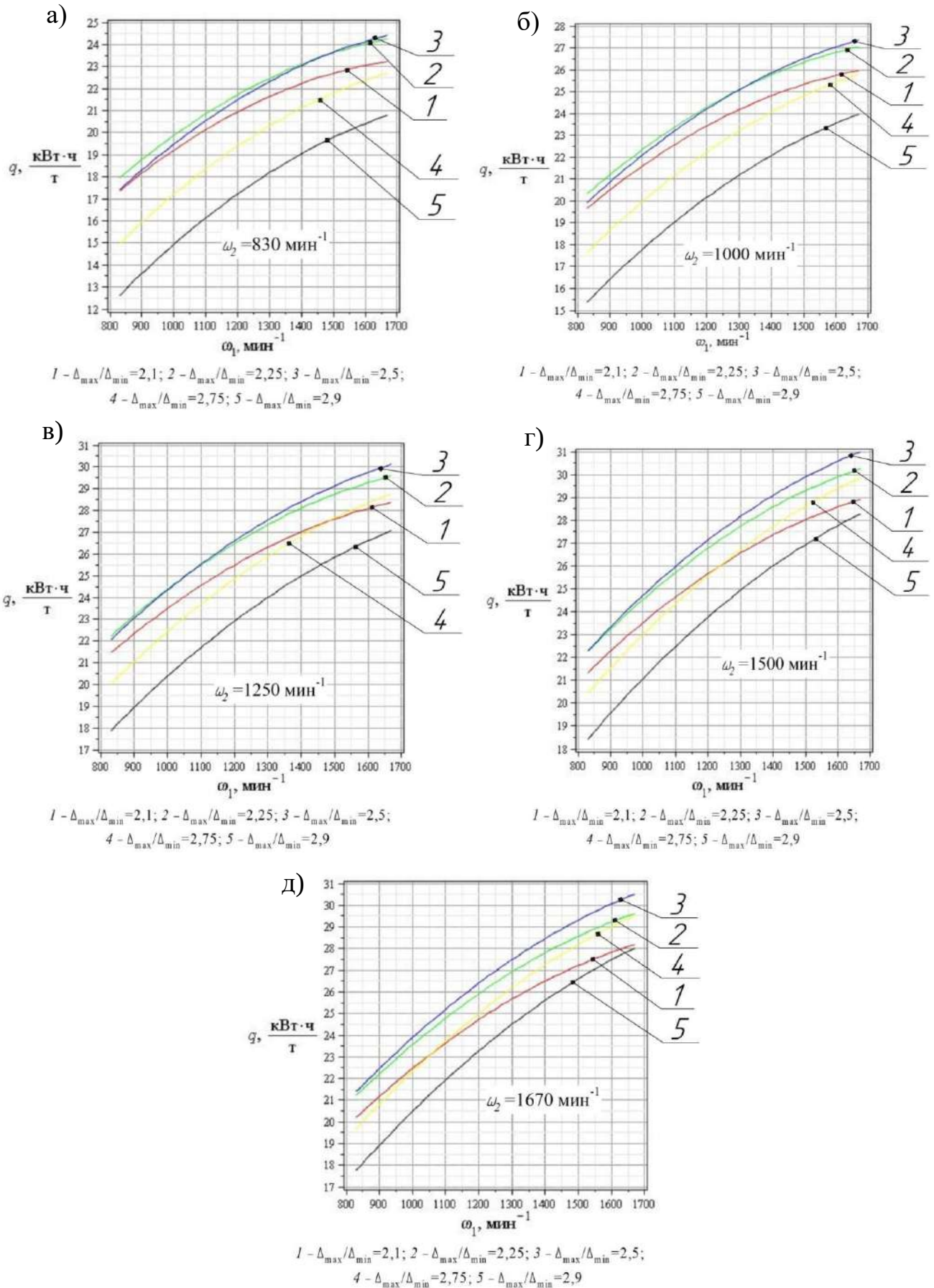


Рисунок 4.6. Зависимости удельных энергозатрат q от частоты вращения правого ротора ω_1 при фиксированных значениях ω_2 и $\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$

Дальнейшее увеличение фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,5 до 2,9 приводит к снижению удельных энергозатрат. Так, например, при фиксированных значениях $\omega_1 = \omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4.6д) удельные энергозатраты принимают следующие значения: 28,2 кВт·ч/т при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; 29,6 кВт·ч/т при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; 30,5 кВт·ч/т при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; 29,5 кВт·ч/т при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; 28 кВт·ч/т при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

На рис. 4.7 приведены графические зависимости изменения удельных энергозатрат q от величины отношения междурядных зазоров $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ при фиксированных значениях частоты вращения правого ротора ω_1 и левого ротора ω_2 .

Каждый график соответствует разным значениям фактора ω_1 : рис. 4.7а при $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.7б при $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.7в при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.7г при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.7д при $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$. Представленные на каждом графике пять кривых соответствуют различным значениям фактора ω_2 : кривая 1 при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; кривая 2 при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; кривая 3 при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; кривая 4 при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; кривая 5 при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

Все пять графиков демонстрируют схожий параболический характер зависимости удельных энергозатрат от фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. Так, например, при $\omega_1 = \omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4.7а) и увеличении $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,1 до 2,3 удельные энергозатраты q растут с 17,4 кВт·ч/т до 18 кВт·ч/т. Дальнейшее увеличение $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,3 до 2,9 приводит к снижению удельных энергозатрат с 18 кВт·ч/т до 12,6 кВт·ч/т.

Рост удельных энергозатрат при меньших значениях фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ можно объяснить следующим образом. Частицы измельчаемого материала чрезмерно накапливаются в пространстве между рядами ударных элементов, затрудняется их перемещение и выброс. При этом энергия тратится неэффективно на переизмельчение, уплотнение потока частиц материала и преодоление повышенного аэродинамического сопротивления.

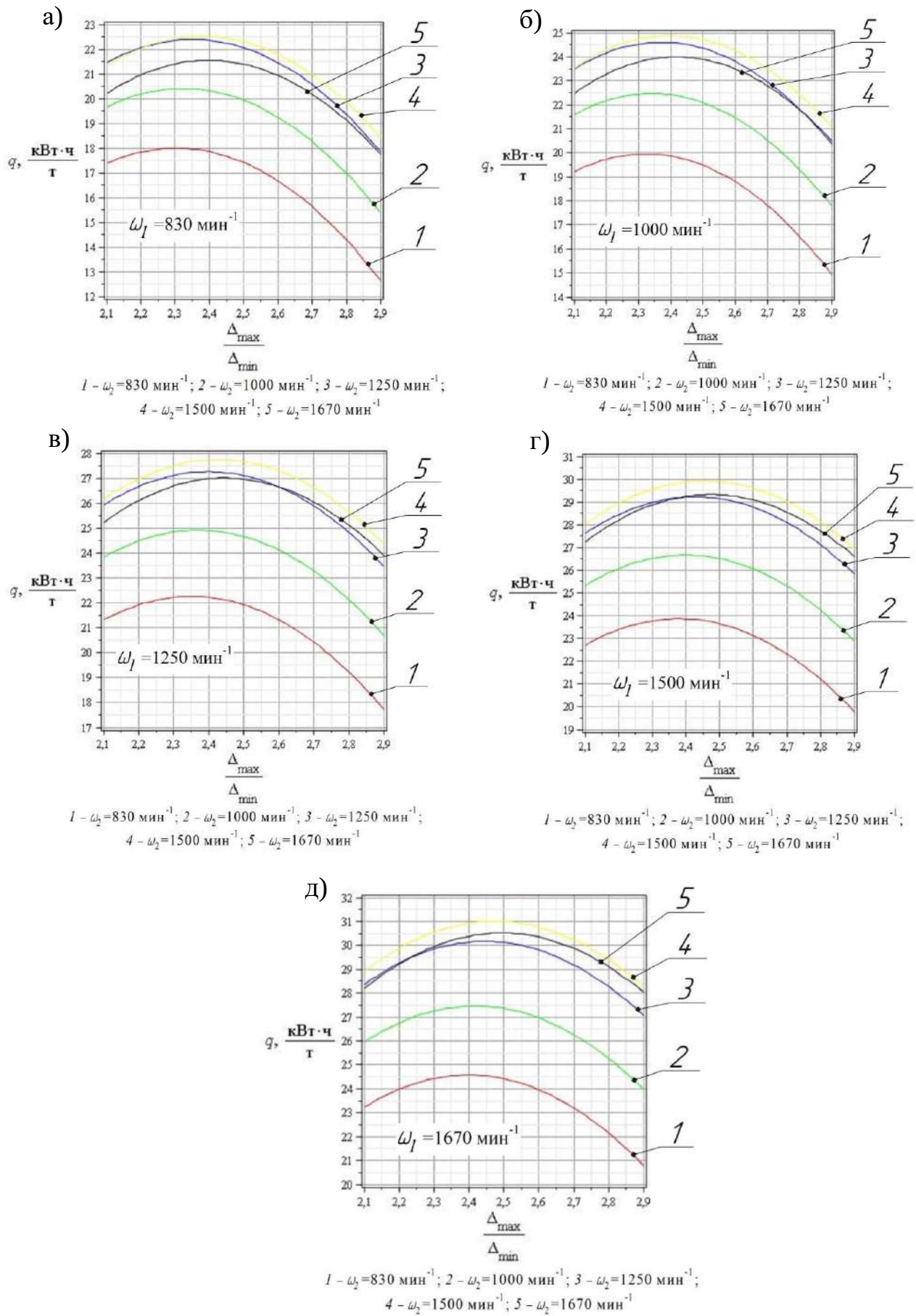


Рисунок 4.7. Зависимости удельных энергозатрат q от фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ при фиксированных значениях ω_1 и ω_2

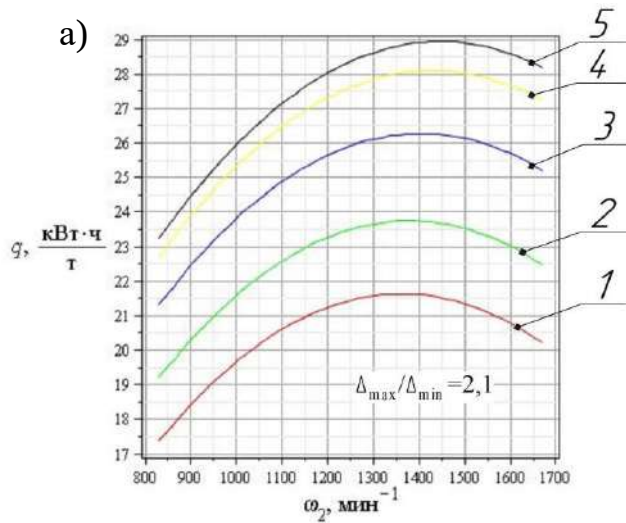
Дальнейшее увеличение фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ в заданном диапазоне приводит к уменьшению удельных энергозатрат ввиду снижения аэродинамического сопротивления и эффективного измельчения, в результате чего рост производительности Q_R опережает рост затрачиваемой мощности.

На каждом графике кривые 1 – 5 соответствуют возрастающему значению фактора ω_2 . Видно, что увеличение ω_2 с 830 мин⁻¹ до 1500 мин⁻¹ (кривые 1 – 4) приводит к росту удельных энергозатрат q . Это можно объяснить тем, что рост мощности, затрачиваемой на измельчение при условии высокой скорости удара ударных элементов о частицы материала опережает рост производительности по готовому продукту Q_R . Дальнейшее увеличение фактора ω_2 с 1500 мин⁻¹ до 1670 мин⁻¹ приводит к снижению удельных энергозатрат вследствие резкого роста производительности Q_R по сравнению с темпами роста мощности. Так, например, при фиксированных значениях $\omega_1 = 1670$ мин⁻¹ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$ (рис. 4.7д) удельные энергозатраты принимают следующие значения: 20,8 кВт·ч/т при $\omega_2 = 830$ мин⁻¹; 24 кВт·ч/т при $\omega_2 = 1000$ мин⁻¹; 27,1 кВт·ч/т при $\omega_2 = 1250$ мин⁻¹; 28,3 кВт·ч/т при $\omega_2 = 1500$ мин⁻¹; 28 кВт·ч/т при $\omega_2 = 1670$ мин⁻¹.

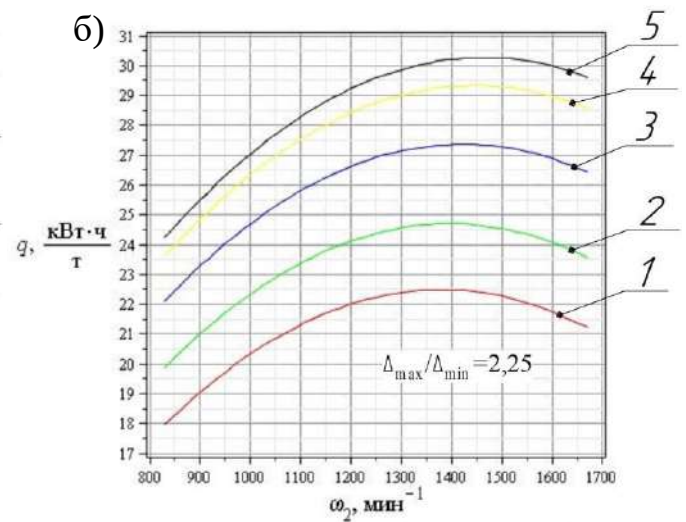
Влияние фактора ω_1 на удельные энергозатраты подробно рассмотрено ранее при анализе семейства кривых, представленных на рисунке 4.6.

На рис. 4.8 приведены графические зависимости изменения удельных энергозатрат q от частоты вращения левого ротора ω_2 при различных фиксированных значениях других исследуемых факторов (ω_1 и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$).

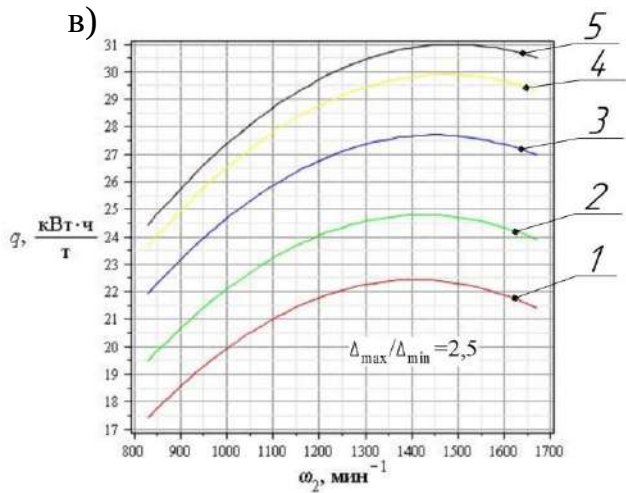
Каждый график соответствует разным значениям фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$: рис. 4.8а при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; рис. 4.8б при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; рис. 4.8в при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; рис. 4.8г при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; рис. 4.8д при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$. Представленные на каждом графике пять кривых соответствуют различным значениям фактора ω_1 : кривая 1 при $\omega_1 = 830$ мин⁻¹; кривая 2 при $\omega_1 = 1000$ мин⁻¹; кривая 3 при $\omega_1 = 1250$ мин⁻¹; кривая 4 при $\omega_1 = 1500$ мин⁻¹; кривая 5 при $\omega_1 = 1670$ мин⁻¹.



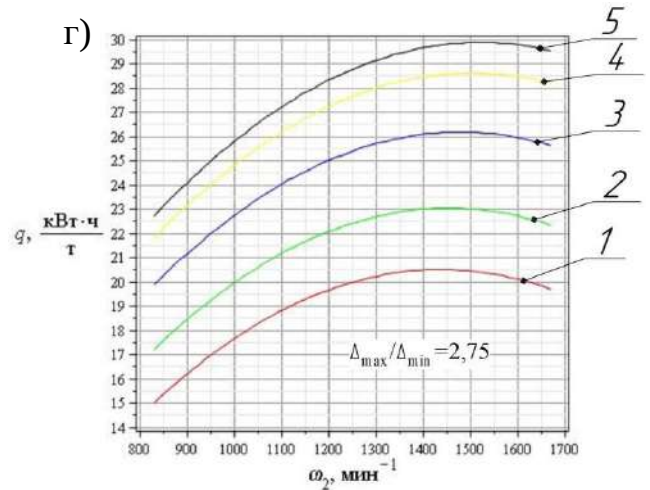
1 - $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; 2 - $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 3 - $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$;
4 - $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 5 - $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$



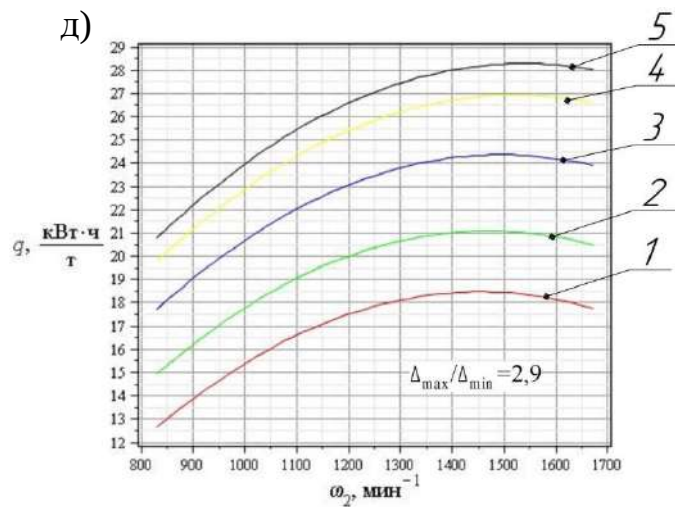
1 - $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; 2 - $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 3 - $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$;
4 - $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 5 - $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$



1 - $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; 2 - $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 3 - $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$;
4 - $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 5 - $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$



1 - $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; 2 - $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 3 - $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$;
4 - $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 5 - $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$



1 - $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; 2 - $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; 3 - $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$;
4 - $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 5 - $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 4.8. Зависимости удельных энергозатрат q от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях $\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$ и ω_1

Все кривые на рисунке 4.8 носят параболический характер и демонстрируют изменение удельных энергозатрат от варьируемого фактора ($q = f(\omega_2)$). Например, с увеличением ω_2 от 830 мин^{-1} до 1460 мин^{-1} при фиксированных других факторах ($\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$) удельные энергозатраты q растут с $12,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ до $18,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$. Дальнейшее увеличение ω_2 с 1460 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} приводит к снижению удельных энергозатрат с $18,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ до $17,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ (рис. 4.8д).

С увеличением частоты вращения левого ротора ω_2 потребляется большая мощность за счёт интенсивного измельчения, что приводит также к росту производительности Q_R . Из того, что удельные энергозатраты q сначала растут при увеличении фактора ω_2 , достигают максимального значения и снижаются при дальнейшем увеличении ω_2 делаем следующий вывод. Резкое увеличение концентрации частиц материала в междурядном объеме обуславливает существенное возрастание нагрузок, действующих на них. Это происходит в момент, когда фактор ω_2 превышает определенный порог, характерный для соответствующих фиксированных величин факторов ω_1 и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. Так, например, при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$ (рис. 4.8а) критические значения ω_2 следующие: $\omega_2 = 1365 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1380 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1400 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1410 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1450 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$

Из графиков, представленных на рис. 4.6 – 4.8 следует, что максимальное значение удельных энергозатрат составляет $31 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ (рис. 4.6г, кривая 3; рис. 4.7д, кривая 4; рис. 4.8в, кривая 5) и соответствует следующим значениям факторов: $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$.

Минимальное значение удельных энергозатрат составляет $12,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ (рис. 4.6а, кривая 5; рис. 4.7а, кривая 1; рис. 4.8, кривая 1) и соответствует следующим значениям факторов: $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

Анализ графических зависимостей (рис 4.6 – 4.8) позволяет сделать следующие выводы.

Установлено, что начальное повышение частоты вращения роторов приводит к увеличению удельных энергозатрат ввиду более резкого роста расхода

электроэнергии в отличие от производительности по готовому продукту. Однако при достижении определённого значения, дальнейшее увеличение частоты вращения роторов не приводит к стремительному росту расхода электроэнергии. В то же время с производительностью происходит обратный процесс, в связи с чем наблюдается снижение показателя q .

Установлено, что для минимизации величины удельных энергозатрат необходимо стремиться к оптимальному значению фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. При малых значениях $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ наблюдаются повышенные затраты мощности ввиду роста аэродинамического сопротивления камеры помола за счёт накопления большого количества частиц материала в междурядном объеме. При превышении определенного порога значений $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ наблюдается снижение эффективности измельчения частиц материала, так как часть частиц проскакивает через ряды, не получая необходимого количества ударов, ввиду чего энергия, затраченная на разгон этих частиц, оказывается непроизводительной.

4.5 Зависимость коэффициента неоднородности от варьируемых факторов

Исследуемая конструкция дезинтегратора позволяет получать сухие строительные смеси при измельчении двух и более компонентов. Ввиду этого необходимо провести экспериментальные исследования зависимости коэффициента неоднородности смеси V_C от рассматриваемых факторов, так как этот показатель является ключевым критерием оценки качества получаемых смесей

Лабораторные исследования качества полученных смесей при измельчении известняка с глиной в дезинтеграторе позволили вычислить их коэффициенты неоднородности, значения которых приведены в таблице 4.4. По данным значениям составлено уравнение регрессии (4.5) в кодированном виде.

$$V_C = 6,95 - 0,434 \cdot X_1 - 0,261 \cdot X_2 + 0,055 \cdot X_3 + 0,740 \cdot X_1^2 + 0,387 \cdot X_2^2 + 0,372 \cdot X_3^2 + 0,3 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,025 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,05 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4.5)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (4.5) указывают на то, что качественные показатели смеси, обрабатываемой в модернизированном дезинтеграторе, определяются в первую очередь частотой вращения роторов: правого (коэффициент 0,434) и левого (0,261). Коэффициент перед фактором $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ равен (0,055). На рис. 4.9 представлены значимости факторов в процентном соотношении.

