

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

На правах рукописи



Сычѳв Евгений Андреевич

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО
ПОПЕРЕЧНОГО И ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФУТЕРОВКИ
С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ
БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Специальность 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, проф.
Богданов В.С.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ.....	13
1.1 Анализ конструкций оборудования для измельчения.	13
1.1.1 Барабанные шаровые мельницы и схемы помола.	13
1.1.2 Вертикальные валковые мельницы.....	17
1.1.3 Кольцевые шаровые мельницы.	18
1.1.4 Барабанные валковые мельницы.....	19
1.1.5 Вертикальные роликово-маятниковые мельницы.....	19
1.2 Направления совершенствования барабанных шаровых мельниц.	20
1.2.1 Футеровки, назначения и направления совершенствования.....	22
1.3 Цифровые технологии в разработке барабанных шаровых мельниц.	28
1.4 Научные и методологические основы проектирования футеровок барабанных шаровых мельниц.	31
1.5 Анализ существующих методов моделирования барабанных шаровых мельниц методом дискретных элементов <i>DEM</i>	32
1.6 Цель и задачи.....	43
1.7 Выводы.....	44
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУТЕРОВКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ШАРОВ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ.....	45
2.1 Определение угла схода шара с выступа футеровки.	45
2.2 Определение кинетических параметров шара в момент схода с выступа футеровки и падения.....	53
2.3 Расчет потребляемой мощности привода барабанной шаровой мельницы.....	56
2.4 Выводы.....	57

3	МЕТОДИКА ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУТЕРОВКИ БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ.....	58
3.1	Основные положения метода дискретных элементов.....	58
3.2	Описание блок-схемы цифрового моделирования.....	59
3.3	План цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы.....	62
3.4	Описание методики цифрового моделирования.....	63
3.5	Результаты цифрового моделирования.	76
3.5.1	Анализ траекторий и скорости движения мелющих тел.	76
3.5.2	Анализ потребляемой мощности привода лабораторной барабанной шаровой мельницы.....	89
3.5.3	Анализ износа футеровки барабанной шаровой мельницы.	97
3.5.4	Анализ эффективности измельчения в барабанной шаровой мельнице.....	104
3.5.5	Исследование влияния продольного профиля футеровки на режимы работы мелющей загрузки.....	108
3.6	Выводы.....	112
4	ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ.....	115
4.1	Цель и задачи экспериментальных исследований.....	115
4.2	Описание лабораторной установки барабанной шаровой мельницы и контрольно-измерительного оборудования.	117
4.3	Характеристика измельчаемого материала.	123
4.4	План и программа проведения экспериментальных исследований.	123
4.5	Обоснование выбора функций отклика и основных факторов экспериментальных исследований.	128
4.6	Выводы.....	130

5 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ.....	131
5.1 Сравнительный анализ режимов работы мелющей загрузки.....	132
5.2 Анализ характера износа футеровки барабанной шаровой мельницы.....	139
5.3 Исследование влияния основных факторов на потребляемую мощность привода.....	140
5.4 Исследование влияния основных факторов на остаток на сите №008.....	145
5.5 Исследование влияния основных факторов на удельный расход энергии на измельчение.....	148
5.6 Определение рациональных режимов работы лабораторной барабанной шаровой мельницы.....	151
5.7 Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований.....	155
5.8 Выводы.....	156
6 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	158
6.1 Апробация результатов работы на АО «Спасскцемент».....	158
6.2 Техничко-экономическая эффективность внедрения результатов работы в промышленности.....	168
6.3 Внедрение результатов работы в учебный процесс.....	169
6.4 Алгоритм проектирования футеровки барабанной шаровой мельницы.....	169
6.5 Выводы.....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	171
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	176
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	189
Приложение 1	189

Приложение 2	191
Приложение 3	192
Приложение 4	194
Приложение 5	198

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время промышленность производства строительных материалов и изделий является одной из лидирующих отраслей экономики Российской Федерации. Основным процессом в цементной промышленности является измельчение, на которое затрачивается более 60% электроэнергии. Наиболее энергоемким процессом является помол сырьевых материалов и клинкера. При помоле материалов на отечественных предприятиях используются барабанные шаровые мельницы (БШМ), которые обладают рядом существенных недостатков.