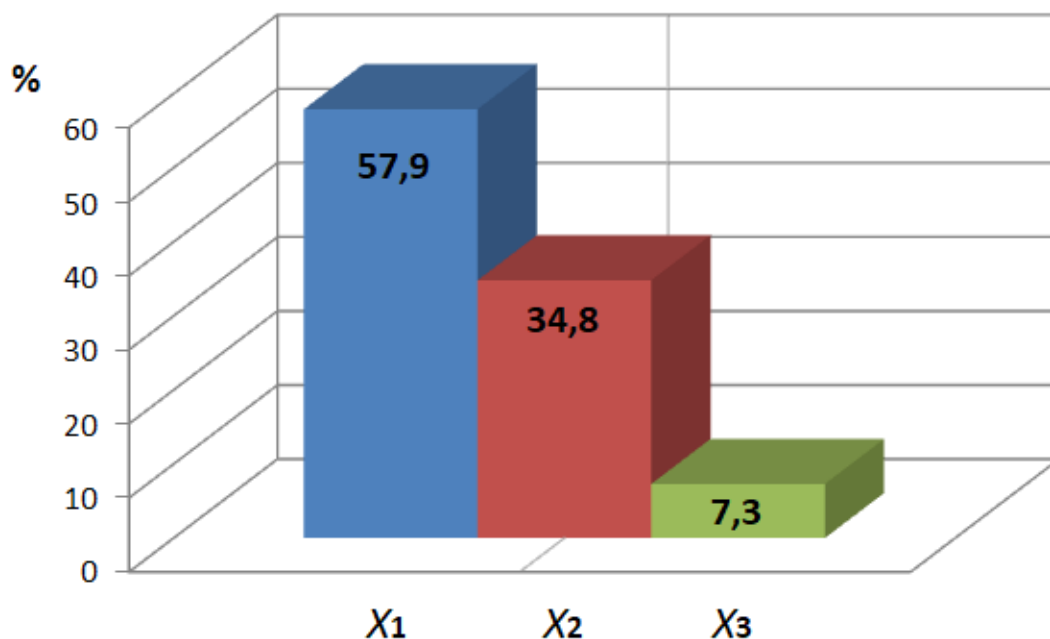


Рисунок 4.9. Значимости влияния факторов на коэффициент неоднородности смеси

Анализ уравнения (4.5) показывает, что знаки при коэффициентах для факторов X_1 , X_2 , X_1^2 и X_2^2 свидетельствуют о параболическом характере исследуемой зависимости. Поскольку ветви параболы направлены вверх, экстремальная точка этой кривой позволяет определить оптимальный диапазон частот вращения, обеспечивающий минимальные значения коэффициента неоднородности, а значит наилучшее качество смешивания.

Знак «+» перед коэффициентом X_3 и знак «+» перед коэффициентом X_3^2 свидетельствуют о наличии экстремальной точки параболической кривой, характеризующей изменение качества смеси при варьировании отношения зазоров $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ между рядами ударных элементов. Данная точка соответствует наименьшему значению коэффициента неоднородности, а значит лучшему качеству известково-глиняной смеси, получаемой в данном дезинтеграторе.

Следовательно, анализ такой кривой позволит установить пределы значений $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$, при которых качество получаемой смеси удовлетворяет установленным требованиям.

Для проверки однородности дисперсий использовался критерий Кохрена при выполнении условия $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$. Так как $G_{\text{расч}} = 0,13 < G_{\text{табл}} = 0,15$, то условие воспроизводимости опытов выполнено.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии выполнялась по критерию Стьюдента на основании условия $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$. В результате чего установлено, что все коэффициенты уравнения значимы: $16,4 > 2,571$; $10,2 > 2,571$; $3,1 > 2,571$; $27,1 > 2,571$; $14,7 > 2,571$; $14,2 > 2,571$; $11,3 > 2,571$; $2,7 > 2,571$; $3,0 > 2,571$.

Проверка адекватности уравнения регрессии проводилась по критерию Фишера на основании условия $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$. Так как $F_{\text{расч}} = 1,84 \leq F_{\text{табл}} = 4,74$, условие адекватности представленной математической модели выполнено.

Декодируем уравнение регрессии (4.5) в натуральный вид:

$$V_C = 86,5 - 0,038 \cdot \omega_1 - 0,025 \cdot \omega_2 - 31,04 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 1,18 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1^2 + 0,619 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_2^2 + 6 \cdot (\Delta_{\max} / \Delta_{\min})^2 + 0,48 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + 0,0004 \cdot \omega_1 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min} + 0,0008 \cdot \omega_2 \cdot \Delta_{\max} / \Delta_{\min}. \quad (4.6)$$

Результаты экспериментальных исследований качества получаемой известняково-глиняной смеси в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов представлены на рисунках 4.10 – 4.12 в виде кривых.

Влияние частоты вращения правого ротора ω_1 на коэффициент неоднородности смеси V_C представлено в виде семейства кривых на рисунке 4.10. Значения отношения междурядных зазоров $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ и частоты вращения левого ротора ω_2 приняты фиксированными. Каждый график соответствует разным значениям фактора ω_2 : рис. 4.10а при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.10б при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.10в при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.10г при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.10д при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

Представленные на каждом графике пять кривых соответствуют различным значениям фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$: кривая 1 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; кривая 2 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; кривая 3 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; кривая 4 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; кривая 5 при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

На всех пяти графиках наблюдается параболический характер зависимости коэффициента неоднородности V_C от частоты вращения правого ротора ω_1 . Так, например, при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ (рис. 4.10а) и увеличении ω_1 с 830 мин^{-1} до 1400 мин^{-1} коэффициент неоднородности V_C снижается с 12,1 % до 8,2 %. Дальнейшее увеличение ω_1 с 1400 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} приводит к росту коэффициента неоднородности с 8,2 % до 9 %. Объясняется это тем, что при увеличении частоты вращения ω_1 повышается скорость удара частиц материала об ударные элементы, ввиду чего частицы интенсивнее взаимодействуют друг с другом, обеспечивая качественное смешивание. Вместе с тем на качество смешивания в дезинтеграторе существенно влияет продолжительность нахождения частиц измельчаемого материала в пространстве между рядами ударных элементов. Превышение определенного значения параметра ω_1 вызывает резкое сокращение этого временного интервала, что закономерно ведет к ухудшению качества смешивания.

Следовательно, для любой фиксированной комбинации факторов ω_2 и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ можно определить величину фактора ω_1 , превышение которой приводит к снижению качества смеси. Так, например, при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4.10д) критические значения ω_1 следующие: $\omega_1 = 1240 \text{ мин}^{-1}$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; $\omega_1 = 1230 \text{ мин}^{-1}$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; $\omega_1 = 1225 \text{ мин}^{-1}$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; $\omega_1 = 1220 \text{ мин}^{-1}$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; $\omega_1 = 1220 \text{ мин}^{-1}$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

Сравнение графиков при неизменных факторах $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$ свидетельствует о том, что рост фактора ω_2 с 830 мин^{-1} до 1250 мин^{-1} приводит к снижению коэффициента неоднородности: $V_C = 9,9 \%$ при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 9,5 \%$ при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 9,4 \%$ при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$. При увеличении ω_2 с 1250 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} наблюдается увеличение коэффициента неоднородности: $V_C = 10,1 \%$ при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 11 \%$

при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$. Объясняется это аналогично влиянию частоты вращения правого ротора ω_1 .

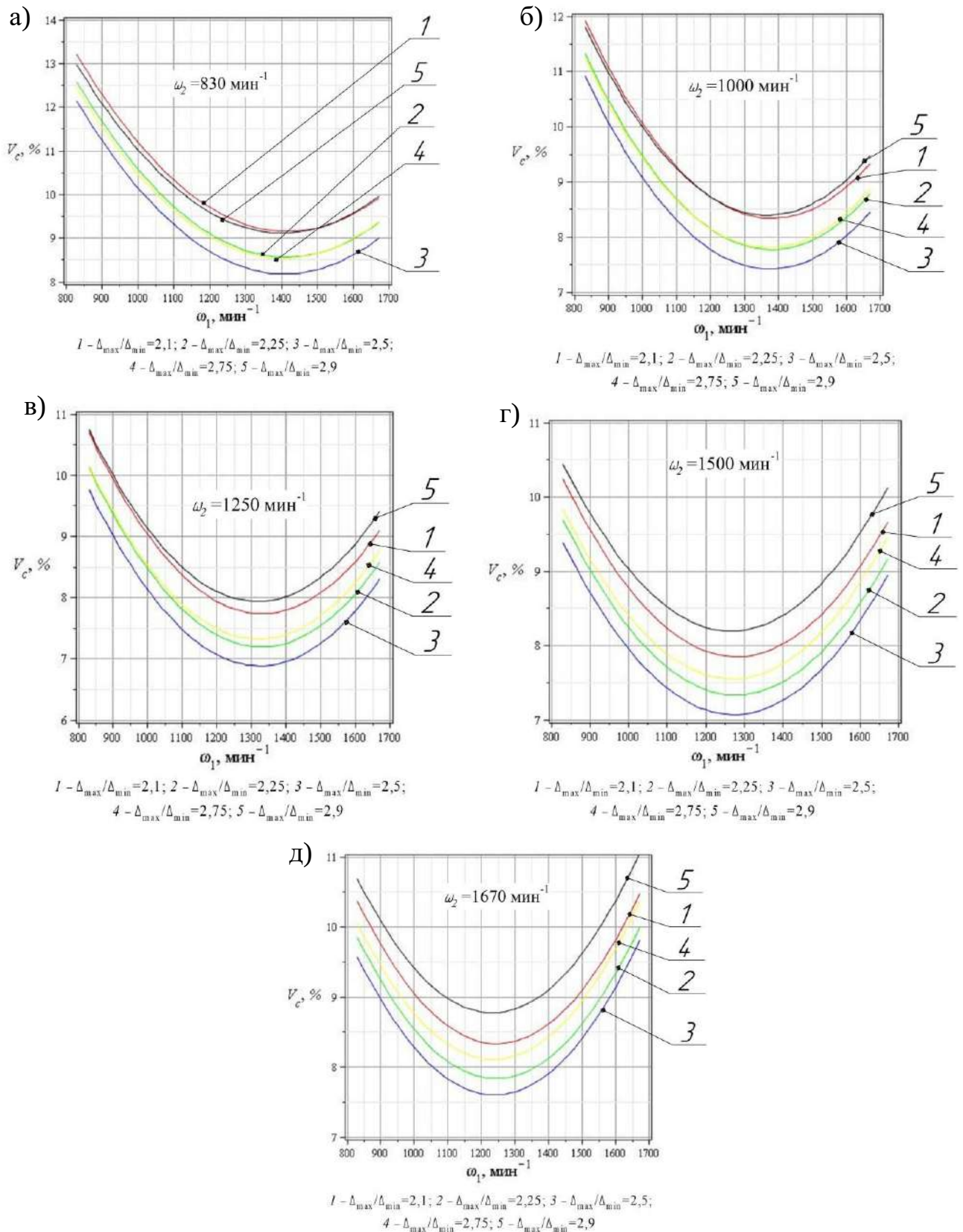


Рисунок 4.10. Зависимости коэффициента неоднородности смеси V_C от частоты вращения правого ротора ω_1 при фиксированных значениях ω_2 и $\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$

Кривые 1 – 5, представленные на каждом графике (рис. 4.10) показывают, что увеличение $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,1 до 2,5 (кривые 1 – 3) приводит к снижению коэффициента неоднородности V_C . Это можно объяснить следующим образом. Циклическое сужение и расширение рабочего пространства между рядами ударных элементов вызывает резкие изменения скорости и направления потока материала, что генерирует высокую турбулентность при высокой концентрации частиц и интенсификацию их взаимодействия друг с другом и с ударными элементами. Увеличение фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ свыше 2,5 нецелесообразно, так как при этом наблюдается увеличение коэффициента V_C , а значит снижение качества получаемой смеси. Объясняется это тем, что при превышении критического значения $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ частицы материала недостаточно взаимодействуют друг с другом из-за большого объема между рядами ударных элементов и проскока части частиц через ряды. Так, например, при фиксированных значениях $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4.10г) коэффициент неоднородности принимает следующие значения: $V_C = 9,7 \%$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$; $V_C = 9,2 \%$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; $V_C = 8,9 \%$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; $V_C = 9,4 \%$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; $V_C = 10,1 \%$ при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

На рис. 4.11 приведены графические зависимости изменения коэффициента неоднородности V_C от фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ при фиксированных значениях частоты вращения правого ротора ω_1 и левого ротора ω_2 .

Каждый график соответствует разным значениям фактора ω_1 : рис. 4.11а при $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.11б при $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.11в при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.11г при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; рис. 4.11д при $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

Представленные на каждом графике пять кривых соответствуют различным значениям фактора ω_2 : кривая 1 при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; кривая 2 при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; кривая 3 при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; кривая 4 при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; кривая 5 при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

Все пять графиков демонстрируют схожий параболический характер зависимости коэффициента неоднородности V_C от фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$. Так, например, при $\omega_1 = \omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4.11б) и увеличении $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,1 до

2,5 коэффициент неоднородности V_C снижается с $V_C = 10,1\%$ до $V_C = 9,1\%$. Дальнейшее увеличение $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ с 2,5 до 2,9 приводит к увеличению коэффициента неоднородности с $V_C = 9,1\%$ до $V_C = 10\%$.

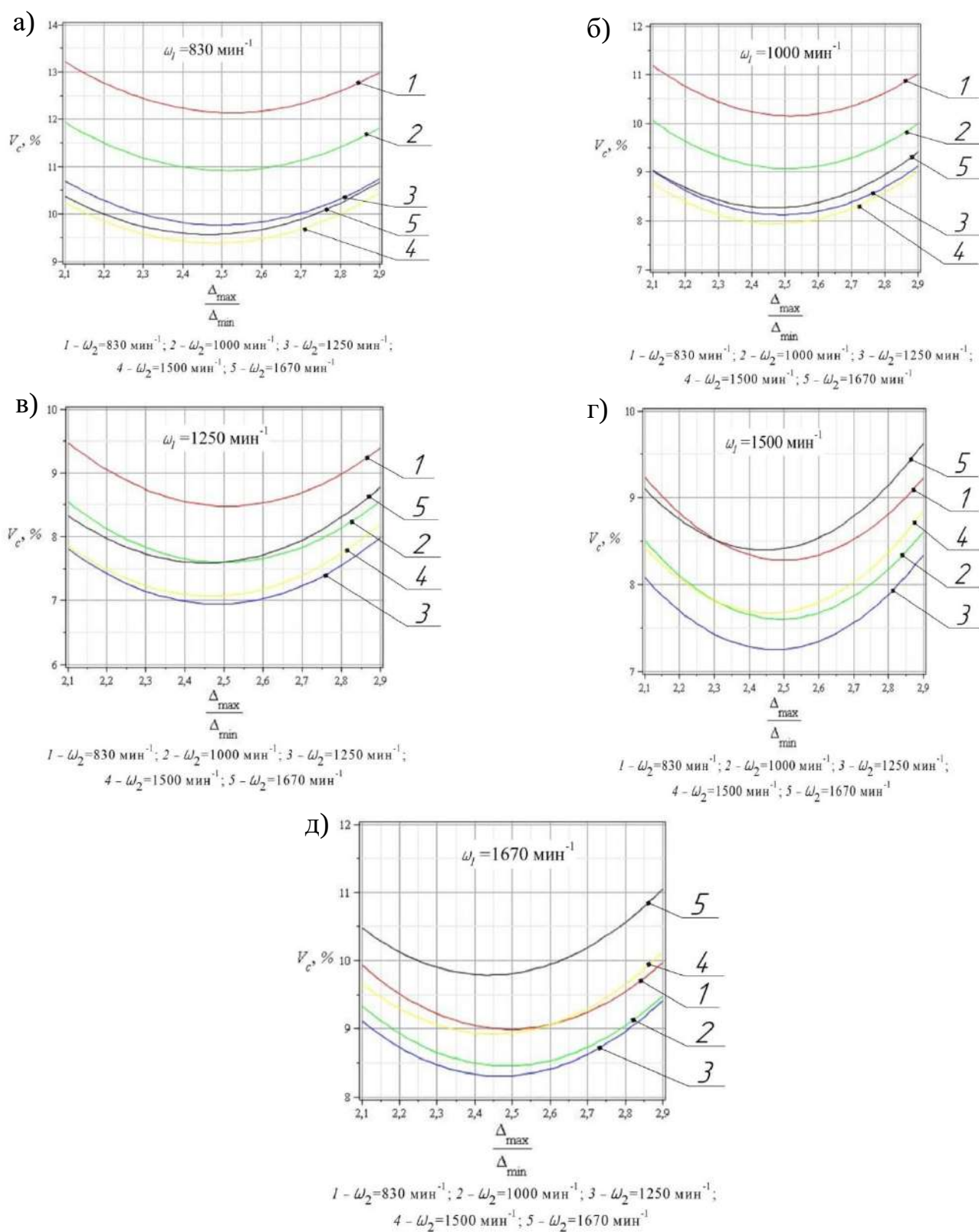


Рисунок 4.11. Зависимости коэффициента неоднородности смеси V_C от фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ при фиксированных значениях факторов ω_1 и ω_2

Из этого делаем вывод, что для минимизации коэффициента неоднородности V_C необходимо выбрать оптимальное значение фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$, так как при его малых значениях концентрация частиц чрезмерно велика, что приводит к затруднению их перемещения и, как следствие, к снижению качества смеси. Слишком большие значения $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ также приводят к снижению качества смеси ввиду снижения интенсивности взаимодействия частиц между собой и проскока некоторого их количества на последующие ряды.

Кривые 1 – 5 характеризуют влияние фактора ω_2 на величину коэффициента неоднородности смеси V_C . Графики на рис. 4.11а и на рис. 4.11б показывают снижение коэффициента V_C при увеличении фактора ω_2 с 830 мин^{-1} до 1500 мин^{-1} (кривые 1 – 4), а графики на рис. 4.11в, на рис. 4.14г и на рис. 4.11д показывают снижение коэффициента V_C при увеличении фактора ω_2 с 830 мин^{-1} до 1250 мин^{-1} (кривые 1 – 3). Данный факт свидетельствует о том, что увеличение частоты вращения правого ротора ω_1 оказывает большее влияние на коэффициент V_C чем частота вращения левого ротора ω_2 . Объясняется это тем, что ударные элементы правого ротора, имеющего больший диаметр, движутся с повышенной линейной скоростью.

Таким образом, рост коэффициента неоднородности смеси V_C наблюдается при любом дальнейшем повышении частоты вращения ω_2 . При фиксированных значениях $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ (рис. 4.11в) данные по параметру V_C принимают следующие значения: $V_C = 8,5 \%$ при $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 7,6 \%$ при $\omega_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 6,9 \%$ при $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 7,1 \%$ при $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $V_C = 7,6 \%$ при $\omega_2 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

Влияние фактора ω_1 на коэффициент неоднородности смеси V_C подробно рассмотрено ранее по рис. 4.10.

На рис. 4.12 приведены графические зависимости изменения коэффициента неоднородности смеси V_C от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях остальных факторов (ω_1 и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$), принципиально влияющих на работу дезинтегратора. Каждый график соответствует разным значениям фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$, а именно: рис. 4.12а при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$;

рис. 4.12б при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,25$; рис. 4.12в при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; рис. 4.12г при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,75$; рис. 4.12д при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,9$.

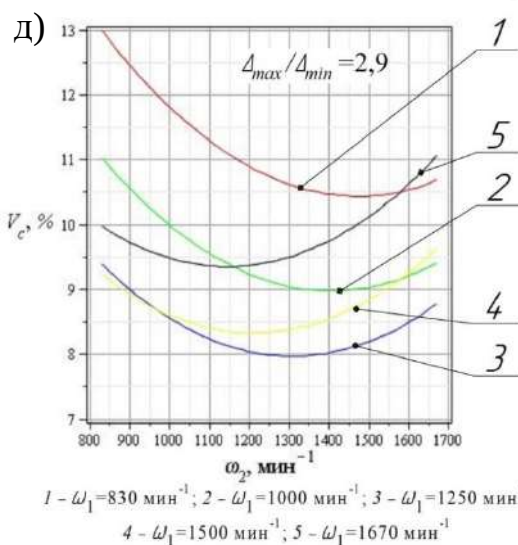
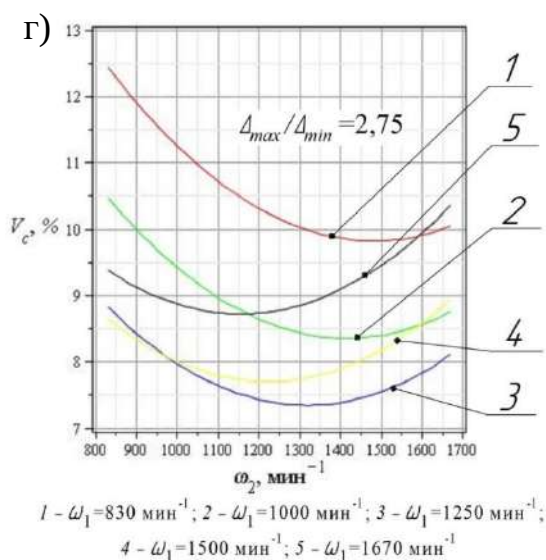
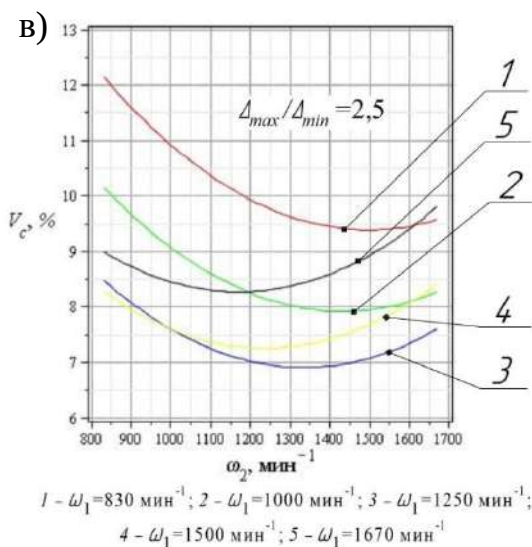
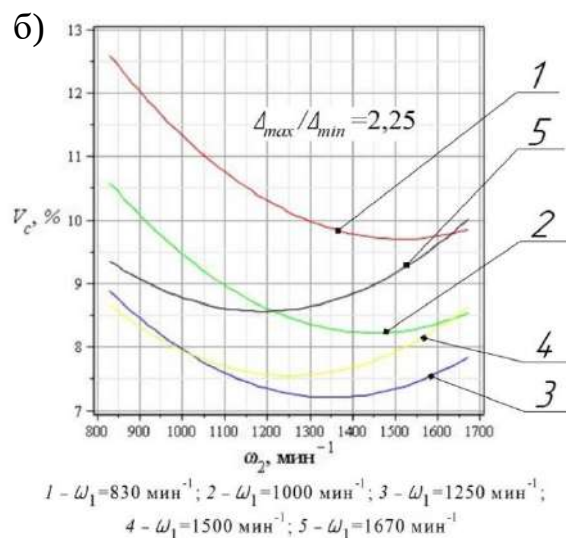
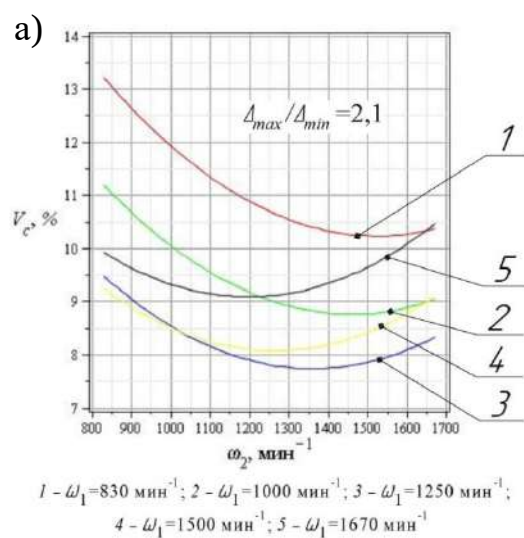


Рисунок 4.12. Зависимости коэффициента неоднородности смеси V_c от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях факторов $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ и ω_1

Представленные на каждом графике пять кривых соответствуют различным значениям фактора ω_1 : кривая 1 при $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; кривая 2 при $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; кривая 3 при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; кривая 4 при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; кривая 5 при $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

На всех пяти графиках наблюдается параболический характер зависимости коэффициента неоднородности V_C от частоты вращения левого ротора ω_2 . Так, например, при $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ (рис. 4.12в) и увеличении ω_2 с 830 мин^{-1} до 1500 мин^{-1} коэффициент неоднородности V_C снижается с 12,1 % до 9,4 %. Дальнейшее увеличение ω_2 с 1500 мин^{-1} до 1670 мин^{-1} приводит к росту коэффициента неоднородности V_C с 9,4 % до 9,6 %. Отсюда следует вывод, что достижение минимального значения коэффициента неоднородности V_C обеспечивается при оптимальном значении частоты вращения левого ротора ω_2 . При этом существует критическое значение ω_2 , при преодолении которого ключевое влияние на качество смешивания оказывает недостаточное время пребывания частиц в пространстве между рядами ударных элементов, что способствует снижению качества смеси.

Критические значения фактора ω_2 при фиксированном значении фактора $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ (рис. 4.12в) следующие: $\omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1420 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1320 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1220 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1150 \text{ мин}^{-1}$ при $\omega_1 = 1670 \text{ мин}^{-1}$.

Из графиков, представленных на рис. 4.10 – 4.12 следует, что максимальное значение коэффициента неоднородности смеси составляет $V_C = 13,2 \%$ (рис. 4.10а, кривая 1; рис. 4.11а, кривая 1; рис. 4.12а, кривая 1) и соответствует следующим значениям факторов: $\omega_1 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 830 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,1$.

Минимальное значение коэффициента неоднородности составляет $V_C = 6,9 \%$ (рис. 4.10в, кривая 3; рис. 4.11в, кривая 3; рис. 4.12в, кривая 3) и соответствует следующим значениям факторов: $\omega_1 = 1320 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1320 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$.

В результате анализа графических зависимостей, представленных на рис. 4.1 – 4.12 делаем вывод, что варьируемые параметры дезинтегратора оказывают

существенное влияние на показатели исследуемых функций. Следовательно, задача установления эффективного режима работы усовершенствованного дезинтегратора сводится к выявлению наиболее целесообразных (рациональных) величин исследуемых факторов.

4.6 Определение рациональных режимов процессов измельчения и смешивания в дезинтеграторе

Основой для оптимизации работы усовершенствованного дезинтегратора выступают три уравнения регрессии (4.2), (4.4) и (4.6). Данные уравнения устанавливают взаимосвязь исследуемых функций отклика (Q_R , q , V_C) с основными технологическими факторами: $Q_R = f(\omega_1, \omega_2, \Delta_{max}/\Delta_{min})$, $q = f(\omega_1, \omega_2, \Delta_{max}/\Delta_{min})$, $V_C = f(\omega_1, \omega_2, \Delta_{max}/\Delta_{min})$. Зависимости, выведенные по результатам обработки экспериментальных данных лабораторной установки, позволяют определить рациональный режим её эксплуатации, который определяет частный диапазон значений частоты вращения роторов ω_1, ω_2 и фактора $\Delta_{max}/\Delta_{min}$. Соблюдение установленных значений факторов обеспечивает предельно высокую эффективность процессов измельчения и смешивания обрабатываемых материалов.

Оценка эффективности работы усовершенствованного дезинтегратора возможна лишь при совместном рассмотрении зависимостей функций отклика от варьируемых факторов, поскольку ключевое значение имеет их суммарное взаимодействие. С целью определения рациональных значений факторов исследуемых процессов ниже приведен совместный анализ трех функций отклика от каждого из варьируемых факторов: $Q_R, q, V_C = f(\omega_1)$, $Q_R, q, V_C = f(\omega_2)$, $Q_R, q, V_C = f(\Delta_{max}/\Delta_{min})$.

Установление рациональных рабочих параметров дезинтегратора при измельчении и смешивании в нем двух компонентов базировалось на трех ключевых требованиях. Целевые функции предусматривали сокращение как удельных энергозатрат q , так и коэффициента неоднородности смеси V_C , а также достижение предельной производительности по готовому продукту Q_R .

На рисунках 4.13 – 4.15 проиллюстрирована зависимость функций отклика от трех ключевых факторов: частоты вращения левого и правого роторов, а также отношения максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному.

Анализ кривых на рисунке 4.13 показывает, что минимальный уровень коэффициента неоднородности смеси V_C (в диапазоне от 6,9 % до 7,3 %) достигается при повышении частоты вращения правого ротора ω_1 с 1250 до 1500 мин^{-1} .

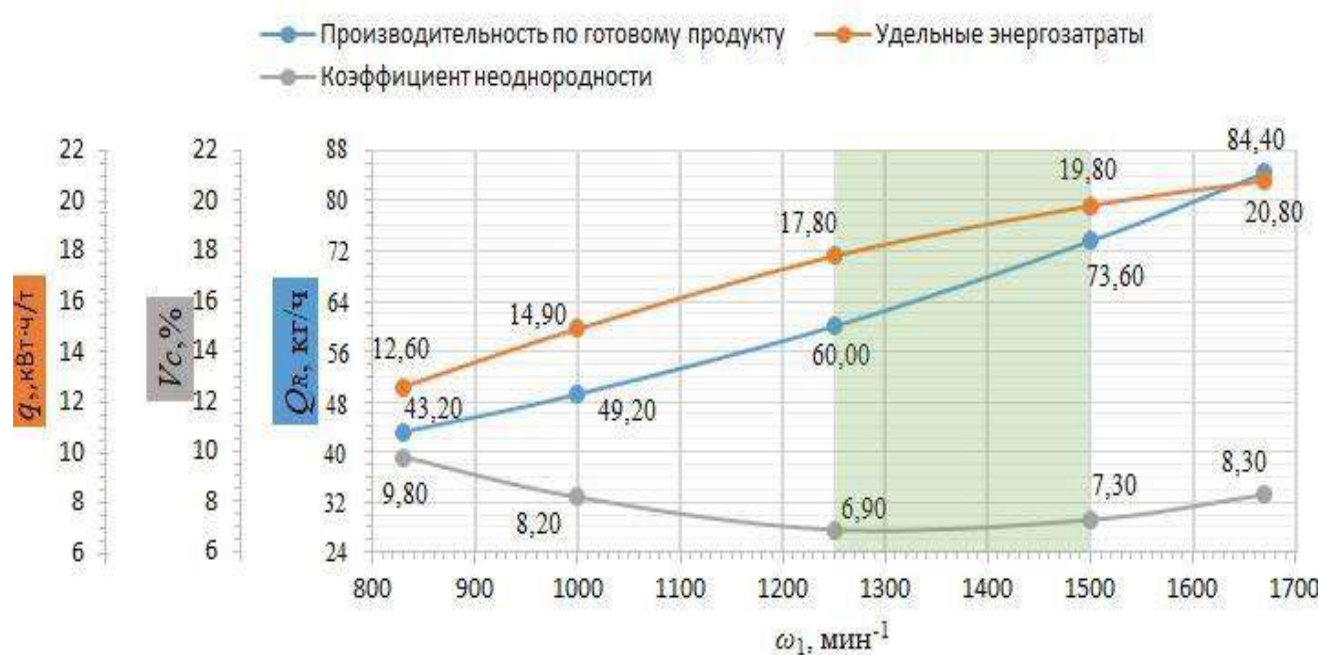


Рисунок 4.13. Графики зависимости Q_R , q , $V_C = f(\omega_1)$

Также при данных значениях частоты вращения наблюдается высокий уровень производительности по готовому продукту (от 60 кг/ч до 73,6 кг/ч). Ввиду этого высокие значения удельных энергозатрат (17,8 – 19,8 кВт·ч/т) считаем оправданными, так как при частотах вращения правого ротора вне указанного диапазона значений коэффициент неоднородности смеси возрастает, а при $\omega_1 < 1250 \text{ мин}^{-1}$ показатель производительности резко падает. Резюмируя изложенное, можно утверждать, что частота вращения правого ротора ω_1 в диапазоне от 1250 мин^{-1} до 1500 мин^{-1} обеспечивает наиболее рациональную эксплуатацию дезинтегратора.

Анализируя графики, представленные на рис. 4.14 можно сделать вывод о том, что рациональные значения частоты вращения левого ротора ω_2 определяются диапазоном от 1250 мин⁻¹ до 1600 мин⁻¹.

Данный вывод сделан исходя из того, что при умеренных значениях удельных энергозатрат (17,9 – 18,5 кВт·ч/т) наблюдаются наилучшие показатели качества смеси ($V_C = 6,9 – 7,4$ %) и высокий уровень производительности по готовому продукту (от 60,8 кг/ч до 80 кг/ч).



Рисунок 4.14. Графики зависимости $Q_R, q, V_C = f(\omega_2)$

Графики, отражающие зависимости функций отклика от отношения максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному $\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$, приведены на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15. Графики зависимости $Q_R, q, V_C = f(\Delta_{\max} / \Delta_{\min})$

Из представленных на рис. 4.15 графических зависимостей следует, что оптимальное сочетание исследуемых технологических показателей достигается в диапазоне значений $\Delta_{max} / \Delta_{min}$ от 2,25 до 2,75. При этом значения технологических показателей изменяются в следующих пределах: $q = 15 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т} - 17,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$; $V_C = 6,9 \% - 7,4 \%$; $Q_R = 76 \text{ кг/ч} - 82,4 \text{ кг/ч}$.

Выбор данного диапазона значений фактора $\Delta_{max} / \Delta_{min}$ можно объяснить следующим образом. Расширение диапазона влево (при $\Delta_{max} / \Delta_{min} < 2,25$) приводит к ухудшению производительности Q_R и коэффициента неоднородности смеси V_C , а удельные энергозатраты q остаются на том же уровне, что и в рациональной зоне. Расширение в сторону больших значений (при $\Delta_{max} / \Delta_{min} > 2,75$) даёт наибольшую производительность Q_R и наименьшие удельные энергозатраты q . Однако оно приводит к существенному ухудшению коэффициента неоднородности смеси V_C (до 8 %).

В результате установлено, что эффективная работа усовершенствованного дезинтегратора (при частных требованиях) достигается при значениях частоты вращения правого ротора ω_1 в пределах от 1250 мин⁻¹ до 1500 мин⁻¹, левого ω_2 – от 1250 мин⁻¹ до 1600 мин⁻¹, а отношение максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному $\Delta_{max} / \Delta_{min}$ составляет 2,25 – 2,75. Определение данных диапазонов факторов стало прямым следствием обработки графических зависимостей функций отклика, полученных по результатам проведенных экспериментов.

4.7 Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Рост частоты вращения роторов (ω_1 и ω_2) усовершенствованного дезинтегратора выступает определяющим фактором, обеспечивающим повышение производительности по готовому продукту Q_R .

Подтверждение данной закономерности приведено на рисунке 4.16, где совместно показаны результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований.

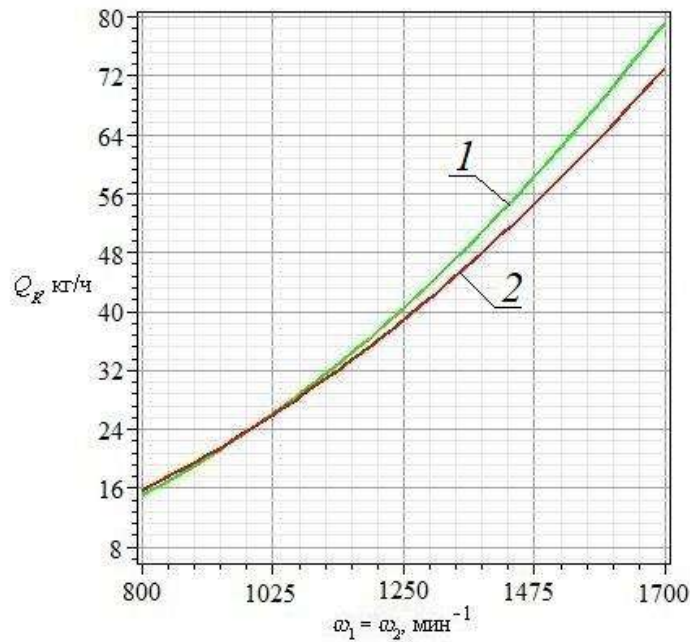


Рисунок 4.16. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей производительности дезинтегратора Q_R от частоты вращения роторов при $\Delta_{\max}/\Delta_{\min} = 2,5$; $R_1 = 0,048$ м; $R_2 = 0,061$ м; $R_3 = 0,074$ м; $R_4 = 0,087$ м; $n_1 = 13$ шт.; $n_2 = 20$ шт.; $n_3 = 21$ шт.; $n_4 = 44$ шт.; $R_k = 0,115$ м; $B_k = 0,093$ м: кривая №1 – результаты экспериментальных исследований; кривая №2 – результаты теоретических исследований

Максимальная сходимость теоретических и экспериментальных данных по производительности дезинтегратора Q_R достигается при частоте вращения роторов $\omega_1 = \omega_2 = 960 \text{ мин}^{-1}$, где разница между ними полностью отсутствует. При увеличении частоты до $\omega_1 = \omega_2 = 1700 \text{ мин}^{-1}$ наблюдается предельное отклонение теоретических данных от экспериментальных, составляющее 8,1 %. Данная величина не выходит за рамки общепринятых 10 % допустимой погрешности, что подтверждает адекватность проведенных исследований.

Значения среднего размера частиц готового продукта d_k , полученные по результатам теоретических и экспериментальных исследований при изменении частоты вращения роторов, представлены на рисунке 4.17. Их характер подтверждает, что повышение частоты вращения роторов обуславливает рост линейной скорости движения частиц и, как следствие, увеличение нагрузок при соударении, что непосредственно влечет за собой повышение тонкости помола.

Графики, представленные на рис. 4.17 показывают, что при теоретических исследованиях средний размер частиц готового продукта ниже, чем по результатам экспериментальных исследований, так как теоретическая модель

строится на предположении о мгновенном хрупком разрушении под воздействием удара и не учитывает возможные пластические деформации частиц.

Также заметим, что с увеличением частоты вращения роторов разница между теоретическими и экспериментальными данными снижается. Объясняется это следующим. При низких частотах частицы материала могут испытывать пластическую деформацию или им необходимо несколько ударов для разрушения, что не учитывается в формулах теоретических исследований. При высоких частотах скорость нагружения превышает скорость релаксации напряжений в материале. При этом частицы не успевают деформироваться пластично и разрушаются при первом ударе. Это состояние максимально приближенно к идеализированной физической модели разрушения частиц.

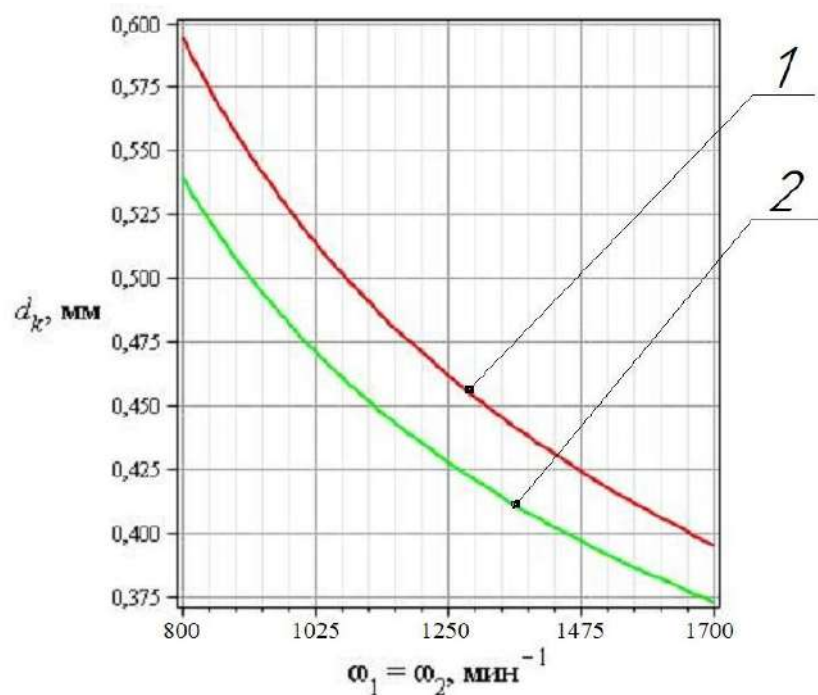


Рисунок 4.17. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей среднего размера частиц готового продукта d_k от частоты вращения роторов при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; $R_1 = 0,048$ м; $R_2 = 0,061$ м; $R_3 = 0,074$ м; $R_4 = 0,087$ м; $n_1 = 13$ шт.; $n_2 = 20$ шт.; $n_3 = 21$ шт.; $n_4 = 44$ шт.; $R_k = 0,115$ м; $B_k = 0,093$ м: кривая №1 – результаты экспериментальных исследований; кривая №2 – результаты теоретических исследований

Предельное отклонение теоретических данных от экспериментальных данных, составляющее 9,6 %, зафиксировано при $\omega_1 = \omega_2 = 800$ мин⁻¹. Полученная величина также не выходит за рамки общепринятых 10 % допустимой погрешности, что подтверждает адекватность проведенных исследований.

Значения удельных энергозатрат q , полученных в рамках теоретических и экспериментальных исследований в условиях изменения частоты вращения роторов, представлены на рисунке 4.18.