Наиболее существенными недостатками БШМ являются повышенный удельный расход энергии, высокий износ футеровки и мелющей загрузки. Вместе с тем в промышленных условиях дальнейшее масштабное применение данных агрегатов обусловлено простотой конструкции, возможностью регулирования тонины помола готового продукта в широком диапазоне, возможностью автоматизации процесса измельчения [1].

При применении барабанных шаровых мельниц для помола сырьевых материалов и цементного клинкера, основные энергозатраты зависят от видов внутренних энергообменных устройств, к которым относятся футеровки, межкамерные перегородки, классифицирующие устройства. В этой связи, более выгодно разработать рациональные варианты и комбинации внутренних энергообменных устройств, обеспечивающих оптимальные режимы помола, сбережение измельчающей среды и снижение энергопотребления.

Снижение энергопотребления является одним из приоритетных направлений развития науки, техники и технологий Российской Федерации в соответствии с Указом Президента от 07.07.2011 г. № 899, в том числе и в промышленности строительных материалов.

При этом, существенное снижение затрат на разработку новых или модернизацию существующих конструкций БШМ оказывают современные методы и подходы к проектированию данного вида оборудования. В этой связи, наиболее перспективными технологиями разработки и модернизации БШМ являются технологии цифрового проектирования, позволяющие выполнять разработку

цифровых двойников трубных шаровых мельниц (ТШМ). Данный подход является основой инновационного развития внутреннего рынка Российской Федерации и позволяет реализовать переход к цифровым технологиям и новым способам конструирования трубных шаровых мельниц. Это в полной мере соответствует указу Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642.

Степень разработанности темы исследования.

В ходе выполнения диссертационной работы использовались научные труды отечественных и зарубежных ученых, в работах которых отражены проблематика и вопросы разработки футеровок БШМ и совершенствования процесса измельчения. Указанным научным направлением занимались ученые: Крюков Д.К., Неронов Н.П., Журавлев П.А., Захаревич А.Ф., Андреев С.Е., Богданов В.С., Хахалев П.А., Вердиян М.А., Акунов В.И., Дуда В., Олевский В.А., Дэвис Э.В., Бонд Ф., Старк Х., Tano K., Voemer D., Wang M., Cleary P.W., Morrison Rob D., Jayasundara S.T., Zhu H.P., Yaoyu Li, Yang You, Dazhao Gou, Lei Xua, Kun Luo, Yongzhi Zhao, Pedrayes F., Norniella J. G., Melero M. G. и другие.

Научные работы ученых способствовали расширению знаний в области проектирования футеровок для барабанных шаровых мельниц. Однако, в настоящее время, недостаточно проработан вопрос разработки футеровок БШМ с учетом влияния различных факторов на срок их эксплуатации и эффективность процесса измельчения. В последние годы для разрешения подобных проблемных задач широкую популярность находит цифровое моделирование на основе метода дискретных элементов.

Объектом исследования является барабанная шаровая мельница для измельчения сырьевых материалов и цементного клинкера.

Предметом исследования является процесс измельчения материала в барабанной шаровой мельнице с различными вариантами исполнения футеровки.

Цель работы: разработка метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.

Задачи исследования:

1. Провести анализ техники и технологии в области измельчения, существующих конструкций футеровок и направлений повышения эффективности их использования.
2. Изучить существующие технические решения и подходы, а также методы проектирования футеровок барабанных шаровых мельниц и исследования режимов работы мелющей загрузки.
3. Разработать математическую модель расчета энергетических и кинематических параметров мелющей загрузки.
4. Осуществить многовариантное цифровое моделирование поперечного и продольного профиля футеровки и определить рациональные режимы работы мелющей загрузки.
5. Разработать метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.
6. Разработать план и провести экспериментальные исследования процесса измельчения на лабораторной барабанной шаровой мельнице. Получить уравнения регрессии описывающие зависимости выходных показателей: потребляемой мощности привода, остатка на сите №008, характеризующего тонкость помола готового продукта, удельного расхода энергии от исследуемых факторов.
7. Установить рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы.
8. Разработать технические рекомендации по внедрению методов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанных шаровых мельниц с вариативным исполнением футеровки и определить их экономическую эффективность.