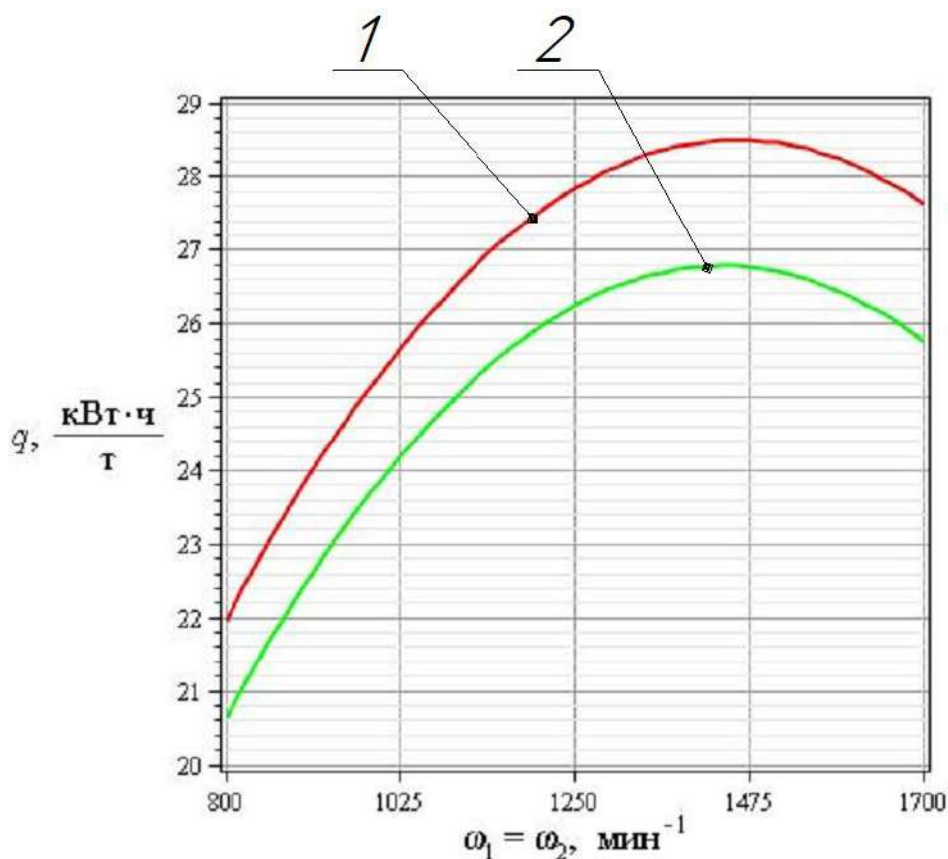


Рисунок 4.18. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей удельных энергозатрат q от частоты вращения роторов при $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$; $R_1 = 0,048$ м; $R_2 = 0,061$ м; $R_3 = 0,074$ м; $R_4 = 0,087$ м; $n_1 = 13$ шт.; $n_2 = 20$ шт.; $n_3 = 21$ шт.; $n_4 = 44$ шт.; $R_k = 0,115$ м; $B_k = 0,093$ м: кривая №1 – результаты экспериментальных исследований; кривая №2 – результаты теоретических исследований

Анализ представленных зависимостей показывает, что теоретическая и экспериментальная кривые имеют аналогичный, ярко выраженный нелинейный характер с экстремумом при частоте вращения роторов порядка 1450 мин⁻¹.

Заметим, что по мере роста частоты вращения роторов наблюдается постепенное увеличение расхождения между теоретическими и экспериментальными данными, что обусловлено принятыми в теоретической модели допущениями, в частности, идеализацией аэродинамических процессов в рабочей камере дезинтегратора. Адекватность исследований подтверждается значением предельного отклонения (7,2 %) теоретических данных от экспериментальных, которое зафиксировано при $\omega_1 = \omega_2 = 1700$ мин⁻¹.

4.8 Выводы по главе

Экспериментальные исследования работы дезинтегратора с роторами классической и усовершенствованной конструкции позволили сделать следующие выводы:

1. 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 .

2. 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. Данные зависимости с высокой степенью адекватности описывают технологический процесс совместного измельчения известняка с глиной. Обработка модели позволила выделить наиболее значимые факторы и определить физические закономерности их влияния. Установлено, что в условиях установившегося режима работы дезинтегратора ключевой вклад в общую эффективность совместного измельчения известняка с глиной вносят частоты вращения роторов ω_1 и ω_2 .

3. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить диапазоны значений факторов ($\omega_1 = 1250 - 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1250 - 1600 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,25 - 2,75$), соответствующих рациональным режимам работы дезинтегратора при совместном измельчении известняка и глины. Выход установки на данные режимы обеспечивает достижение максимальной производительности по готовому продукту, равной $Q_R = 82,4 \text{ кг/ч}$ (при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1600 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,75$). При этом 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 – $V_C = 6,9 \%$ (при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,5$).

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

ГЛАВА 5. ПРЕДЛОЖЕНИЕ К ВНЕДРЕНИЮ В ПРОИЗВОДСТВО ДЕЗИНТЕГРАТОРА С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ РЯДАМИ УДАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

5.1 Технологический регламент на эксплуатацию дезинтегратора

В настоящей работе рассмотрена конструкция дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов и проведены его теоретические исследования. В ходе проведенных экспериментов установлено, что данная конструкция превосходит по основным технологическим параметрам дезинтегратор «классической» конструкции. Такими параметрами являются: производительность по готовому продукту (увеличение на 14 %); удельный расход электроэнергии (снижение на 12 %); коэффициент неоднородности смеси (снижение на 26 %). Усовершенствованный дезинтегратор может быть использован на различных предприятиях строительных материалов для измельчения или измельчения и смешивания нескольких компонентов.

При проведении полной серии экспериментов на лабораторной установке дезинтегратора предлагаемой конструкции в качестве исходного сырья были использованы известняк и глина, что позволило провести оценку совместного измельчения компонентов, отличных друг от друга по химическому составу и по физико-механическим свойствам.

Известно [11, 117], что дезинтеграторы широко распространены в производстве керамических изделий, где их используют для грубого и (или) тонкого помола основной глины, отощающих (шамот, дегидратированная глина) и пластифицирующих (высокопластичные глины) добавок. Ввиду чего предлагается использование усовершенствованного дезинтегратора в технологической линии производства керамического кирпича обыкновенного методом полусухого формования для совместного измельчения основного сырья – легкоплавкой глины с дегидратированной глиной.

Для подтверждения эффективности усовершенствованного дезинтегратора для измельчения и смешивания легкоплавкой и дегидратированной глины проведе-

на серия опытов при рациональных режимах его работы. Подача легкоплавкой и дегидратированной глин выполнялась в соотношении 2:1 соответственно, что принято на основании технологического регламента ОАО «ОКМ» (г. Россошь), производственная площадка которого имеет две линии на базе прессов серии СМ-1085 и ПКК-1.

Технологический регламент предприятия устанавливает требования к коэффициенту неоднородности шихты, который не должен превышать 8 % (после глиносмесителя). Достижение требуемого качества смешивания на стадии измельчения в дезинтеграторе позволит оптимизировать работу глиносмесителя с пароувлажнением за счет снижения эксплуатационных затрат на обслуживание смесительного оборудования вследствие уменьшения абразивной нагрузки на рабочие органы смесителя, а также сократит длительность цикла подготовки массы.

Фракционный состав глин, загружаемых в дезинтегратор, представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Фракционный состав глин

Фракция, мм	Содержание, %	
	Легкоплавкая глина	Дегидратированная глина
3,15 – 5,0	41	34
2,0 – 3,15	33	37
1,0 – 2,0	26	29

Легкоплавкие глины и дегидратированные имеют схожий элементный состав, но различаются по содержанию гидратной воды и других элементов. В таблице 5.2 представлен сравнительный химический состав двух типов глин (Беленихинское месторождение) в пересчете на оксиды.

Таблица 5.2 Химический состав глин

Компонент	Содержание, %	
	Легкоплавкая глина	Дегидратированная глина
Диоксид кремния (SiO_2)	44,2	50,5
Оксид алюминия (Al_2O_3)	38,5	44,7
Оксид железа (Fe_2O_3)	2,50	3,7
Оксид кальция (CaO)	0,35	0,40
Оксид магния (MgO)	0,25	0,28
Оксид калия (K_2O)	0,20	0,24
Оксид натрия (Na_2O)	0,15	0,18
Потери при прокаливании (ППП)	13,85	0

На рис. 5.1 – 5.3 представлены результаты измельчения и смешивания двух типов глин.

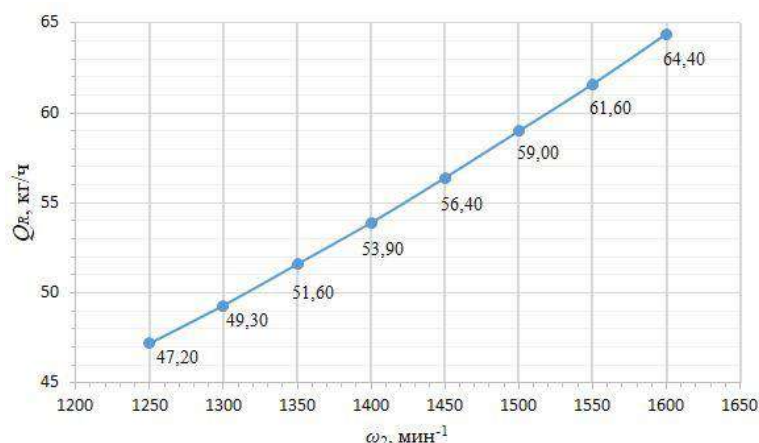


Рисунок 5.1 Зависимость производительности по готовому продукту Q_R от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях факторов $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ и $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$

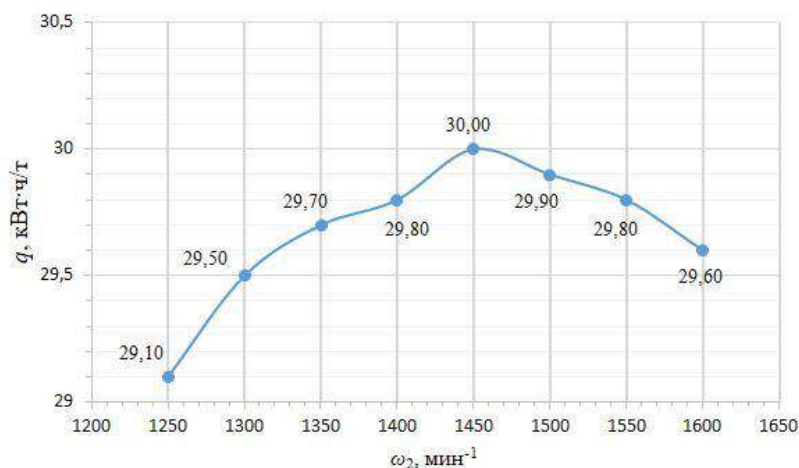


Рисунок 5.2 Зависимость удельных энергозатрат q от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях факторов $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ и $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$

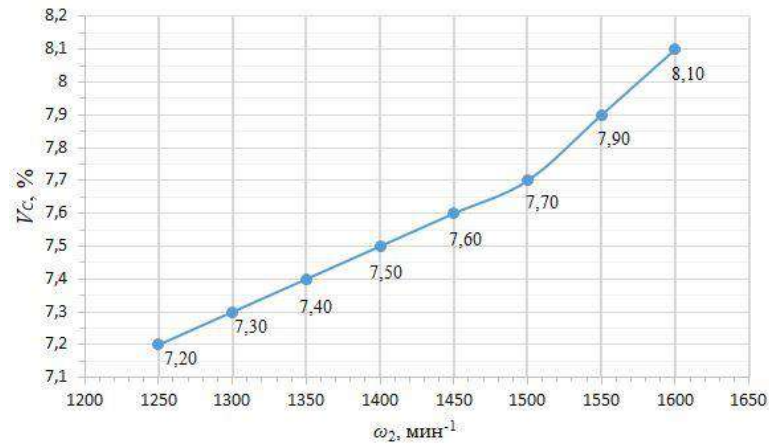


Рисунок 5.3 Зависимость коэффициента неоднородности смеси V_C от частоты вращения левого ротора ω_2 при фиксированных значениях факторов $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$ и $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Определение производительности по готовому продукту Q_R , удельных энергозатрат q и коэффициента неоднородности смеси V_C выполнялось по методикам, описанным в третьей главе настоящей работы. При этом контроль качества смешивания осуществлялся по ключевому компоненту – оксиду алюминия (Al_2O_3) ввиду явной разницы его содержания в составе глин (таблица 5.2). Это создает необходимый градиент концентраций для статистически достоверного определения коэффициента неоднородности распределения ключевого компонента в смеси V_C .

На рис. 5.4 представлены дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц по размерам (гранулометрический состав) в пробе измельчённых компонентов при частоте вращения роторов 1500 мин^{-1} .

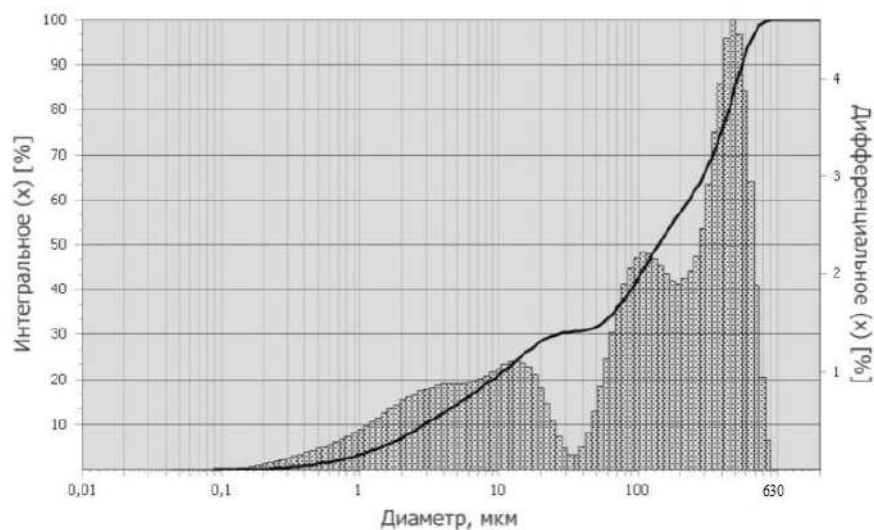


Рисунок 5.4 Дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц по размерам в двухкомпонентной сухой смеси легкоплавкой и дегидратированной глины при $\omega_1 = \omega_2 = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $\Delta_{\max} / \Delta_{\min} = 2,5$

Из графиков, представленных на рис. 5.4 можно определить, что при частоте вращения роторов дезинтегратора, равной 1500 мин^{-1} 57 % частиц пробы имеют размеры в диапазоне от 100 мкм до 630 мкм. Следовательно, это измельчение классифицируется как грубый помол и является хорошим показателем для производства качественного керамического кирпича [1, 31].

Технологическая линия ОАО «ОКМ» на базе прессы СМ-1085 используется для выпуска лицевого кирпича марки М-150, линия на базе прессы ПКК-1 – для выпуска рядового кирпича марки М-100.

Подготовим предложение к внедрению дезинтегратора в технологическую линию ОАО «ОКМ» по производству рядового кирпича. Для этого, в первую очередь, разработаем технологический регламент, содержащий описание производственного процесса. Ниже приведены основные положения технологического регламента на процесс совместного измельчения и смешивания легкоплавкой и дегидратированной глины в дезинтеграторе.

1. Сырье, подлежащее измельчению и смешиванию, должно соответствовать техническим характеристикам дезинтегратора. Его в обязательном порядке необходимо проверить на наличие металлических включений или других компонентов, которые приведут к интенсивному износу роторов или к аварийному останову в результате заклинивания роторов и перегрева электродвигателей. Также необходимо контролировать максимальный размер частиц, который определяется конструкцией роторов дезинтегратора и его загрузочного узла. Влажность измельчаемого материала не должна превышать 3 %. Дозирование легкоплавкой и дегидратированной глины в дезинтегратор выполняется равномерно в соотношении 2:1 соответственно. Увеличение доли дегидратированной глины приведет к снижению прочности кирпича, а уменьшение её доли – к повышению риска появления трещин и искажения размеров кирпича [24, 117].

2. Дезинтегратор предлагаемой конструкции разработан с целью увеличения производительности по готовому продукту, снижения коэффициента неоднородности и уменьшения удельных энергозатрат. Повышение производительности по готовому продукту осуществляется за счёт высокоскоростного периодического

увеличения концентрации частиц материала между рядами ударных элементов при уменьшении междурядного зазора, вследствие чего увеличивается количество взаимодействий частиц материала между собой и ударными элементами, возникают циклические нагрузки, что приводит к повышению эффективности разрушения частиц измельчаемого материала. Гранулометрический состав и однородность сухой смеси в данном дезинтеграторе регулируется за счёт изменения частоты вращения роторов и величины зазоров между рядами ударных элементов, что позволяет получать продукт в соответствии с требованиями нормативной документации предприятия-изготовителя кирпича. Общие требования к сырью для производства керамического кирпича изложены в ГОСТ 9169-75 – «Сырьё глинистое для керамической промышленности». В таблице 5.3 приведены рекомендуемые требования к сырьевой массе (шихте).

Контроль качества шихты выполняется в соответствии с ГОСТ Р 57925-2017 – «Композиты керамические. Подготовка образцов к определению гранулометрического состава керамического порошка» и ГОСТ 21216-2014 – «Сырьё глинистое. Методы испытаний».

Таблица 5.3 Основные требования к шихте

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Размер частиц	мм	Не более 2
Влажность	%	Не более 12

В рассматриваемом дезинтеграторе выполняется измельчение сырья влажностью не более 3 % с размером частиц готового продукта не более 630 мкм, следовательно, требования, указанные в таблице 5.3, выполнены.

В таблице 5.4 приведены основные требования к дегидратированной глине [34], которую получают за счёт термообработки легкоплавкой глины при температуре от 450 °С до 1000 °С. Дегидратированная глина предназначена для: снижения пластичности кирпича, уменьшения усадки в процессе сушки сырца, повышения прочности кирпича [24, 29].

Таблица 5.4 Основные требования к дегидратированной глине

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Степень дегидратации	%	40 - 80
Размер частиц	мм	Не более 2

3. Перед каждым пуском дезинтегратора необходимо проверить центрирование валов. Отклонение соосности валов двигателей относительно друг друга не должно превышать 0,15 мм. Центрирование валов необходимо проверять в четырех диаметрально-противоположных точках при неподвижных валах.

4. Не допускается подача исходных частиц материала в патрубок загрузки при выключенных электродвигателях. Подача сырья в патрубок загрузки дезинтегратора должна осуществляться равномерным потоком, что реализуется использованием питателей различных типов, например, ленточных, тарельчатых питателей или винтовых конвейеров.

5.2 Технологическая схема производства керамического кирпича методом полусухого формования

Производство керамического кирпича на ОАО «ОКМ» выполняется по технологической схеме в соответствии с ГОСТ Р 56828.21–2017 – «Производство керамического кирпича и огнеупорных изделий». На рис. 5.5 представлена схема цепей оборудования технологической линии производства рядового кирпича марки М-100 методом полусухого формования.

Процесс производства керамического кирпича следующий. Глина легкоплавкая, доставляется из карьера на склад 1 завод-изготовителя. Подготовленная дегидратированная глина хранится на складе 14.

С соответствующих складов 1 и 14 легкоплавкая и дегидратированная глина в соотношении 2:1 (варьируется в зависимости от рецептуры завода и свойств легкоплавкой глины) транспортируются в ящичные питатели 2, откуда посред-

ством ленточных транспортеров 3 загружаются в вальцы 4, где происходит предварительное измельчение сырья с размером частиц на выходе – не более 10 мм.

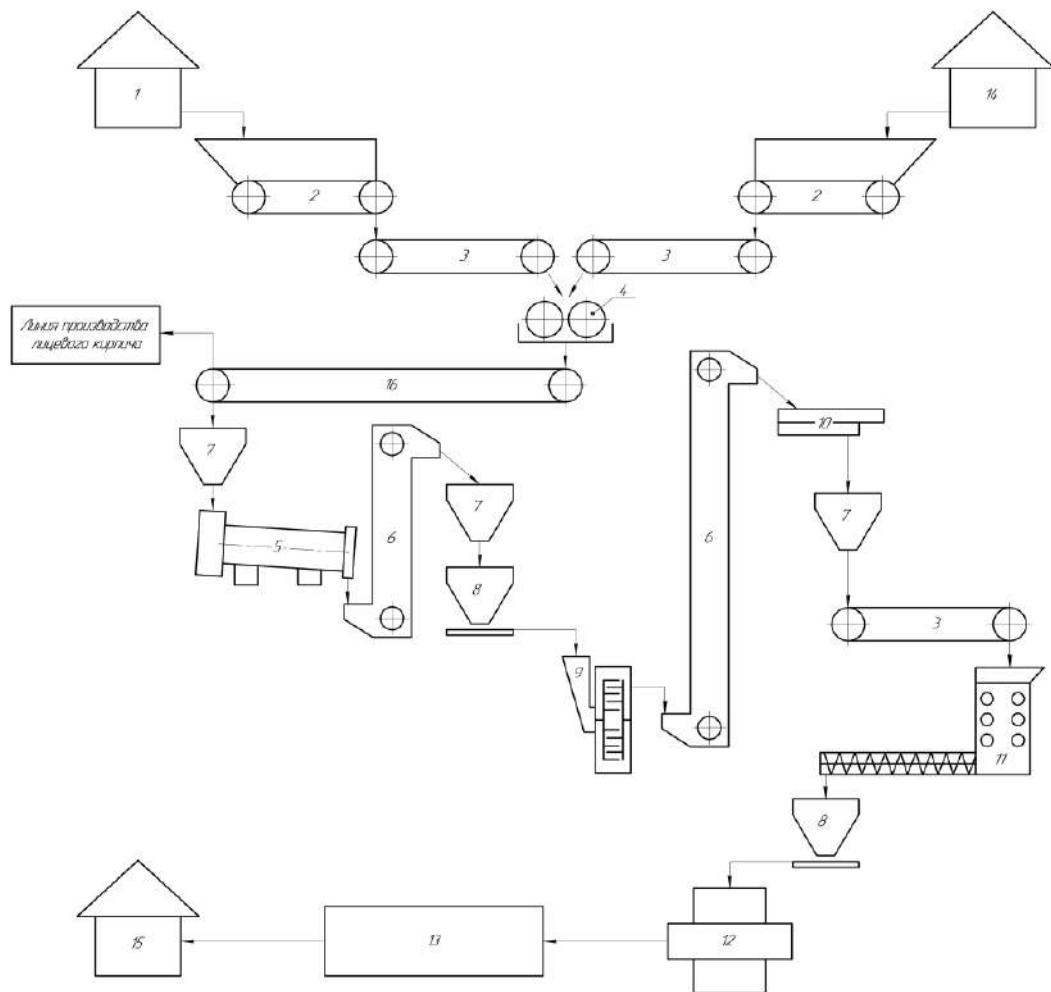


Рисунок 5.5. Схема цепей оборудования технологической линии производства рядового кирпича марки М-100 методом полусухого формования:

- 1 – склад легкоплавкой глины; 2 – ящичный питатель; 3 – ленточный транспортер; 4 – вальцы камневыделительные; 5 – сушильный барабан; 6 – элеватор; 7 – бункер; 8 – тарельчатый питатель; 9 – дезинтегратор; 10 – грохот; 11 – глиносмеситель с пароувлажнением; 12 – пресс; 13 – туннельная печь; 14 – склад дегидратированной глины; 15 – склад готовой продукции; 16 – ленточный транспортер разветвленный

Максимальный размер частиц сырья после предварительного измельчения варьируется в зависимости от типа оборудования для тонкого помола сырья. После вальцов 4 часть сырья направляется разветвленным ленточным транспортером 16 в накопительный бункер 7 сушильного барабана 5, а основная часть сырья направляется на параллельную линию производства лицевого кирпича. На выходе из сушильного барабана 5 влажность сырья не превышает 3 %. Высушенное сырьё элеватором 6 направляется в накопительный бункер 7, откуда посредством тарельчатого питателя 8 загружается в дезинтегратор 9. Происходит

процесс совместного грубого помола и смешивания легкоплавкой глины с дегидратированной глиной и на выходе из дезинтегратора 9 получается однородный двухкомпонентный порошок, который посредством элеватора 6 направляется на грохот 10. Методом грохочения из общего объёма измельчённого порошка отделяются частицы менее 2 мм, которые через расходный бункер 7 посредством ленточного питателя 3 направляются в глиносмеситель с пароувлажнением 11.

В глиносмесителе 11, за счёт интенсивного перемешивания, происходит равномерное увлажнение порошка до влажности 8 – 12 % посредством подачи горячего пара. Далее увлажненная масса тарельчатым питателем 8 равномерно подаётся в пресс 12, который формирует изделие (кирпич-сырец) путём двустороннего прессования. Из пресса 12 сырец автоматически укладывается на вагонетки, которые транспортируются по рельсовым путям в туннельную печь 13 где происходит обжиг сырца. После обжига готовые изделия подвергаются охлаждению, упаковке и направляются на склад готовой продукции.

Использование дезинтегратора новой конструкции в производстве керамического кирпича снизит удельные энергозатраты за счёт увеличения производительности по готовому продукту и повысит однородность керамического порошка.

В таблицах 5.5 – 5.9 представлены характеристики основного оборудования технологической линии ОАО «ОКМ» по производству рядового керамического кирпича методом полусухого формования.

Таблица 5.5 Технические характеристики вальцов камневыделительных типа СМ-1198А

Показатель	Единица измерения	Значение
Производительность	м ³ /ч	20 - 25
Мощность	кВт	30
Размер загружаемых кусков	м	не более 0,1
Размер измельчённых частиц	м	не более 0,01

Высокая производительность вальцов СМ-1198А обусловлена их использованием в качестве базового узла первичной переработки сырья для двух техноло-

гических линий: по выпуску лицевого кирпича марки М-150, по выпуску рядового кирпича марки М-100. Избыточный объём переработанной глиняной массы после прохождения вальцов 4 перенаправляется разветвленным ленточным транспортером 16 на параллельную линию производства лицевого кирпича, укомплектованную двумя дезинтеграторами СМК-211.

Таблица 5.6 Технические характеристики сушильного барабана СМК-1013

Показатель	Единица измерения	Значение
Производительность по высушенному материалу	кг/ч	до 3500
Мощность	кВт	9
Влажность загружаемого материала	%	12 – 19,5
Влажность материала на выходе	%	3 – 7

Таблица 5.7 Технические характеристики лопастного смесителя СМК-125

Показатель	Единица измерения	Значение
Производительность	м ³ /ч	18
Мощность	кВт	22
Частота вращения валов	с ⁻¹	не менее 0,7
Масса	кг	2850

Таблица 5.8 Технические характеристики прессы ПКК-1

Показатель	Единица измерения	Значение
Производительность по кирпичу	шт./ч	250-300
Мощность электродвигателей	кВт	7,5
Мощность электронагревателей	кВт	5,23
Усилие прессования	кН	1200
Масса	кг	1500

Таблица 5.9 Технические характеристики дезинтегратора СМК-43

Показатель	Единица измерения	Значение
Производительность	кг/ч	1000
Мощность привода	кВт	19
Коэффициент неоднородности смеси	%	9,1
Максимальный размер исходных кусков материала	м	0,01
Масса	кг	850

5.3 Определение физико-механических свойств лабораторных образцов керамического кирпича

Предполагается, что снижение коэффициента неоднородности смеси в дезинтеграторе (до поступления в смеситель с пароувлажнением) стабилизирует кинетику водопоглощения шихты, исключит локальное переувлажнение и образование макропор, что приведет к повышению предела прочности кирпича на сжатие, предела прочности при изгибе, морозостойкости и водопоглощения. Эти физико-механические свойства являются ключевыми нормативными характеристиками керамического кирпича в соответствии с ГОСТ 530-2012 – «Кирпич и камень керамические».

Для сравнительного анализа вышеуказанных физико-механических свойств кирпича были проведены соответствующие лабораторные испытания его образцов [30, 32, 70]. Образцы кирпича получены в лабораторных условиях БГТУ им. В. Г. Шухова из смесей глин, полученных на дезинтеграторе до усовершенствования и после. Образцы кирпича имеют форму балки размерами 30 мм × 30 мм × 160 мм (для определения прочности при изгибе) и форму куба размерами 30 мм × 30 мм × 30 мм (для остальных испытаний).

Испытания образцов проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58527-2019 – «Материалы стеновые. Методы определения предела прочности при сжатии и изгибе» и ГОСТ 7025-91 – «Кирпич и камни керамические и силикатные. Методика определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости».

Испытания образцов на сжатие проводились на лабораторном гидравлическом прессе марки П-10 (рис. 5.6), характеристики которого представлены в таблице 5.10. Основные этапы испытания следующие: размещение образца на опорной поверхности пресса; плавное нагружение до момента разрушения; фиксирование разрушающей силы; расчет предела прочности при сжатии по формуле (5.1) [32, 118].

$$R_{сж} = \frac{P_P}{F_o}, \quad (5.1)$$

где $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа;

P_P – разрушающая нагрузка, Н;

F_o – площадь поперечного сечения образца, мм².



Рисунок 5.6. Гидравлический пресс марки П-10
с образцом керамического кирпича при испытании на сжатие

Таблица 5.10 Основные технические характеристики пресса марки П-10

Показатель	Единица измерения	Значение
Наибольшая нагрузка	кгс	10000
Цена деления	кгс	20
Высота рабочего пространства	мм	400
Размер опорных плит	мм	210 × 210
Погрешность измерения	%	±2

Испытания образцов на изгиб проводились на малогабаритном испытательном прессе ПМЭ-10МГ4 (рис. 5.7), характеристики которого представлены в таблице 5.11. Основные этапы испытания следующие: установка образца на две опоры пресса; приложение сосредоточенной нагрузки к середине образца через верхнее нажимное устройство; фиксирование разрушающей силы; расчет предела прочности при изгибе по формуле (5.2) [32, 118].

$$R_{изг} = \frac{3 \cdot P_P \cdot L_o}{2 \cdot b_o \cdot h_o}, \quad (5.2)$$

где $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа;

L_o – расстояние между осями опор, мм;

b_o – ширина поперечного сечения образца, мм;

h_o – высота образца в центре пролета, мм.



Рисунок 5.7. Малогабаритный испытательный пресс ПМЭ-10МГ4 с образцом керамического кирпича при испытании на изгиб

Таблица 5.11 Основные технические характеристики пресса ПМЭ-10МГ4

Показатель	Единица измерения	Значение
Наибольшая нагрузка	кгс	1000
Цена деления	кгс	0,1
Высота рабочего пространства	мм	105
Размер опорных плит	мм	210 × 210
Погрешность измерения	%	±1

Испытания образцов на морозостойкость проводились с помощью морозильной камеры POZIS FV-108 (рис. 5.8), характеристики которой представлены в таблице 5.12. Основные этапы испытания образцов на морозостойкость следующие: предварительное насыщение образца водой; проведение осмотра влажного

образца на видимые дефекты (трещины, шелушения) и их фиксация, при наличии; замораживание образца в морозильной камере при температуре -18°C ; выдерживание образца в воде при температуре $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ до его полного оттаивания; повторный осмотр и взвешивание образца. Морозостойкость измеряется количеством циклов заморзания и оттаивания, после которых образцы не имеют видимых дефектов и не теряют в массе более 2 % [30, 118].



Рисунок 5.8. Морозильная камера POZIS FV-108 с образцом керамического кирпича при испытании на морозостойкость

Таблица 5.12 Основные технические характеристики морозильной камеры POZIS FV-108

Показатель	Единица измерения	Значение
Полезный объём	л	62
Количество отделений	шт.	3
Температура	$^{\circ}\text{C}$	-18
Мощность замораживания	кг/сут.	7

Испытания образцов на водопоглощение проводились с помощью устройства экспресс контроля водопоглощения (рис. 5.9), характеристики которого представлены в таблице 5.13. Основные этапы испытания образцов на водопоглощение следующие: высушивание образца в сушильном шкафу и его взвешивание; помещение образца в вакуумную камеру и выдерживание в вакууме в течение 15 мин.; заполнение водой части камеры с образцом и выдерживание в условиях вакуумирования в течение 15 мин.; выдерживание образца в воде при

атмосферном давлении в течение 30 мин.; извлечение образца из воды, обтирание влажной салфеткой и взвешивание; расчёт водопоглощения образца по формуле (5.3) [30, 118].

$$W_o = \frac{m_{o.в.} - m_o}{m_o} \cdot 100, \quad (5.3)$$

где W_o – водопоглощение образца, %;

$m_{o.в.}$ – масса влажного образца, г;

m_o – масса сухого образца, г.



Рисунок 5.9. Устройство экспресс контроля водопоглощения с образцом керамического кирпича

Таблица 5.13 Основные технические характеристики устройства экспресс контроля водопоглощения

Показатель	Единица измерения	Значение
Остаточное давление в системе после откачки из неё воздуха	кПа	Не более 2,5
Продолжительность заполнения камеры водой на уровень покрытия образца	мин.	Не менее 3
Диаметр вакуумной камеры	мм	296
Высота вакуумной камеры	мм	350

Результаты испытаний образцов керамического кирпича, изготовленных на базе смесей глин из дезинтегратора «классической» конструкции и дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 Результаты испытаний образцов керамического кирпича

Показатель	Единица измерения	Образцы на основе смеси глин из усовершенствованного дезинтегратора	Образцы на основе смеси глин из «классического» дезинтегратора	Изменение показателя, %
Предел прочности при сжатии	МПа	11,7	9,5	18,8
Предел прочности при изгибе	МПа	2,4	1,7	29,2
Фактическая морозостойкость	циклов	69	51	26,1
Водопоглощение	%	7,2	9,6	33,3

Анализ полученных данных показывает, что использование усовершенствованного дезинтегратора позволяет повысить физико-механические свойства образцов керамического кирпича.

5.4 Инженерная методика расчета усовершенствованного дезинтегратора

Проектирование дезинтегратора начинается с определения исходных данных: физико-механических свойств измельчаемого материала, дисперсности готового продукта, требуемой производительности, размера исходных частиц измельчаемого материала. Далее выполняется определение следующих параметров дезинтегратора: радиусов расположения рядов ударных элементов; количества ударных элементов каждого ряда; значения минимального расстояния между внешним рядом ударных элементов дезинтегратора и внутренней стенкой корпуса, необходимого для выхода частицы материала в тангенциальный разгрузочный патрубок; внутреннего радиуса камеры помола; ширины камеры помола; установленной мощности дезинтегратора.

Исходные данные к расчёту предлагаемого дезинтегратора представлены в таблице 5.15. Производительность указана из условия годовой мощности технологической линии, равной 1 млн. шт. кирпича.

Таблица 5.15 Исходные данные к расчету дезинтегратора

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Величина
Производительность	Q_m	кг/ч	1000
Частота вращения роторов	$\omega_1 = \omega_2$	с^{-1}	25
Отношение максимального междурядного зазора к минимальному	$\Delta_{\max}/\Delta_{\min}$	-	2,5
Минимальное расстояние между рядами ударных элементов	$\Delta_{\min}$	м	0,001
Максимальное расстояние между рядами ударных элементов	$\Delta_{\max}$	м	0,0025
Максимальный размер частиц готового продукта	d_k	м	$0,63 \cdot 10^{-3}$
Размер частиц исходного продукта	d_0	м	0,01
Предел прочности глины на растяжение	σ_p	МПа	0,4
Модуль упругости глины	E	МПа	20
Плотность частиц глины	ρ_0	кг/м ³	2750
Насыпная плотность исходного продукта	γ_0	кг/м ³	1550
Насыпная плотность готового продукта	γ_k	кг/м ³	850
Коэффициент трения частиц глины о поверхность ударных элементов	f	-	0,9
Коэффициент псевдовязкого измельчения	μ_{dp}	МПа·с	0,002618
Коэффициент динамической вязкости запыленного воздуха	μ	Па·с	$1,84 \cdot 10^{-6}$
Ширина ударного элемента	b	м	0,01
Расстояние между ближайшими точками соседних ударных элементов первого ряда,	s	м	0,02

Схема последовательности инженерного расчета дезинтегратора представлена на рис. 5.10. Количество рядов ударных элементов ($R_1 \dots R_4$) в схеме последовательности инженерного расчета дезинтегратора принято равным четырем на основании теоретических исследований, изложенных во второй главе, согласно которым при прохождении четырех рядов обеспечивается целевое изменение концентрации ключевого компонента до значения $C_4 = 0,57C_0$.

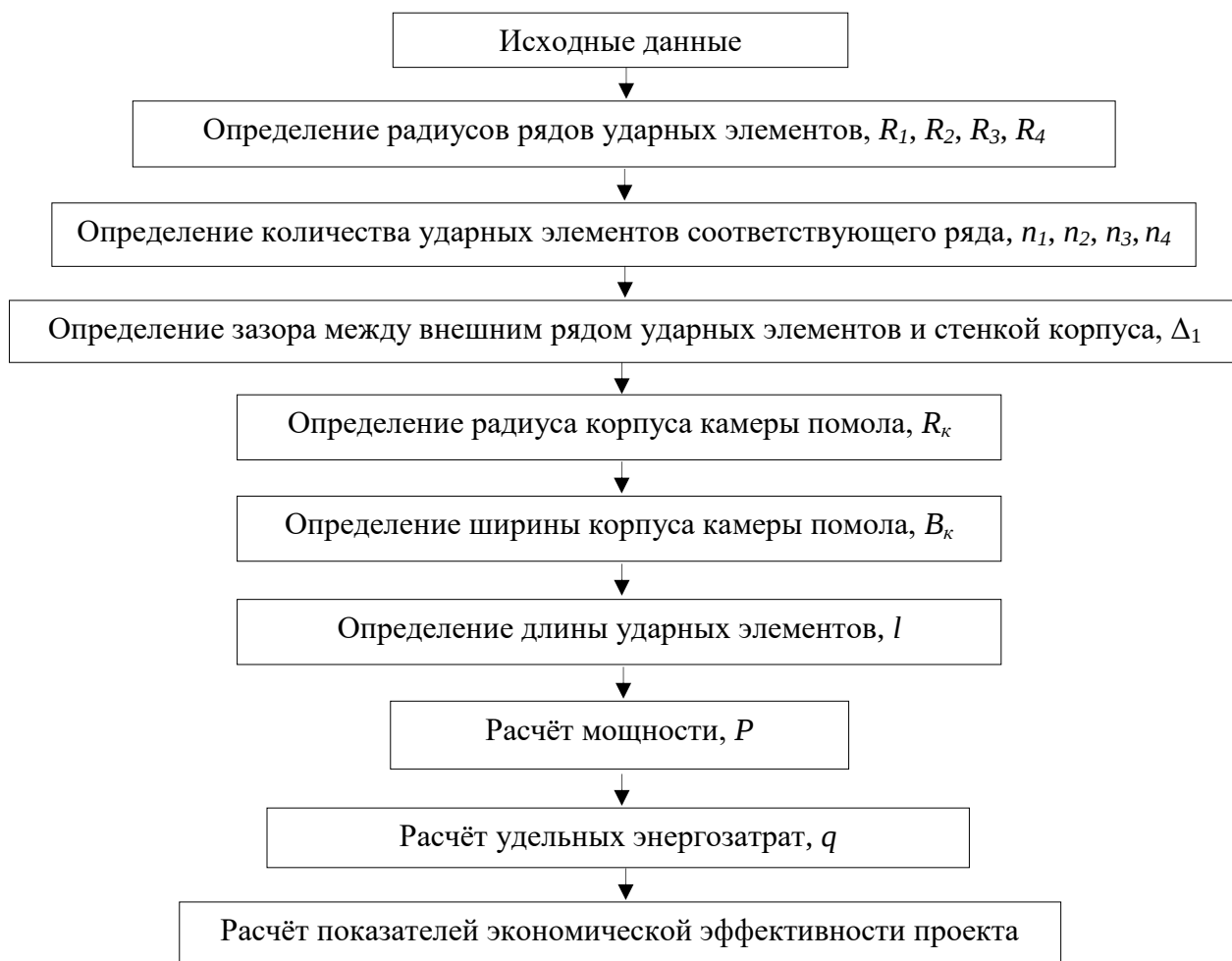


Рисунок 5.10. Схема последовательности инженерного расчёта усовершенствованного дезинтегратора

Расчёт вышеперечисленных параметров дезинтегратора приведен ниже.

1) Определяем радиус расположения первого ряда ударных элементов на основании выражений (2.99) и (2.100):

$$R_1 \geq \frac{\sigma_p}{\omega} \sqrt{E \cdot \rho_0 \left[\frac{\left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) \right)^{2\alpha_0}}{\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_0}{2} \right)} - 1 \right]}. \quad (5.4)$$

Из выражения (2.85) определяем величину φ_0 :

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \left(\frac{0,003}{0,001} \right) = \frac{2\pi}{5}.$$

Далее на основании выражений (2.86) и (2.90) определяем величину α_0 :

$$\Delta_0 = \sqrt{0,001^2 + 0,003^2} = 0,0032,$$

$$\alpha_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,002618}{25 \cdot 0,0032 \cdot 2750 \cdot 0,01} = 0,0018.$$

Тогда радиус расположения первого ряда ударных элементов следующий:

$$R_1 \geq \frac{0,4}{25} \sqrt{20 \cdot 2750 \left[\frac{\left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{10} \right) \right)^{2 \cdot 0,0018}}{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{10} \right)} - 1 \right]} = 0,108 \text{ м.}$$

Принимаем радиус расположения первого ряда ударных элементов равным 0,110 м.

2) Определяем количество ударных элементов первого ряда по следующей формуле [102]:

$$n_1 = \frac{\pi \cdot 2R_1}{s + b}, \quad (5.5)$$

$$n_1 = \frac{\pi \cdot 2 \cdot 0,110}{0,02 + 0,01} = 23,03.$$

Для обеспечения пропускной способности дезинтегратора округляем расчётное количество ударных элементов до целого числа в меньшую сторону и принимаем $n_1 = 23$ шт.

3) С учётом ширины ударных элементов b и величины $\Delta_{\max}$ выражения для определения радиусов последующих рядов ударных элементов выглядят следующим образом:

$$R_2 = R_1 + b + \Delta_{\max}, \quad (5.6)$$

$$R_2 = 0,110 + 0,01 + 0,003 = 0,123 \text{ м.}$$

$$R_3 = R_2 + b + \Delta_{\max}, \quad (5.7)$$

$$R_3 = 0,123 + 0,01 + 0,003 = 0,136 \text{ м.}$$

$$R_4 = R_3 + b + \Delta_{\max}. \quad (5.8)$$

$$R_4 = 0,136 + 0,01 + 0,003 = 0,149 \text{ м.}$$

Для 2-го, 3-го и 4-го рядов ударных элементов принимаем следующие значения расстояний между ближайшими точками соседних ударных элементов: $s_2 = 0,015$ м; $s_3 = 0,01$ м; $s_4 = 0,005$ м. Тогда количество ударных элементов данных рядов следующее:

$$n_2 = \frac{\pi \cdot 2 \cdot 0,123}{0,015 + 0,01} = 30,9 = 31 \text{ шт.}$$

$$n_3 = \frac{\pi \cdot 2 \cdot 0,136}{0,01 + 0,01} = 42,7 = 43 \text{ шт.}$$

$$n_4 = \frac{\pi \cdot 2 \cdot 0,149}{0,005 + 0,01} = 62,4 = 63 \text{ шт.}$$

4) Из выражения (2.115) определим минимальное расстояние между внешним рядом ударных элементов и внутренней стенкой корпуса:

$$\Delta_1 = \frac{d_1^2 \cdot \rho_0 \cdot \omega \cdot \alpha_1 \cdot R}{18\mu}. \quad (5.9)$$

где $d_1 = d_k$; величину α_1 принимаем на основании рис. 2.7 равной $\pi/6$; $R = R_4$:

$$\Delta_1 = \frac{(0,63 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2750 \cdot 25 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot 0,149}{18 \cdot 1,84 \cdot 10^{-6}} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

5) Определим радиус корпуса на основании следующего выражения:

$$R_k = R_4 + \frac{b}{2} + \Delta_1, \quad (5.10)$$

$$R_k = 0,149 + \frac{0,01}{2} + 6,5 \cdot 10^{-3} = 0,1604 \text{ м} = 0,161 \text{ м.}$$

6) Ширину камеры помола дезинтегратора определим из выражения (2.11), с учётом (2.12), по следующей формуле:

$$B_k = \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot g_r \cdot R_{uu} \cdot \left[\gamma_0 + \gamma_k \cdot \left(\frac{R_k}{R_{uu}} - 2 \right) \right]}. \quad (5.11)$$

Радиус шнека R_{uu} принимаем в зависимости от радиуса первого ряда ударных элементов R_1 :

$$R_{uu} = \frac{R_1}{2}, \quad (5.12)$$

$$R_{uu} = \frac{0,110}{2} = 0,055 \text{ м.}$$

Скорость $\mathcal{G}_r$ движения частицы материала по поверхности ударного элемента определим по формуле (2.7):

$$\mathcal{G}_r = \frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot f} \cdot (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha), \quad (5.13)$$

где расстояние ρ от оси вращения ряда ударных элементов до точки встречи частицы материала с поверхностью ударного элемента первого ряда определяем по формуле (2.8):

$$\rho = 0,110 - \frac{0,01}{2} = 0,105 \text{ м.}$$

Угол поворота α ударных элементов к радиальному направлению принимаем равным $\alpha = 0^\circ$.