Соответствие диссертации паспорту специальности:

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.21 по областям исследования:

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

8. Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации.

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

Научная новизна заключается в получении:

– адекватных математических моделей, описывающих кинематические, динамические и энергетические режимы работы мелющих тел с учетом параметров футеровки в поперечном и продольном сечении барабана мельницы, размера и массы мелющих тел, при которых достигается максимальная эффективность процесса измельчения;

– метода цифрового моделирования футеровки на основе цифровых двойников с использованием *CAD/CAM/CAE*-систем, позволяющего получить детализированный профиль футеровки и схем ее установки на рабочей поверхности барабана мельницы;

– метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования, который позволяет снизить временные затраты на разработку новых конструкций мельниц и модернизацию существующих;

– результатов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки и установлении влияния варьируемых параметров на траектории движения и скоростные параметры мелющих тел, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки;

– цифровых двойников барабанных шаровых мельниц с многовариантным исполнением профиля футеровки, применяемых для проведения цифрового моделирования и обладающих высокой степенью адекватности, зарегистрированных как программный продукт для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– разработаны математические выражения, позволяющие определить энергетические и кинематические параметры мелющей загрузки с учетом геометрических параметров профиля футеровки;

– разработан метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования, позволяющий определить режимы работы мелющей загрузки, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки, а также эффективность измельчения;

– на основании проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований выполнена верификация результатов исследования режимов работы мелющей загрузки. Получены адекватные цифровые модели режимов работы мелющей загрузки, подтверждающие целесообразность использования разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки в условиях реального производства;

– реализована производственная апробация результатов научной работы на предприятии АО «Спасскцемент» в рамках исследования различных режимов работы мелющей загрузки трубной шаровой мельницы для помола сырьевых материалов клинкера;

– результаты работы используются в образовательном процессе кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке обучающихся по направлениям 15.03.02-22 «Компьютерные технологии проектирования оборудования предприятий строительных материалов» и 15.05.01-24 «Проектирование технологических машин и комплексов».

Методы исследования:

В диссертационной работе использовались методы цифрового моделирования, математического анализа и статистики, многофакторного планирования эксперимента ПФЭ ЦКРП-2⁴, физического и цифрового моделирования, лабораторного эксперимента, сравнения экспериментальных и теоретических результатов, визуального наблюдения.

Автор защищает следующие положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические уравнения для расчета кинематических и энергетических параметров мелющей загрузки с учетом параметров выступа футеровки, размера и массы мелющих тел.

2. Метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки в поперечном и продольном сечении барабана мельницы на основе цифрового моделирования, позволяющий определить траектории движения и скоростные параметры мелющей загрузки, потребляемую мощность привода, характер и форму износа футеровки.

3. Результаты цифрового моделирования и экспериментальных исследований, определяющих изменение потребляемой мощности привода, остатка на сите, удельного расхода энергии в зависимости от конструктивно-технологических параметров лабораторной установки барабанной шаровой мельницы.

4. Алгоритм проектирования футеровки барабанной шаровой мельницы на основе цифрового моделирования.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы соответствует предъявляемым требованиям и обоснована применением точных контрольно-измерительных и вычислительных приборов, высокопроизводительных вычислительных графических станций, основополагающих принципов и законов. Подтверждена высокой степенью соответствия теоретических расчетов с результатами цифрового моделирования, а также экспериментальными данными, и положительным результатом

промышленной апробации метода цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы.