Тогда скорость $\mathcal{G}_r$ равна:

$$\mathcal{G}_r = \frac{25 \cdot 0,105}{2 \cdot 0,9} \cdot (\cos 0^\circ - 0,9 \cdot \sin 0^\circ) = 1,46 \text{ м/с.}$$

Следовательно, ширина камеры помола равна:

$$B_k = \frac{1000}{2 \cdot \pi \cdot 1,46 \cdot 0,055 \cdot \left[1550 + 3200 \cdot \left(\frac{0,161}{0,055} - 2 \right) \right]} = 0,439 \text{ м.}$$

7) Из конструктивных соображений и расчётной ширины камеры помола устанавливаем длину ударных элементов $l = 250$ мм.

8) На основании выражения (1.4), с учётом выражений (1.5), (1.7)...(1.10) определим мощность дезинтегратора:

$$P = \frac{0,25 \cdot 2,34^2}{2} \cdot 25 \cdot 160 + 0,25 \cdot 2,34^2 \cdot 0,9 \cdot 25 \cdot \pi \cdot 160 + 2 \cdot (500 \cdot 0,03 \cdot \pi \cdot 0,03 \cdot 25) + \\ + \frac{0,5 \cdot 445 \cdot (1 + 2 \cdot 0,8)}{0,55} + \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 0,28 \cdot (50 - 1) \cdot 160}{0,298 \cdot 0,85 \cdot 0,55} = 19,4 \text{ кВт.}$$

9) Выполняем расчёт удельного расхода электроэнергии по формуле:

$$q = \frac{P}{Q_R}. \quad (5.14)$$

На основании проведенных экспериментов в четвертой главе можно определить, что при частоте вращения роторов 1500 мин^{-1} и отношении максимального расстояния между рядами ударных элементов к минимальному, равному 3, производительность по готовому продукту составит 91,2 % от пропускной способности (1000 кг/ч). Таким образом, принимаем $Q_R = 912 \text{ кг/ч}$. Тогда:

$$q = \frac{19,4}{912} = 0,0213 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}} = 21,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}.$$

10) Выполняем расчет показателей экономической эффективности внедрения дезинтегратора в технологическую схему производства керамического кирпича методом полусухого формования.

В таблице 5.16 приведены технические характеристики предлагаемого дезинтегратора промышленного образца.

Таблица 5.16 Технические характеристики дезинтегратора

Показатель	Единица измерения	Численное значение
Номинальная производительность	кг/ч	1000
Коэффициент неоднородности смеси (на основании экспериментов)	%	7,2
Установленная мощность	кВт	19,4
Радиусы рядов ударных элементов: - первый ряд - второй ряд - третий ряд - четвертый ряд	м	0,110 0,123 0,136 0,149
Длина ударных элементов:	м	0,250
Количество ударных элементов: -левый ротор -правый ротор	шт.	66 94
Максимальное расстояние между рядами ударных элементов	м	0,003

Продолжение таблицы 5.16

Показатель	Единица измерения	Численное значение
Минимальное расстояние между рядами ударных элементов	м	0,001
Частота вращения роторов: -левый ротор -правый ротор	мин ⁻¹ мин ⁻¹	1500 1500
Радиус камеры помола	м	0,161
Ширина камеры помола	м	0,439

В целях обеспечения подготовки бакалавров по направлению 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», а также инженеров по специальности 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов», в образовательный процесс БГТУ им. В. Г. Шухова была внедрена разработанная методика расчета конструктивно-технологических параметров дезинтегратора.

5.5 Технико-экономическая эффективность использования дезинтегратора

Рациональные конструктивно-технологические параметры усовершенствованного дезинтегратора были определены в ходе теоретических и экспериментальных исследований процессов измельчения и смешивания известняка с глиной. При этом результаты экспериментальной части настоящей работы нашли свое подтверждение в проведенной серии опытов измельчения двух типов глин.

Расчёт экономической эффективности использования дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов в технологическую линию ОАО «ОКМ» (г. Россошь) производства керамического кирпича выполнялся на основании следующих результатов экспериментальных исследований:

- увеличение производительности по готовому продукту на 14 %.
- снижение удельных затрат электроэнергии на 12 %.
- снижение коэффициента неоднородности смеси на 26 %.

Изменение вышеуказанных характеристик работы дезинтегратора не приведет к необходимости замены или модернизации существующего оборудования. Так, например, сушильный барабан имеет производительность до 3500 кг/ч, туннельная печь до 4160 кг/ч.

Расчёт экономической эффективности (Приложение 3) показал, что экономический эффект настоящего проекта за первые 3 года составит 392,5 тыс. рублей, за 5 лет - 1382,8 тыс. руб. Срок окупаемости проекта – 1,36 лет.

В результате снижения себестоимости на 0,01 руб. / шт., повысится прибыль до налогообложения на 745,383 тыс. руб., чистая прибыль – на 559,037 тыс. руб., рентабельность единицы продукции вырастет на 0,11 %.

За счет увеличения производительности по готовому продукту, снижения удельных затрат электроэнергии и коэффициента неоднородности смеси дезинтегратор с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов обладает более высокой конкурентоспособностью ($K = 1,4443 > 1$).

За счет повышения физико-механических свойств (табл. 5.14) керамический кирпич, полученный с использованием усовершенствованного дезинтегратора, обладает более высокой конкурентоспособностью ($K = 1,235 > 1$).

Оценка конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности позволяет сделать вывод, что предлагаемое решение экономически целесообразно и эффективно.

5.6 Выводы по главе

1. Разработан регламент технологических процессов измельчения и смешивания глины легкоплавкой и дегидратированной глины в усовершенствованном дезинтеграторе. В качестве измельчителя-смесителя дезинтегратор предлагается использовать на предприятии по производству керамического кирпича методом полусухого формования.

2. Предложена технологическая схема для получения керамического кирпича с использованием дезинтегратора новой конструкции на базе ОАО «ОКМ» (г. Россошь).

3. Разработана инженерная методика расчета дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов.

4. Выполнен расчёт экономической эффективности использования дезинтегратора в технологической линии производства рядового керамического кирпича на ОАО «ОКМ» (г. Россошь). 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 коэффициент неоднородности смеси на 26 %, что, в свою очередь, приводит к повышению конкурентоспособности дезинтегратора ($K = 1,4443 > 1$) и керамического кирпича ($K = 1,235 > 1$).

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, $R_{iu} = 0,02$ 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, $R_{uu} = 0,02$ 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 тангенциальный 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 ($\omega_1 = 1250 - 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1250 - 1600 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,25 - 2,75$), соответствующих рациональным режимам работы дезинтегратора при совместном измельчении известняка и глины. Выход установки на данные режимы обеспечивает достижение максимальной производительности по готовому продукту, равной $Q_R = 82,4 \text{ кг/ч}$ (при $\omega_1 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1600 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,75$). При этом 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 – $V_C = 6,9 \%$ (при $\omega_1 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\omega_2 = 1250 \text{ мин}^{-1}$; $\Delta_{max} / \Delta_{min} = 2,5$).

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. Россошь). 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 коэффициент 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Q – производительность дезинтегратора, кг/ч;

l – длина ударных элементов, м;

s – расстояние между ближайшими точками соседних ударных элементов внутреннего ряда, м;

ω – частота вращения роторов, с^{-1} ;

n – общее количество ударных элементов роторов, шт.;

ω_1 – частота вращения правого ротора с^{-1} ;

ω_2 – частота вращения левого ротора с^{-1} ;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности измельчаемого материала на сжатие, МПа;

μ_p – коэффициент разрыхления измельчаемого материала;

D_1 – диаметр первого ряда ударных элементов, м;

D_{cp} – средневзвешенный размер кусков исходного материала, м;

d_{cp} – средневзвешенный размер частиц готового продукта, м;

E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа;

W – индекс работы по Бонду, кВт·ч/т;

h – высота ударных элементов, м;

b – ширина ударных элементов, м;

N_1 – мощность, расходуемая на соударения частиц измельчаемого материала с подвижными элементами роторов, кВт;

N_2 – мощность, расходуемая на преодоление сил трения между измельчаемым материалом и ротором, кВт;

N_3 – мощность, расходуемая на преодоление сил трения в подшипниковых опорах валов роторов, кВт;

N_4 – мощность, расходуемая на перемещение воздушного потока, создаваемого роторами, кВт;

$\vartheta_{y.э.}$ – максимальная линейная скорость ударных элементов роторов, м/с;

m – масса измельчаемого материала, которую совместно воспринимают все ударные элементы роторов за одно столкновение, кг;

f – коэффициент трения измельчаемого материала по поверхности ударных элементов;

P_p – вес ротора, Н;

f_2 – коэффициент трения скольжения;

$d_{н.в.}$ – диаметр приводного вала, м;

k_u – кратность циркуляции воздушного потока;

$Q_в$ – производительность дезинтегратора по воздуху, м³/ч;

p – разряжение, возникающее в камере помола дезинтегратора, Н/м²;

η_p – КПД роторов дезинтегратора как центробежного вентилятора;

μ_n – концентрация пыли в воздушном потоке, кг/м³;

i_m – степень измельчения материала;

D_p – диаметр ротора, м;

$\eta_{прив.}$ – КПД привода дезинтегратора;

$\eta_{дези.}$ – КПД дезинтегратора;

$N_{дв.}$ – мощность электродвигателя, кВт;

$N_{прив.}$ – мощность привода, кВт;

Q_m – производительность дезинтегратора с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов, кг/ч;

r, χ, z – координаты цилиндрической системы координат;

γ_0 – насыпная плотность материала, поступающего на шнек, кг/м³;

γ_k – насыпная плотность материала на выходе из камеры помола дезинтегратора, кг/м³;

R_k – радиус корпуса дезинтегратора, м;

$R_{ш}$ – радиус шнека, м;

B_k – ширина камеры помола дезинтегратора, м;

ϑ_1 – скорость перемещения частиц материала вдоль поверхности ударных элементов, м/с;

- ϑ_r – скорость движения частицы материала по поверхности ударного элемента, имеющего отклонение от радиального направления на некоторый угол, м/с;
- ρ – расстояние от оси вращения ряда ударных элементов до точки встречи частицы материала с поверхностью ударного элемента, м;
- α – угол поворота ударных элементов, град.;
- R_i – расстояние от оси вращения до i – того ряда ударных элементов, м;
- i – номера ячеек, через которые последовательно проходит материал;
- C_i – концентрация выделенной компоненты смеси в i -ячейке, %;
- C_0 – начальное значение концентрации выделенной компоненты, %;
- Q_{Vi} – объемный расход материала, проходящего через i -ю ячейку, м³/с;
- γ_i – плотность материала, проходящего через i -ю ячейку, кг/м³;
- V_i – объем i -ой ячейки, м³;
- Δ – расстояние между радиальными размерами $i + 1$ и i -ой ячейками, м;
- C_1 – концентрация выделенной компоненты смеси в объеме первой ячейки, %;
- C_2 – концентрация выделенной компоненты смеси в объеме второй ячейки, %;
- C_3 – концентрация выделенной компоненты смеси в объеме третьей ячейки, %;
- C_4 – концентрация выделенной компоненты смеси в объеме четвертой ячейки, %;
- $A_{10}, A_{20}, A_{30}, A_{40}$ – постоянные интегрирования;
- τ_0 – время нахождения частиц материала в ячейке, с;
- $m(t)$ – величина математического ожидания;
- λ – интенсивность Марковского процесса;
- k – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размера ударных элементов;
- n_0 – начальное число частиц, поступающее на первый ряд ударных элементов;
- d_0 – средний размер частиц загружаемого материала, м;
- Q_0 – пропускная способность дезинтегратора, м³/с;
- R_m – радиус трубы шнека, м;
- $h_{ш}$ – шаг шнека, м;
- Ω – частота вращения шнека, с⁻¹;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – угол наклона стенки бункера к вертикали, град.;

$n_{k1}, n_{k2}, n_{k3}, n_k$ – число частиц материала соответственно после первого, второго, третьего и четвёртого ряда ударных элементов;

d_k – средний размер частиц готового продукта, м;

F_{Δ} – величина силы, под действием которой происходит разрушение частицы измельчаемого материала, Н;

m_0 – масса частицы, находящейся в переменном пространстве между рядами ударных элементов, кг;

ϑ_t – скорость частицы, движущейся в переменном пространстве между рядами ударных элементов, м/с;

S_0 – площадь рассматриваемой частицы измельчаемого материала в её поперечном сечении, м²;

d_{Δ} – размер частицы материала, находящейся в переменном пространстве между рядами ударных элементов, м;

μ_{dp} – коэффициент псевдовязкого измельчения, Па·с;

Δ_0 – амплитуда переменного междурядья ударных элементов, м;

φ_0 – значение начальной фазы, град.;

φ – угол, отсчитываемый от начального направления оси «х», град.;

ρ_0 – плотность частицы измельчаемого материала, кг/м³;

ϑ_0, ϑ_k – соответственно начальная и конечная скорости частицы в переменном пространстве между рядами ударных элементов, м/с;

σ_p – предельное растягивающего напряжение измельчаемого материала, МПа;

ΔE_k – величина изменения кинетической энергии измельчаемой частицы в результате её движения в переменном пространстве между рядами ударных элементов, Дж.;

R_r – радиальный размер переменного пространства между рядами ударных элементов, м;

Δ_1 – зазор между внутренней стенкой камеры помола дезинтегратора и внешним рядом ударных элементов, м;

l_r – длина участка, соответствующая равновесной траектории движения частиц материала, м;

R – радиус внешнего ряда ударных элементов, м;

r – расстояние от внешнего ряда ударных элементов до частицы, движущейся по равновесной траектории, м;

μ – коэффициент динамической вязкости запыленного воздуха, Па·с;

d_r – диаметр частицы во время движения по равновесной траектории, м;

m_r – масса частицы, движущейся по равновесной траектории, кг;

Δ_2 – значение минимального расстояния, необходимого для выхода частицы материала в тангенциальный разгрузочный патрубок с круговой траектории, м;

d_1 – диаметр частиц, совершающих переход из камеры помола в тангенциальный разгрузочный патрубок, м;

$\vec{g}$ – вектор скорости двухфазной среды, м/с;

d – размер тангенциального патрубка по оси «у», м;

x_L – расстояние, на котором происходит разворот вектора скорости, м;

ψ – угол поворота вектора скорости двухфазной среды, град.;

y – функция отклика;

b_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии;

b_j – коэффициент при линейном эффекте взаимодействия;

b_{ij} – коэффициент при парном эффекте взаимодействия;

b_{jj} – коэффициент при квадратичном эффекте взаимодействия;

x_u, x_j – уровни варьирования факторов;

$S_{\{b_j\}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии;

S_{ad} – дисперсия адекватности;

S_y – дисперсия воспроизводимости;

Q_R – производительность дезинтегратора по готовому продукту, кг/ч;

V_C – коэффициент неоднородности смеси, %;

q – удельные энергозатраты на работу дезинтегратора, кВт·ч/т;

$\Delta_{\max} / \Delta_{\min}$ – величина отношения максимального междурядного зазора к минимальному;

D_{κ} – диаметр камеры помола, м;

$n_{\kappa p}$ – конфигурации крепления ударных элементов;

$R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа;

P_P – разрушающая нагрузка, Н;

F_o – площадь поперечного сечения образца, мм²;

$R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа;

L_o – расстояние между осями опор, мм;

b_o – ширина поперечного сечения образца, мм;

h_o – высота образца в центре пролета, мм;

W_o – водопоглощение образца, %;

$m_{o.в.}$ – масса влажного образца, г;

m_o – масса сухого образца, г;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЦКРП – центральный композиционный рототабельный план;

ПФЭ – полнофакторный эксперимент;

РФА – Рентгенофлуоресцентный анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, Е. Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению / Е. Е. Андреев, О. Н. Тихонов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2007. – 439 с.
2. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х томах. Т. 1 / Е.Е. Анурьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
3. Арзамасов, Б. Н. Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов, Т. В. Соловьева, С.А. Герасимов и др. / Под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640с.
4. Афанасьев, А. И. Измельчение горной породы в центробежных мельницах / А. И. Афанасьев, В. В. Зубов, Д. И. Симисинов, А. А. Чиркова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. - №3. – С. 18-29.
5. Барабашкин, В. П. Молотковые и роторные дробилки / В. П. Барабашкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1973. – 143 с.
6. Бауман, В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В.А. Бауман, Б.В Клушанцев, В.Д. Мартынов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 320с.
7. Бауман, В. А. Роторные дробилки / В. А. Бауман, В. А. Стрельцов, А. И. Косарев, А. С. Слуцкер. – М.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
8. Башкирцев, А. А. Анализ эффективности машин для тонкого измельчения строительных материалов / А. А. Башкирцев // Определение рациональных параметров дорожно-строительных машин: Сб. науч. тр. МАДИ. – М.: Изд-во МАДИ, 1986. – Вып. 23. – С. 122-124.
9. Блиничев, В. Н. Описание процесса тонкого измельчения в сепарационной мельнице ударно-отражательного действия / В.Н. Блиничев, Т.В. Гущина [и др.] // сб. статей междунар. научн.-практ. конференции. – Краков: Краковская Политехника. – 2008. – С. 43-48.

10. Боброва, Н. В. Интенсификация процессов измельчения и смешивания в центробежно-ударных машинах: дис. ...канд. техн. наук. – Иваново, 2010. – 140 с.
11. Богданов, В. С. Дезинтеграторы: монография / В. С. Богданов, И. А. Семикопенко, В. П. Воронов. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – 250 с.
12. Богданов, В. С. Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, Д. В. Богданов, И. А. Семикопенко. – 3-е изд., стер. – Белгород: Изд-во ТНТ, 2020. – 436 с.
13. Богданов, В. С. Процессы помола и классификации в производстве цемента / В. С. Богданов, А. С. Ильин, Н. П. Несмеянов. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 199 с.
14. Богданов, В. С. Дезинтеграторы. Конструкция. Теория. Эксперимент: монография / В. С. Богданов, И. А. Семикопенко, В. П. Воронов. – 2-е изд., испр. и доп. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – 235 с.
15. Богданов, В. С. Дезинтегратор с повышенными нагрузками на измельчаемый материал / В. С. Богданов, И. А. Семикопенко, А. Н. Масловская [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 5. – С. 51-54.
16. Богомягих, В. А. О форме бункера наибольшей пропускной способности: монография / В. А. Богомягих, С. Ю. Чумаков, Е. Г. Братцева. – зерноград: АЧГАА, 2012. – 107 с.
17. Богородский, А. В. Разработка конструкций и методов расчёта интенсивных измельчителей дезинтеграторного типа: дис. ...канд. техн. наук. – Иваново, 1982. – 171 с.
18. Бойко, В. С. Анализ способов интенсификации работы шаровых цементных мельниц / В. С. Бойко, А. В. Никитин, В. В. Казимиров // Вестник МГСУ. – 2017. – № 4. – С. 447-456.
19. Борщёв, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учеб. пособие / В. Я. Борщёв. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. – 90 с.
20. Бочаров, С. Н. Технологический комплекс переработки песков техногенного месторождения / С. Н. Бочаров, В. С. Кузнецов, Е. Н. Шендерович, К.Б. Кузьмин // Горный журнал. – 2007. – №9. – С. 45-49.

21. Бретшнайдер, С. Свойства газов и жидкостей: Инж. методы расчета: Пер. с польск. / С. Бретшнайдер. – Москва, Ленинград: Химия, 1966. – 535 с.
22. Вайтехович, П. Е. Производительность измельчающего агрегата дезинтеграторного типа / П. Е. Вайтехович, В. Ю. Мурог // Строительная наука и техника. – 2009. – №2. – С. 77-81.
23. Вильдеман, В. Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В. Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. – М.: Наука. Изд. фирма «Физматлит», 1997. – 288 с.
24. Воронин, К. М. Разработка состава сырьевой шихты для производства эффективного полнотелого керамического кирпича / К. М. Воронин, С. А. Некрасова, А. В. Артамонова // Стекло и керамика. – 2015. – №12. – С. 17-18.
25. Воронов, В. П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа / В. П. Воронов, И. А. Семикопенко, П. П. Пензев // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – №11-12. – С. 93-96.
26. Воронов, В. П. Определение условия выхода частиц материала в разгрузочный патрубок камеры помола дезинтегратора / В. П. Воронов, И. А. Семикопенко, П. П. Пензев [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – №2. – С. 90-91.
27. Гаврунов, А. Ю. Вибровращательная мельница с продольно-поперечным движением мелющих тел: монография / А. Ю. Гаврунов, В. С. Богданов, Ю. М. Фадин. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2015. – 131 с.
28. Гайдадин, А. Н. Моделирование технологических процессов с помощью метода наименьших квадратов: метод. указания / А. Н. Гайдадин, С. А. Ефремова, Н. Н. Печурина. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 16 с.
29. ГОСТ 530-2012. Кирпич и камни керамические. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.
30. ГОСТ 7025-91. Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости. – М.: Стандартинформ, 2004. – 15 с.

31. ГОСТ Р 57925-2017. Композиты керамические. Подготовка образцов к определению гранулометрического состава керамического порошка. – М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.
32. ГОСТ Р 58527-2019. Материалы стеновые. Методы определения предела прочности при сжатии и изгибе. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.
33. ГОСТ Р 55410-2013. Огнеупоры. Химический анализ рентгенофлуоресцентным методом. – М.: Стандартинформ, 2014. – 81 с.
34. ГОСТ 9169-75. Сырьё глинистое для керамической промышленности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 7 с.
35. ГОСТ 2093-82. Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 20 с.
36. Гячев, Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 1992. – 309 с.
37. Данилов, Р. Г. Гипотеза маханизма тонкого измельчения в роторных мельницах с зубчатоподобным зацеплением / Р. Г. Данилов // Промышленность стройматериалов и стройиндустрия. Энерго - и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междунар. конф. Ч.4. – Белгород, 1997. – С. 164-168.
38. Девяткин, Е.А. Совершенствование систем аспирации на участках дробления и помола сырья для производства керамического кирпича / Е. А. Девяткин, А. Н. Соловьев // Экология и промышленность России. – 2016. – № 10. – С. 52-57.
39. Денисов, В. А. Энергосберегающие устройства для измельчения сырья в решении проблемы создания безотходных производств / В. А. Денисов // Строительные и дорожные машины. – 2006. – №5. – С. 38-42.
40. Дмитрак, Ю В. К концепции тонкого измельчения минерального сырья / Ю. В. Дмитрак // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2021. – №4. – С. 51-57.
41. Дмитриева, Л. А. Исследование процесса измельчения хрупких материалов: дис. ...канд. техн. наук – Иваново, 2006. – 165 с.

42. Долгунин, В. Н. Сдвиговые течения зернистых сред: закономерности и технологические аспекты: монография / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, В. Я. Борщев. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. – 168 с.

43. Дровников, А. Н. Системы мельниц динамического самоизмельчения контурного типа: монография / А. Н. Дровников, А. А. Остановский. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2017. – 183 с.

44. Дубинин, Н. Н. Производительность роторных машин с камерой переменного сечения / Н. Н. Дубинин, С. А. Михайличенко, Л. С. Уральская // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №4. – С. 102-104.

45. Ефимова, Н. Л. Получение тонкодисперсных порошков твёрдых хрупких материалов / Н. Л. Ефимова, С. М. Кожин, Ю. А. Пименов // Инновации. – 2005. – № 8. – С. 113-114.

46. Зедгенидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгенидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

47. Ильинский, В. М. Измерение массовых расходов / В. М. Ильинский. – М.: Энергия, 1973. – 144 с.

48. Карпенко, А.В. Исследование износа бил роторной дробилки и выбор износостойкого материала / А. В. Карпенко, С. Г. Семенов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 8. – С. 29-33.

49. Качаев, А. Е. Расчет траектории и скорости движения частицы измельчаемого материала по поверхности рабочего элемента дезинтегратора / А.Е. Качаев, В.С. Севостьянов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – №2. – С. 56-59.

50. Качаев, А. Е. Дезинтегратор с ударно-сдвиговым воздействием на измельчаемый материал / А. Е. Качаев, В. С. Севостьянов, И. Г. Королев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – №1. – С. 102-105.

51. Качаев, А. Е. Экспериментальное исследование по повышению абразивной износостойкости пальцев дезинтегратора / А. Е. Качаев, Г. И. Чемеричко, В. С. Севостьянов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – №1. – С. 112-121.

52. Качаев, А. Е. Математическая модель вихревого движения двухфазного потока в дезинтеграторной мельнице / А. Е. Качаев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2024. – № 4. – С. 79-90.

53. Качаев, А. Е. К определению времени удара и мощности дезинтегратора, расходуемой на измельчение при ударном воздействии / А. Е. Качаев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 60-64.

54. Кейнс, С. Интенсификация химических процессов: состояние и перспективы / С. Кейнс, Х. Ангелино // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 6. – С. 609-625.

55. Ключков, Н. В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице / Н. В. Ключков, В. Н. Блиничев, С. П. Бобков, А. В. Пискунов // Известия ВУЗов. Химия и хим. Технология. – 1982. – №2. – С. 230-232.

56. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкции, расчет, особенности эксплуатации / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.

57. Колобов, М. Ю. Повышение долговечности рабочих органов центробежно-ударных измельчителей / М. Ю. Колобов, О. В. Чагин, В. Н. Блиничев // Российский химический журнал. – 2019. – № 3-4. – С. 40-44.

58. Костюков, А. Н. Динамический анализ и снижение вибрации высокоскоростного ротора дезинтегратора / А. Н. Костюков, А. Н. Силин // Вестник машиностроения. – 2020. – № 5. – С. 45-49.

59. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

60. Лапшин, В. Б. Интенсификация механо-химических процессов в гетерогенных средах на основе дезинтеграторов с плоскими рабочими элементами: дис. ...докт. техн. наук: 05.17.08. – Иваново, 2005. – 387 с.

61. Лапшин, В. Б. Применение дезинтегратора в различных технологиях / В. Б. Лапшин, М. Ю. Колобов, В. В. Колобова, А. В. Рязанцева // Изв. ВУЗ. Химия и химическая технология. – 2004. – №8. – С. 71 – 75.

62. Лапшин, В. Б Соотношение между износом ударных элементов в дезинтеграторе и степенью измельчения абразивного материала в нем / В. Б. Лапшин, В. В. Колобова, Н. В. Боброва // Сборник научных трудов ИГСХА «Проблемы и перспективы развития сельскохозяйственной науки и АПК в современных условиях». – Иваново, 2004. – С. 189-190.

63. Левданский, А. Э. Исследование новых конструкций ударно-центробежных мельниц / А. Э. Левданский // Журнал прикладной химии. – 2004. - №6. – С. 956-960.

64. Лещенко, Е. В. Влияние конструктивных параметров камеры измельчения на эффективность работы мельницы ударно-отражательного действия / Е. В. Лещенко, С. А. Опарин, В. И. Кравец // Химия, химические технологии и экология – Сборник научных трудов. – 2008. – №38. – С. 52-58.

65. Липилин, А. Б. Селективная дезинтеграторная активация портландцемента / А.Б. Липилин, Н.В. Коренюгина, М.В. Векслер // Научно – тех. и производ. журн. «Строительные материалы». – 2007. – № 3. – С. 19-23.

66. Липилин, А. Б. Противоточные импеллеры «РЕСУРС – 450» или новая конструкция корзин быстроходных дезинтеграторов / А. Б. Липилин, М. В. Векслер, Н. В. Коренюгина // Строительные материалы, технологии и оборудование XXI века. – 2009. – №10. – С. 29-30.

67. Липилин, А. Б. Дезинтегратор мокрого помола в производстве неавтоклавно-пенобетона / А. Б. Липилин, Н. В. Коренюгина // Научно – тех. и производ. журн. «Строительные материалы». – 2014. – № 6. – С. 10-11.

68. Логачев, К. И. Системы пылегазоочистки и аспирации в промышленности строительных материалов / К. И. Логачев, И. Н. Логачев, Е. Ю. Бормотова. – М.: Изд-во АСВ, 2018. – 280 с.

69. Лозовая, С. Ю. Создание методов расчёта и конструкций устройств с деформируемыми рабочими камерами для тонкого и сверхтонкого помола материалов: дис. ...докт. техн. наук: 05.02.13. – Белгород, 2005. – 456 с.

70. Михайлов, А.С. Методы обработки экспериментальных данных при оценке механических свойств строительных материалов / А. С. Михайлов, В. Г. Спиридонова, В. Г. Баганина // Вестник МГСУ. – 2015. – № 10. – С. 123-132.

71. Мудров, А. Г. Молотковая мельница / А. Г. Мудров // Известия КГСАУ. – 2016. – №3 (37). – С. 238-243.

72. Мурог, В. Ю. Моделирование процессов диспергирования и механической активации в аппаратах дезинтеграторного типа: дис. ...канд. техн. наук: 28.05.05. – Минск, 2005. – 156 с.

73. Мурог, В. Ю. Помольно-классифицирующие мельницы дезинтеграторного типа / В. Ю. Мурог, П. Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2008. – №3. – С. 113-117.

74. Николаев, Е. А. Разработка методов расчёта и моделирование малообъёмных роторных дезинтеграторов-смесителей: дис. ...канд. техн. наук: 05.17.08. – Уфа, 2008. – 121 с.

75. Осокин В. П. Молотковые мельницы / В. П. Осокин. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. Пивняк, Г. Г. Измельчение. Энергетика и технология / Г. Г. Пивняк, Л. А. Вайсберг, В. И. Кириченко [и др.] – М: Изд-во ИД «Руда и Металлы», 2007. – 296 с.

80. Постановление Правительства РФ от 30.12.2017 № 1710 Об утверждении государственной программы РФ «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 15.01.2018. – № 3. – Ст. 546.

81. Прокопец, В. С. Увеличение работоспособности мельниц ударного действия с помощью твердых безвольфрамовых сплавов / В. С. Прокопец, В. В. Акимов // Журн. «Строительные материалы, оборудование технологии XXI века». – 2005. – №7. – С. 50-51.

82. Распоряжение Правительства РФ от 10.05.2016 № 868-р // Собрание законодательства РФ. – 16.05.2016. – № 20. – Ст. 2863.

83. Романович, А. А. Производство в роторно-вихревой мельнице минеральных порошков для асфальтобетона / А.А. Романович, Т.Н. Орехова, А.А. Голубятников // Научный альманах. – 2016. – №3. – С. 153-155.

84. Рыскалиев, М. Ж. Дезинтеграторная активация цемента и песка с целью получения пенобетона заданных физико-механических свойств / М. Ж. Рыскалиев // Наука и новые технологии. – 2013. – №5. С. 71-77.

85. Рязанцева, А. В. Использование дезинтеграторной технологии для интенсификации процессов в гетерогенных системах: дис. ...канд. техн. наук: 05.17.08. – Иваново, 2003. – 127 с.

86. Сапожников, М. Я. Справочник по оборудованию заводов строительных материалов / М. Я. Сапожников, Н. Е. Дроздов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1970. – 356с.

87. Севостьянов, В. С. Разработка и исследования энергосберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов / В. С. Севостьянов, Д. Н. Перелыгин, В. И. Уральский [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2014. – №3. – С. 76-80.

88. Сембаев, Н. С. Основные способы механического измельчения и дисперсионного анализа твёрдых тел / Н. С. Сембаев, Г. Д. Бозымбаев // Наука и техника Казахстана. – 2008. – №2. – С. 35-45.

89. 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.

90. 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.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. 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.

96. 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.

97. 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.

98. Семикопенко, И. А. Определение граничного размера частиц измельчённого в дезинтеграторе материала / И. А. Семикопенко, В.С. Богданов, И. Н. Логачёв, Д. В. Смирнов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №11. – С. 156-160.

99. Семикопенко, И. А. Дезинтеграторы с эксцентричным расположением рядов рабочих элементов: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.13. – Белгород, 1998. – 140 с.

100. Семикопенко, И. А. Расчёт объёмного расхода материала через загрузочный бункер дезинтегратора / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, Д. В. Смирнов [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. – №1. – С. 68-70.

101. Семикопенко, И. А. Агрегат дезинтеграторного типа с внутренней классификацией материала / И. А. Семикопенко, С. В. Вялых, А. А. Жуков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – №3. – С. 74-76.

102. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.

103. Сиваченко, Л. А. Современное технологическое машиностроение. Основные положения / Л. А. Сиваченко // Инженер-механик. – 2010. – № 4. – С. 10-20.

104. Сиваченко, Л. А. Основные положения совершенствования дезинтеграторных технологий / Л. А. Сиваченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 4. – С. 95 – 106.

105. Тарасов, В. Н. Теория удара в строительстве и машиностроении / В. Н. Тарасов [и др.]. – М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2006. – 336 с.
106. Титов, В. А. Исследование процессов измельчения материалов в дезинтеграторе / В. А. Титов, Е. В. Остроглядова, Н. В. Мерзликина // Вестник КРАСГАУ. – 2009. – №12. – С. 161-164.
107. Ферзулаев, Ф. М. Повышение износостойкости бил молотковых мельниц / Ф. М. Ферзулаев, И. М. Павлов // Молодой ученый. – 2021. – № 22. – С. 131-133.
108. Хахалев, П. А. Совершенствование конструкции ступенчатой футеровки и исследование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.13. – Белгород, 2017. – 192 с.
109. Хинт, Й. А. Об основных проблемах механической активации / Й. А. Хинт. – Таллинн: [б. и.], 1977. – 14 с.
110. Хинт, Й. А. Основы производства силикальцитных изделий / Й. А. Хинт. – М.: Госстройиздат, 1962. – 601 с.
111. Хинт, Й. А. Основы производства известково-песчаных изделий: автореф. дис. ...докт. техн. наук. – Ленинград: [б. и.], 1961. – 33 с.
112. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 230 с.
113. Чернецкий, М. Ю. Преобразование минеральной части бурого угля Канско-Ачинского бассейна и каменного угля Экибастузского бассейна при их измельчении в дезинтеграторе / М. Ю. Чернецкий, Е. Б. Бутаков, А. В. Кузнецов [и др.] // Химия твёрдого топлива. – 2019. – №4. – С. 9-17.
114. Шелофаст, В. В. Основы проектирования машин / В. В. Шелофаст. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АПМ, 2005. – 471 с.
115. Шишканов, К. А. Анализ конструкций и основных характеристик вибрационных мельниц / К. А. Шишканов, А. Ю. Дмитрак // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №4. – С. 324-328.

116. Шишков, М. М. СНГ. Марочник сталей и сплавов ведущих промышленных стран мира / М. М Шишков, А. М. Шишков. – 3-е изд., доп. – Донецк: Юго-Восток, 2005. – 576 с.
117. Щепетильников, Н.В. Глинистое сырье для производства керамических материалов / Н. В. Щепетильников, Ю. А. Тарасенко. – М.: Изд-во МГСУ, 2013. – 180 с.
118. Яворский, Б. М. Справочник по физике. Для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 862 с.
119. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник / А. И. Ящура. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 354 с.
120. Chenje, T. W. Relationship between microstructure, hardness, Impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations // T. W. Chenje, D. J. Simbi, E. Navara // Materials and design. – 2004. – Vol. 25. – №1. – P. 11-18.
121. Climent, E. Numerical modelling of grinding in a stirred media mill: Hydrodynamics and collision characteristics / E. Climent, R. Gers, D. Legendre [and others] // Chemical Engineering Science. – 2010. – Vol. 65. – P. 2052-2064.
122. Drogemeier, R. Ultra fine grinding in a two stage rotor impact mill / R. Drogemeier, K. Leschonski // International journal of mineral processing. – 1996. – Vol. 44 – 45. – P. 485-495.
123. Duggal, S. K. Building materials / S. K. Duggal. – New Delhi: New Age International Publishers, 2008. – PP. 544.
124. Dvořák, K. The effect of the wear of rotor pins on grinding efficiency in a high-speed disintegrator / K. Dvořák , D. Dolák, D. Paloušek [and others] // Materials science (medžiagotyra). – 2018. – Vol. 24. – №1. – P. 29 – 34.

125. Dvořák, K. Effect of Imposed Shear Strain on Steel Ring Surfaces during Milling in High-Speed Disintegrator / K. Dvořák, A. Machackova, S. Ravaszova [and others] // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(10). – PP. 12.

126. Goljandin, D. Disintegrator as device for milling of mineral ores / D. Goljandin, P. Kulu, H. Kaerdi [and others] // *Materials science (medžiagotyra)*. – 2005. – Vol. 11. – №4. – P. 398 – 402.

127. Inoue, T. Grinding mechanism of centrifugal mills a simulation study based on the discrete element method / T. Inoue, K. Okaya // *International journal of mineral processing*. – 1996. – Vol. 44. P. 425-435.

128. Sidor, J. *Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych* / Jan Sidor, S. Staszica. – Krakow: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2005. – PP. 199.

129. Kashlak, A. B. *Design and analysis of experiments* / A. B. Kashlak // University of Alberta. – 2019. – PP. 95.

130. Kotake, N. Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill / N. Kotake, M. Kuboki, S. Kiya [and others] // *Advanced powder technology*. – 2011. – Vol. 22. – P. 86-92.

131. Kovalev, P. Influence of shock destruction of solid and liquid particles in the supersonic flow around a solid two-phase flow / P. Kovalev // *Journal of applied physics*. – 2008. – Vol. 78. – P. 40-46.

132. Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments* / D. C. Montgomery // John Wiley and Sons, Inc. – 2016. – №8. – PP. 757.

133. Nazarenko, I. Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher / I. Nazarenko, Y. Mishchuk, D. Mishchuk [and others] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 4(7(112)). – P. 41-49.

134. Ravaszova, S. The effect of different grinding technologies on the mechanical properties of portland cement depends on the type of intensifier / S. Ravaszova, K. Dvořák // *Solid State Phenomena*. – 2023. – Vol.352. – P. 103-107.

135. Reichert, Y. The use of MPS vertical roller mills in the production of cement and blast furnace slag powder / Y. Reichert // Cement International. – 2005. – № 2. – P. 64-69.
136. 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.
137. Tamm, B. Impact grinding and disintegrators / B. Tamm, A. Tymanok // Proc. Estonian Acad. Sci. Eng. – 1996. – №2(2). P. 209 – 223.
138. Tümanok, A. Treatment of different materials by disintegrator systems / A. Tümanok, P. Kulu // Proc. Estonian Acad. Sci. Eng. – 1999. – №5(3). – P. 222 – 242.
139. Zerdi, T. Performance of Limestone Powder on Strength Properties as Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete Mix / T. Zerdi, Md Imran, S. Mohammad, M. A. Pasha, T. Zerdi // Indian journal of applied research. – 2016. – №5. – P. 627-629.
140. Завод «Техприбор»: Официальный сайт. – РФ. – URL: <http://www.tpribor.ru>. (Дата обращения: 09.10.2023).
141. ЛитМаш: Официальный сайт. – РФ. – URL: <http://www.lit-mash.ru>. (Дата обращения: 07.06.2024).
142. AUBEMA CRUSHING TECHNOLOGY GmbH: официальный сайт. – Германия. – URL: <http://www.aubema.com>. (Дата обращения: 10.12.2023).
143. Chemical Engineering: официальный сайт. – США. – URL: <http://www.Chemengonline.com> / fine-grinding-with-impact-mills. (дата обращения: 16.05.2024).
144. Hosokawa Micron Powder Systems: официальный сайт. – США. – URL: <http://www.hmicronpowder.com>. (Дата обращения: 08.01.2023).
145. NETZSCH Group: официальный сайт. – Германия. URL: <http://www.netzsch.com>. (дата обращения: 07.02.2024).

Патент на изобретение № 2630936

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2630936

ДЕЗИНТЕГРАТОР

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Семикопенко Игорь Александрович (RU), Горбань Татьяна Леонидовна (RU), Ченцов Александр Евгеньевич (RU), Беляев Денис Александрович (RU), Трофимов Илья Олегович (RU)*

Заявка № 2016121539

Приоритет изобретения 31 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 сентября 2017 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 31 мая 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Патент на изобретение № 2745609

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2745609

ДЕЗИНТЕГРАТОР

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Семикопенко Игорь Александрович (RU), Севостьянов Александр Эдуардович (RU), Бороздин Егор Алексеевич (RU), Беляев Денис Александрович (RU)*

Заявка № 2020134378

Приоритет изобретения 20 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 марта 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 20 октября 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Патент на изобретение № 2840465



**Акт об использовании результатов
диссертационной работы в учебном процессе**

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор

БГТУ им. В. Г. Шухова,

д.т.н., профессор

Е.И. Евтушенко



«29» апр 2026 год

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Беляева Дениса Александровича в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова

Комиссия в составе заведующего кафедрой «Механическое оборудование», к.т.н., доцента Анциферова С.И., к.т.н., профессора Фаина Ю.М., к.т.н., доцента Матусова М.Г. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Беляева Д.А. «Совершенствование процессов измельчения и смешивания материалов в дезинтеграторе с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов» используются в учебном процессе кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке бакалавров по направлению 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», инженеров по специальности 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

Председатель комиссии:

/зав. кафедрой
механического оборудования

С. И. Анциферов

Члены комиссии:

Ю. М. Фадин

М. Г. Матусов

Расчет экономической эффективности предлагаемой конструкции дезинтегратора

Для реализации инвестиционного проекта потребуются инвестиции. В таблице 1 приведены расчетные сведения о потребности предприятия в основных средствах.

Таблица 1 Потребность в ключевых активах

Наименование	Сумма
Инвестиции в основной капитал (новое оборудование), тыс. руб.	800
Затраты на монтаж (10% от стоимости оборудования), тыс. руб.	80
Итого	880

Срок реализации проекта – до 5 лет. Инвестирование будет осуществляться в течении первого года реализации проекта.

Увеличение производительности по готовому продукту (на 14%) приводит к росту годового объема производства кирпича с 1 млн. шт. / год до 1,14 млн. шт. / год. С учетом этого проведем расчет производственной программы предприятия.

Объёмы выпуска готовой продукции по завершении проекта определяются по формуле:

$$B_2 = B_1 \cdot \Delta B \quad (1)$$

где B_1 – базовый выпуск продукции (до внедрения проекта), B_2 – проектный выпуск продукции (после внедрения проекта), ΔB – изменение выпуска продукции.