Апробация работы:

Диссертационная работа выполнялась в БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках государственного задания (№FZWN-2024-0006 «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников»). Результаты диссертационной работы рассмотрены и одобрены на заседании кафедры механического оборудования БГТУ им. В.Г. Шухова.

Основные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: XVII Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство (г. Белгород, 30-31 октября 2025 г.), IV Национальной конференции «Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии» (г. Белгород, 10 июня 2023 г.).

Публикации:

По результатам работы опубликовано 15 статей, в том числе 4 в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 11 статей в научных журналах, индексируемых в РИНЦ. Получено 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Структура и объем работы: Работа выполнена на 198 стр., содержит 6 глав, 129 рисунков, 12 таблиц, 113 формул, 110 источников литературы, 5 приложений на 10 стр.

1 СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

В настоящее время благодаря внедрению современных информационных технологий и технологий проектирования оборудования на промышленных предприятиях наблюдается тенденция постоянного совершенствования техники и технологии тонкого измельчения.

1.1 Анализ конструкций оборудования для измельчения.

1.1.1 Барабанные шаровые мельницы и схемы помола.

На сегодняшний день основным оборудованием по размолу материала на цементном заводе остаются барабанные шаровые мельницы.

Измельчение материалов в подобных мельницах осуществляется по открытому и по замкнутому способу. Способ измельчения материала влияет на характеристики оборудования, а именно: производительность мельницы и удельный расход электроэнергии.

Основной частью барабанной шаровой мельницы (рис. 1.1) является цилиндрический пустотелый корпус 1, расположенный горизонтально. По торцам корпус закрыт литыми стальными загрузочным 2 и разгрузочным 3 днищами. Центральные части этих днищ образуют полые цапфы, которые служат опорой для корпуса на подшипниках [2].

Схема работы по открытому способу (рис. 1.1), заключается в однократном прохождении материала через мельницу. Весь размолотый материал выходит из разгрузочного конца мельницы в виде готового продукта.

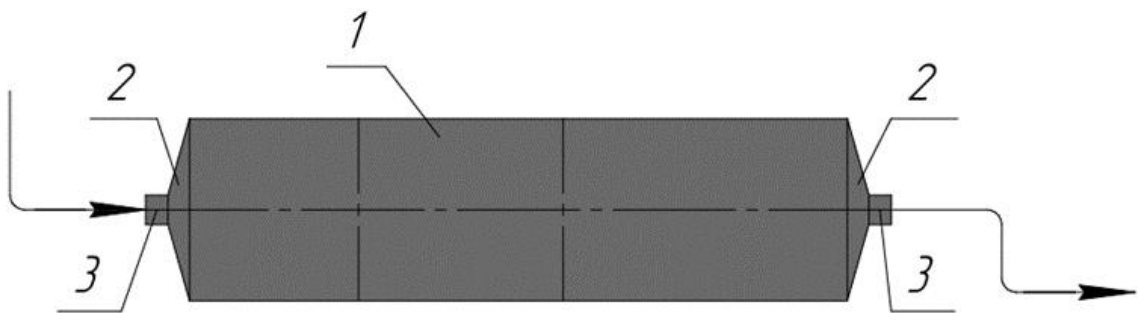


Рисунок 1.1 – Схема работы мельницы по открытому способу:

1 – цилиндрический пустотелый корпус; 2 – литое стальное загрузочное днище;

3 – литое стальное разгрузочное днище

У мельниц открытого способа отсутствуют устройства, направленные на классификацию конечного продукта, отправляющие материал на повторный домол, что и обуславливает простоту конструкции. Это не позволяет получить цемент с высокой удельной поверхностью без снижения производительности мельницы [2].

Замкнутый способ характеризуется, выходом материала из мельницы в виде промежуточного продукта с удельной поверхностью около $250 \text{ м}^2/\text{кг}$, который разделяется в сепараторах на готовый продукт и крупку, которая подвергается доизмельчению, совершая от трех до шести циклов.