Величина изменения объёмов производства рассчитывается по формуле:

$$\Delta B = Q_2 \cdot T_{эф2} - Q_1 T_{эф1} \quad (2)$$

где $Q_{1,2}$ – базовая и проектная производительность оборудования, т /час,

$T_{эф 1,2}$ – базовый и проектный эффективный фонд времени работы оборудования, маш. час.

Показатели базового и проектного фондов времени работы оборудования (маш.час.) рассчитываются по формуле:

$$T_{\text{эф}1,2} = K_{\text{эк}1,2} \cdot T_{\text{кал}} \quad (3)$$

где $K_{\text{эк}1,2}$ – базовый и проектный коэффициент экстенсивного использования оборудования, $T_{\text{кал}}$ – календарный фонд времени работы оборудования, маш. час.

$$T_{\text{эф}2} = T_{\text{эф}1} - \Delta T_{\text{эф}} \quad (4)$$

где $\Delta T_{\text{эф}}$ – изменение эффективного фонда времени работы оборудования, маш. час.

Далее представим данные по деятельности оборудования для расчета производственной программы (табл. 2) и рассчитаем производственную программу (табл. 3).

Таблица 2 Исходные данные по деятельности оборудования для расчета производственной программы

Показатели	База	Проект
Часовая производительность оборудования, Q , т/ч	0,8	0,912
Коэффициент экстенсивного использования оборудования, $K_{\text{эк}}$	0,4395	0,439498
Эффективный фонд времени работы оборудования, $T_{\text{эф}}$, маш. час.	3850	3850,00248
Сокращение времени работы оборудования, ΔT , маш. час.		0
Изменение производительности оборудования, ΔQ , т/ч		0,112
Коэффициент перехода (от сырья к продукции)		190,258752
Прирост выпуска продукции, ΔB , т		82039,627

Таблица 3 Производственная программа

Показатели	База	Проект	Отклонение
Объем выпуска, т.	1000000	1082039,627	82039,627
Цена за 1 т, руб.	20	20	0
Выручка. тыс. руб.	20000,000	21640,793	1640,793

Предлагаемое решение приводит к снижению удельных энергозатрат на 12% с 23,9 до 21,3 кВтч / т.

Рассчитаем изменение энергозатрат:

$$\mathcal{E}_m = (Y_{H2} * \mathcal{C}_2 - Y_{H1} * \mathcal{C}_1) \quad (5)$$

где $УН_{1,2}$ – базовая и проектная удельная норма расхода электроэнергии, кВт·ч /т, $Ц_{1,2}$ – базовая и проектная удельная норма расхода электроэнергии, руб./ кВт·ч.

Кроме того, возникнет экономия на условно-постоянных расходах в связи с ростом объемов производства, и изменение в структуре расходов на содержание и эксплуатацию оборудования.

В таблицах 4, 5 приведены факторы, влияющие на себестоимость продукции – кирпича рядового керамического.

Таблица 4 Изменение расходов на содержание и эксплуатацию оборудования

Показатели	Проект
Норма амортизации, %	20
Норма затрат на текущий ремонт, %	5
Норма затрат на эксплуатацию оборудования, %	3
Годовая сумма амортизации, тыс. руб.	271,023
Изменение стоимости основных средств, тыс. руб.	1355,115
Прирост расходов на содержание и эксплуатацию оборудования в результате внедрения мероприятия, тыс. руб.	379,432

Внедрение проекта приводит к изменению материальных затрат.

Таблица 5 Требуемые материальные ресурсы

Тип ресурса	Проект, тыс. руб.
1	2
Сырье и основные материалы	246,119
Природный газ	410,198
Электрическая энергия	-57,366
Итого	598,951

В таблице 6 представлены результаты вычислений, иллюстрирующие суммарное изменение себестоимости кирпича под влиянием комплекса технико-экономических факторов после реализации проекта.

Таблица 6 Калькуляция себестоимости керамического кирпича

Потребности в ресурсах	База		Проект		Отклонение	
	На 1шт., руб.	На весь объем, тыс. руб.	На 1шт., руб.	На весь объем, тыс. руб.	На 1шт., руб.	На весь объем, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7
Сырье и основные материалы	3,00	3000,000	3,00	3246,119	0	246,119

Продолжение таблицы 6

Потребности в ресурсах	База		Проект		Отклонение	
	На 1шт., руб.	На весь объем, тыс. руб.	На 1шт., руб.	На весь объем, тыс. руб.	На 1шт., руб.	На весь объем, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7
Вспомогательные материалы	0,01	12,600	0,01	13,634	0	1,034
Природный газ	5,00	5000,000	5,00	5410,198	0	410,198
Электроэнергия	1,20	1200,000	1,06	1142,634	-0,14	-57,366
Зарплата основных производственных рабочих	2,77	2770,000	2,77	2997,250	0	227,250
Отчисления на социальные нужды	0,83	831,000	0,83	899,175	0	68,175
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	1,50	1500,000	1,74	1500,000	0,24	0
Управленческие расходы	1,30	1300,000	1,20	1300,000	-0,10	0
Коммерческие расходы	0,11	110,000	0,11	110,000	0	0
Итого:	15,72	15723,600	15,71	16619,009	-0,01	895,409

Рассчитаем потребность в оборотных средствах. Расчет проведен с учетом рыночных тенденций и особенностей. Принятой скоростью оборота оборотных средств в размере 10 оборотов.

Совокупный объем инвестиционных вложений, интегрирующий затраты на формирование основного и чистого оборотного капитала, сведен в таблицу 7.

Таблица 7 Полные инвестиционные издержки

Наименование затрат	Значение, тыс. руб.
1	2
Полные инвестиции в основной капитал	880,000
Полный чистый оборотный капитал (прирост)	59,895
Полные инвестиционные издержки	939,895

Таким образом, реализация рассматриваемого проекта требует привлечения дополнительного капитала в размере 939,895 тыс. руб. (с учетом динамики обновления запасов).

В таблице 8 представлен прогнозный отчет о финансовых результатах реализации проекта.

Таблица 8 Прогноз финансовых результатов

Показатели	База	Проект	Отклонение
1	2	3	4
1. Объем продаж, шт.	1000000	1082039,627	82039,627
2. Цена за единицу продукции, тыс. руб.	20	20	0
3. Выручка, тыс. руб.	20000	21640,793	1640,793
4. Полные издержки на производство, тыс. руб.	15723,600	16619,009	895,409
5. Прибыль до налогообложения, тыс. руб.	4276,400	5021,783	745,383
6. Налог на прибыль (25 %), тыс. руб.	1069,100	1255,446	186,346
7. Чистая прибыль, тыс. руб.	3207,300	3766,337	559,037

Анализ целесообразности инвестиций базируется на применении динамических методов, предполагающих дисконтирование денежных потоков (табл. 9). Норма дисконта определена – 16% (с учетом текущей ставки рефинансирования ЦБ, процента инфляции и рисков проекта).

Таблица 9 Дисконтированные денежные потоки проекта

Наименование	Вложение 0 г.	1 г	2 г	3 г	4 г
1					
I. Инвестиционная деятельность					
1. Капитальные вложения, тыс. руб.	939,895				
Итого инвестиций:	-939,895				
II. Операционная деятельность					
1. Прирост объема продаж, тыс. руб.		82039,62667	82039,62667	82039,62667	82039,62667
2. Цена, тыс. руб. за единицу		20	20	20	20
3. Прирост выручки от продажи, тыс. руб.		1640,793	1640,793	1640,793	1640,793
4. Себестоимость дополнительного выпуска, тыс. руб.		895,409	895,409	895,409	895,409
5. Амортизация, тыс. руб.		271,023	271,023	271,023	271,023

Продолжение таблицы 9

Наименование	Вложение 0 г.	1 г	2 г	3 г	4 г
1					
6. Прибыль до н/обложения, тыс. руб.		745,383	745,383	745,383	745,383
7. Налог на прибыль (25 %), тыс. руб.		186,346	186,346	186,346	186,346
8. Чистая прибыль, тыс. руб.		559,037	559,037	559,037	559,037
Чистый приток от операций		830,060	830,060	830,060	830,060
III. Финансовая дея- тельность					
1. Собственный ка- питал, тыс. руб.	939,895				
Итого:	939,895				
Сальдо реальных де- нег, тыс. руб.	0	830,060	830,060	830,060	830,060
Поток реальных де- нег, тыс. руб.	-939,895	830,060	830,060	830,060	830,060
Коэффициент дис- контирования (16%)	1	0,862	0,743	0,641	0,552
Чистый дисконтиро- ванный доход, тыс. руб.	-939,895	715,569	616,870	531,785	458,435
ЧДД нарастающим итогом, тыс. руб.	-939,895	-224,326	392,544	924,329	1382,764

В качестве ключевых критериев для оценки экономической эффективности проекта приняты следующие показатели: интегральный экономический эффект, индекс доходности, внутренняя норма доходности.

Интегральный экономический эффект (NPV, ЧДД) выражает чистый финансовый результат и определяется как разность между суммарными доходами от продаж и суммарными затратами за расчетный период с учетом фактора времени.

$$NPV = \sum (P_n \cdot 1 / (1 + r)^n) - IC, \quad (6)$$

где P_n – годовые денежные поступления в течение n лет;

IC – инвестиции в проект;

r – ставка дисконтирования (16%); n – количество периодов.

$$NPV = 1382,764 \text{ тыс. руб.} > 0, \text{ проект эффективен.}$$

На рисунке 1 представлен финансовый профиль проекта.

Индекс доходности (PI, ИД) – рассчитывается как отношение суммарных приведенных эффектов к величине первоначальных инвестиций.

$$PI = \sum (P_n / (1 + r)^n) / IC \quad (7)$$

В данном случае $PI = 2,47$. Превышение индексом единицы ($PI > 1$) свидетельствует о том, что приведенные результаты превосходят масштаб затраченных ресурсов, подтверждая высокую эффективность проекта.

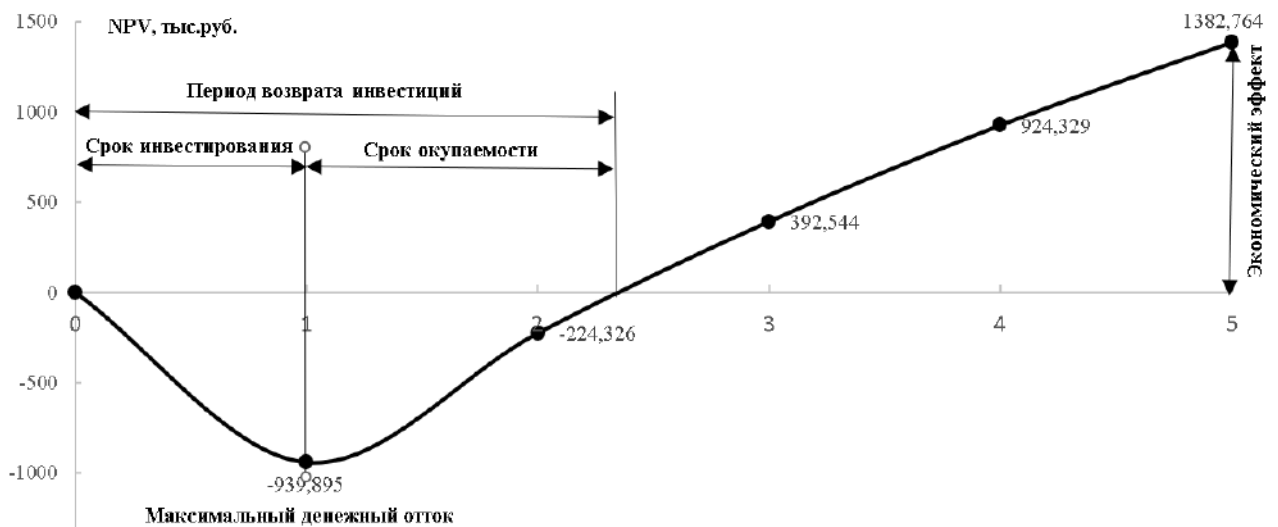


Рисунок 1 Финансовый профиль проекта

Внутренняя норма доходности (IRR) – представляет собой ставку дисконта, при которой интегральный экономический эффект (NPV) обращается в ноль. IRR характеризует относительный уровень платы за использование инвестиций.

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_{r_1}}{NPV_{r_1} - NPV_{r_2}} (r_2 - r_1); \quad (8)$$

где IRR – внутренняя норма доходности, %;

r_1 - действующий коэффициент дисконтирования, %;

NPV_{r_1} - интегральный экономический эффект при действующем коэффициенте дисконтирования, тыс. руб.;

r_2 - программируемый коэффициент дисконтирования, %;

NPV_{r_2} - интегральный экономический эффект при программируемом коэффициенте дисконтирования, тыс. руб.

В таблице 10 отражен расчет внутренней нормы доходности.

Таблица 10 Расчет внутренней нормы доходности (IRR)

Годы	0	1	2	3	4	NPV	IRR
ЧДП/ ставка дисконта	-939,895	830,060	830,060	830,060	830,060		
0%	-939,895	830,060	830,060	830,060	830,060	2380,347	
1%	-939,895	821,842	813,705	805,648	797,672	2298,972	
2%	-939,895	813,785	797,828	782,184	766,848	2220,750	
3%	-939,895	805,884	782,412	759,623	737,498	2145,521	
4%	-939,895	798,135	767,437	737,921	709,539	2073,137	
5%	-939,895	790,534	752,889	717,037	682,893	2003,458	
...	...	...	...	...	...	...	
74%	-939,895	477,046	274,164	157,566	90,555	59,436	
75%	-939,895	474,320	271,040	154,880	88,503	48,848	
76%	-939,895	471,625	267,969	152,255	86,509	38,463	
77%	-939,895	468,961	264,950	149,689	84,570	28,274	
78%	-939,895	466,326	261,981	147,180	82,686	18,278	
79%	-939,895	463,721	259,062	144,727	80,853	8,468	
80%	-939,895	461,145	256,191	142,329	79,071	-1,159	79,88%
81%	-939,895	458,597	253,368	139,983	77,338	-10,609	

На рисунке 2 представлено графическое изображение ВНД (IRR).

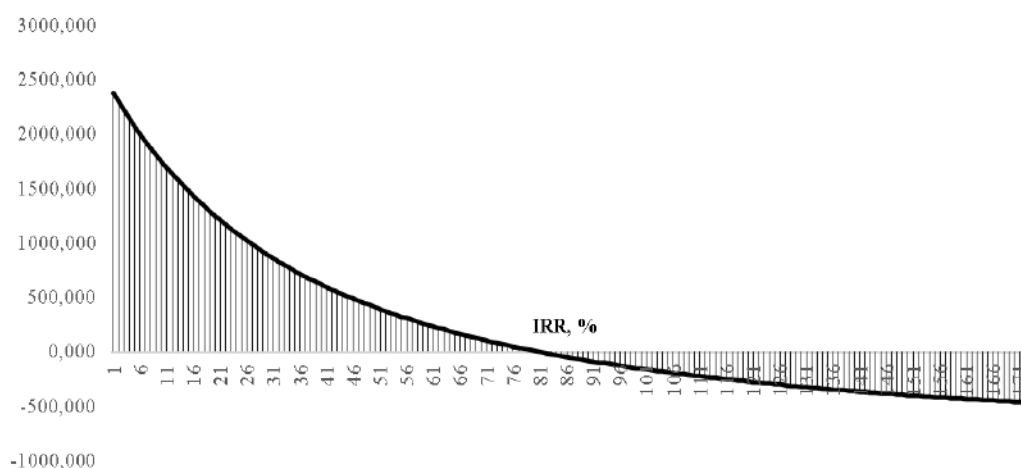


Рисунок 2 Внутренняя норма доходности

Расчетное значение $IRR = 79,88\%$ существенно превышает установленный уровень ставки дисконтирования ($r = 16\%$), что подтверждает высокую финансовую надежность и целесообразность проекта.

Под сроком окупаемости (Ток) принято понимать наименьший временной отрезок с момента старта реализации проекта, по окончании которого интегральный экономический эффект приобретает и стабильно сохраняет положительное значение. Иными словами, данный параметр определяет период, за который полученные результаты полностью компенсируют произведенные затраты.

$$T_{\text{воз}} = t_x + |NPV_t| / NPV_{t+1} \quad (9)$$

где t_x – количество периодов, при которых $NPV < 0$, лет;

NPV_t – значение NPV в t -м периоде;

NPV_{t+1} – значение NPV в следующем ($t + 1$) периоде.

Согласно вычислениям, при заданных временных параметрах проекта ($T_{\text{воз}} = 2,36$ года, $T_{\text{инв}} = 1$ год) итоговый период окупаемости составил:

Ток = 1,36 года.

Оценка конкурентоспособности оборудования осуществляется на основе экспертных заключений (табл. 11) путем сопоставления его характеристик до и после реализации предлагаемого решения.

В качестве оцениваемого оборудования выступают усовершенствованный дезинтегратор (g1) и его базовый аналог (g2).

Таблица 11 Конкурентный лист дезинтегратора

Параметры	Ед. изм	g1	g2	Идеал ↑↓	Kg	a	Kg*a
1	2	3	4	5	6	7	8
Потребительские							
Производительность	т/ч	0,912	0,8	max	1,1400	0,97	1,1058
Надежность (эффективный фонд времени работы оборудования)	маш. час.	3850,00248	3850,00248	max	1,0000	0,97	0,9700
Удельные энергозатраты	кВтч/т	21,3	23,9	min	1,1221	0,8900	0,9986
Коэффициент неоднородности смеси	%	7,2	9,1	min	1,2639	0,9500	1,2007
Экономические							
Цена	тыс. руб./шт.	880,000	880,000	min	1,0000	0,8800	0,8800
Транспортировка	тыс. руб./шт.	80,000	80,000	min	1,0000	0,6000	0,6000
Индекс потребительских параметров							1,0688
Индекс экономических параметров							0,7400
Интегральный коэффициент конкурентоспособности							1,4443
Оценка		Если $K > 1$, то товар конкурентоспособен. Если $K = 1$, то наш товар равен товару конкурента. Если $K < 1$, то товар не конкурентоспособен.					> 1

Коэффициент конкурентоспособности усовершенствованного дезинтегратора составил 1,4443 ($K > 1$).

Оценку конкурентоспособности керамического кирпича, полученного с использованием усовершенствованного дезинтегратора, будем проводить на основании таблицы 5.14 и экономических показателей производства (табл. 12) до предлагаемого решения (g1) и после (g2).

Таблица 12 Конкурентный лист керамического кирпича

Параметры	Ед. изм	g1	g2	Идеал ↑↓	Kg	a	Kg*a
1	2	3	4	5	6	7	8
Потребительские							
Предел прочности при сжатии	МПа	11,7	9,5	max	1,2316	0,84	1,0345
Предел прочности при изгибе	МПа	2,4	1,7	max	1,4118	0,65	0,9177
Фактическая морозостойкость	циклов	69	51	max	1,3529	0,79	1,0688
Водопоглощение	%	7,2	9,6	6	1,3333	0,55	0,7333
Экономические							
Цена	руб./шт.	20	20	min	1,0000	0,7600	0,7600
Индекс потребительских параметров							0,9386
Индекс экономических параметров							0,7600
Интегральный коэффициент конкурентоспособности							1,235
Оценка		Если $K > 1$, то товар конкурентоспособен. Если $K = 1$, то наш товар равен товару конкурента. Если $K < 1$, то товар не конкурентоспособен.					> 1

Вычисленный коэффициент конкурентоспособности керамического кирпича, полученного с использованием усовершенствованного дезинтегратора, составил 1,235 ($K > 1$).

Сравнительный анализ конкурентоспособности усовершенствованного дезинтегратора и керамического кирпича, полученного с его использованием, позволил сделать следующий вывод. Дезинтегратор с периодически изменяющимся расстоянием между рядами ударных элементов обладает явными конкурентными преимуществами перед базовым аналогом благодаря повышению технических и эксплуатационных характеристик. Благодаря применению усовершенствованного дезинтегратора существенно повышаются качественные показате-

тели керамического кирпича, что обеспечивает его превосходство над базовым аналогом и рост конкурентоспособности. В связи с вышесказанным практическое внедрение предлагаемого решения является полностью целесообразным.

Результаты реализации предлагаемого решения сведены в таблицу 13.

Таблица 13 Основные показатели эффективности проекта

Показатели	База	Проект	Отклонение
1	2	3	4
Объем продаж, шт.	1000000	1082039,627	82039,627
Выручка, тыс. руб.	20000	21640,793	1640,793
Прибыль до налогообложения, тыс. руб.	4276,400	5021,783	745,383
Чистая прибыль, тыс. руб.	3207,300	3766,337	559,037
Себестоимость 1 шт. ук, руб.	15,72	15,71	-0,01
Рентабельность 1 шт. ук, %	27,20	27,31	0,11
Интегральный экономический эффект, тыс. руб.		1382,764	
Индекс доходности		2,47	
Срок окупаемости, лет		1,36	
Внутренняя норма доходности, %		79,88	
Интегральный коэффициент конкурентоспособности дезинтегратора		1,4443	
Интегральный коэффициент конкурентоспособности керамического кирпича		1,235	

Реализация проекта характеризуется интегральным эффектом в размере 1382,764 тыс. руб. при индексе доходности равном 2,47, что значительно выше единицы – порогового значения. Величина срока окупаемости составила 1,36 лет, внутренняя норма доходности 79,88%. Снижение себестоимости на 0,01 руб. / шт. приводит к повышению прибыли до налогообложения на 745,383 тыс. руб. и чистой прибыли на 559,037 тыс. руб., увеличивая рентабельность продукции на 0,11 %.

Таким образом, анализ инвестиционной привлекательности и оценка конкурентоспособности усовершенствованного дезинтегратора и керамического кирпича, полученного с его использованием, позволяют сделать вывод об эффективности и экономической целесообразности предлагаемого решения.