При замкнутом способе (рис. 1.2) измельчаемый материал продвигается от загрузочного конца барабанной шаровой мельницы 1 к разгрузочному концу, откуда подается в элеватор 2. Элеватором 2 материал транспортируется в сепаратор 3, в котором происходит разделение на две фракции: тонкую – готовый продукт и крупку. Из сепаратора готовая продукция направляется в склад, а крупка возвращается обратно в мельницу, где вновь подвергается помолу с новой порцией материала [2].

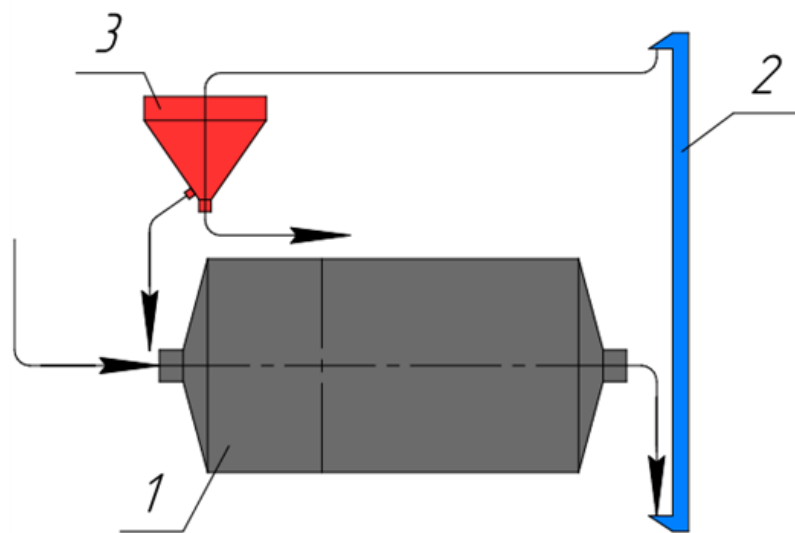


Рисунок 1.2 – Схема работы мельницы по замкнутому способу:

1 – загрузочный конец мельницы; 2 – элеватор; 3 – сепаратор

При работе мельницы по замкнутой схеме (рис. 1.3), размалываемый материал перемещается от загрузочного конца мельницы до средней ее части, где через отверстия в корпусе, материал выгружается на элеватор 2 и транспортируется

в сепаратор 3. В данной схеме работы мельницы крупка из сепаратора поступает на повторное измельчение не через загрузочный конец, а с противоположной стороны, двигаясь навстречу вновь поступившему материалу [2].

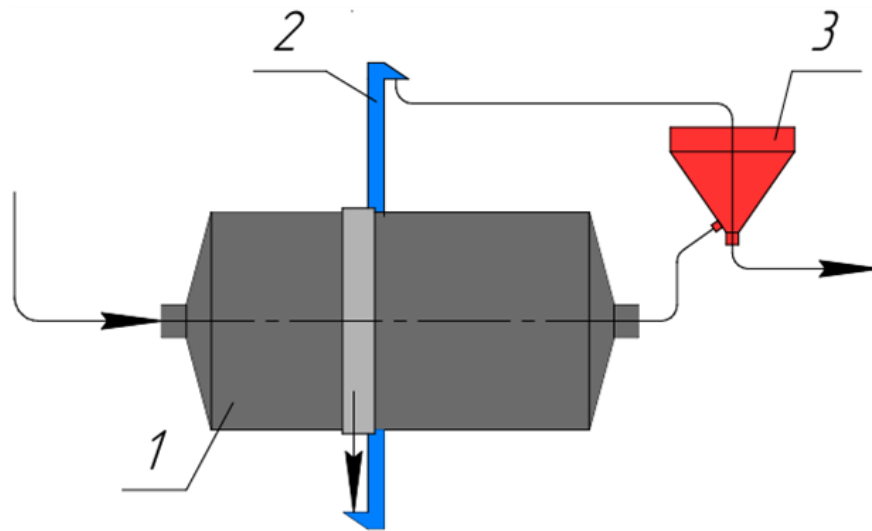


Рисунок 1.3 – Схема работы мельницы по замкнутому способу:

1 – загрузочный конец мельницы; 2 – элеватор; 3 – сепаратор

Тонкость помола цемента определяется его удельной поверхностью, которая при производстве цемента составляет более $300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Затраты энергии для мельницы производительностью 80 т/ч. с электродвигателем мощностью 3200 кВт энергопотребление будет составлять более $40 \text{ кВт} \cdot \text{т/ч}$.

Основным и наиболее распространенным оборудованием для измельчения на территории РФ являются барабанные шаровые мельницы. Проектирование, изготовление и поставку барабанных шаровых мельниц осуществляют следующие производители:

1. «*FL Smidth*» (Дания);
2. «*KHD Humboldt Wedag*» (Германия);
3. «*Krupp Polisiaus*»;
4. «*Christian Pfeiffer*» (Германия);
5. АО «Волгоцеммаш» (Россия);
6. «*Sinoma*» (Китай).

Трубные шаровые мельницы производства компании «*FL Smidth*» [3] применяются в цементной, горнорудной и других отраслях промышленности (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Барабанная шаровая мельница «*FL Smidth*»

Данные мельницы оборудованы межкамерной перегородкой, разделяющей барабан мельницы на камеры грубого и тонкого помола. Корпус данных мельниц опирается на сегментные подшипники скольжения. Отличительной особенностью данных мельниц является отсутствие торцевых крышек с цапфами и применение периферийного привода [3].

Барабанные шаровые мельницы компании «*Christian Pfeiffer*» применяются в цементной промышленности для мокрого и сухого измельчения (рис. 1.5). Барабан данных мельниц опирается на сегментные подшипники скольжения [4].

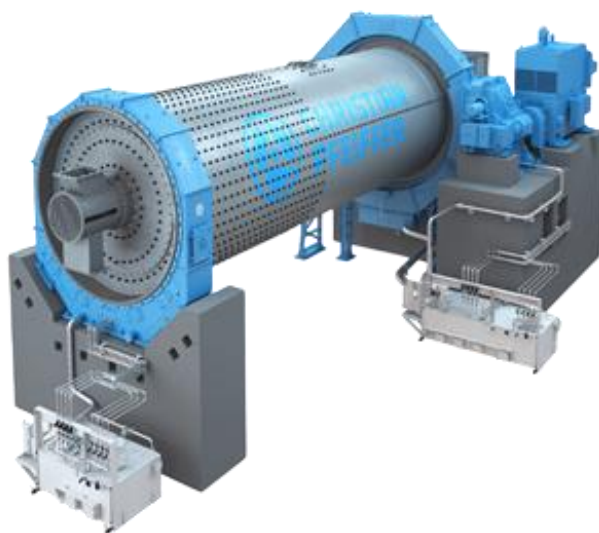


Рисунок 1.5 – Барабанная шаровая мельница «*Christian Pfeiffer*»

Барабанные шаровые мельницы «*KHD Humboldt Wedag*» оснащены периферийным приводом и оборудованы корпусом, опирающимся на сегментные

подшипники. Компания активно занимается проектированием оборудования для предприятий цементной промышленности [5].

Компания АО «Волгоцеммаш» представляет довольно широкий выбор барабанных шаровых мельниц различных типоразмеров. Кроме этого, компания предоставляет инженеринговый консалтинг, благодаря чему идет постоянное повышение качества продукции.

1.1.2 Вертикальные валковые мельницы.

За рубежом для измельчения сырьевых компонентов различной размалываемости при производстве цемента по сухому способу большое распространение получили вертикальные валковые мельницы [2, 7].

Измельчение осуществляется раздавливанием и истиранием материала между вращающимся размольным столом и валками. Процесс помола при этом совмещен с сушкой и классификацией материала. Энергопотребление вертикальных валковых мельниц при помоле клинкера и добавок составляет примерно 28-35 кВт·ч/т [2, 7].

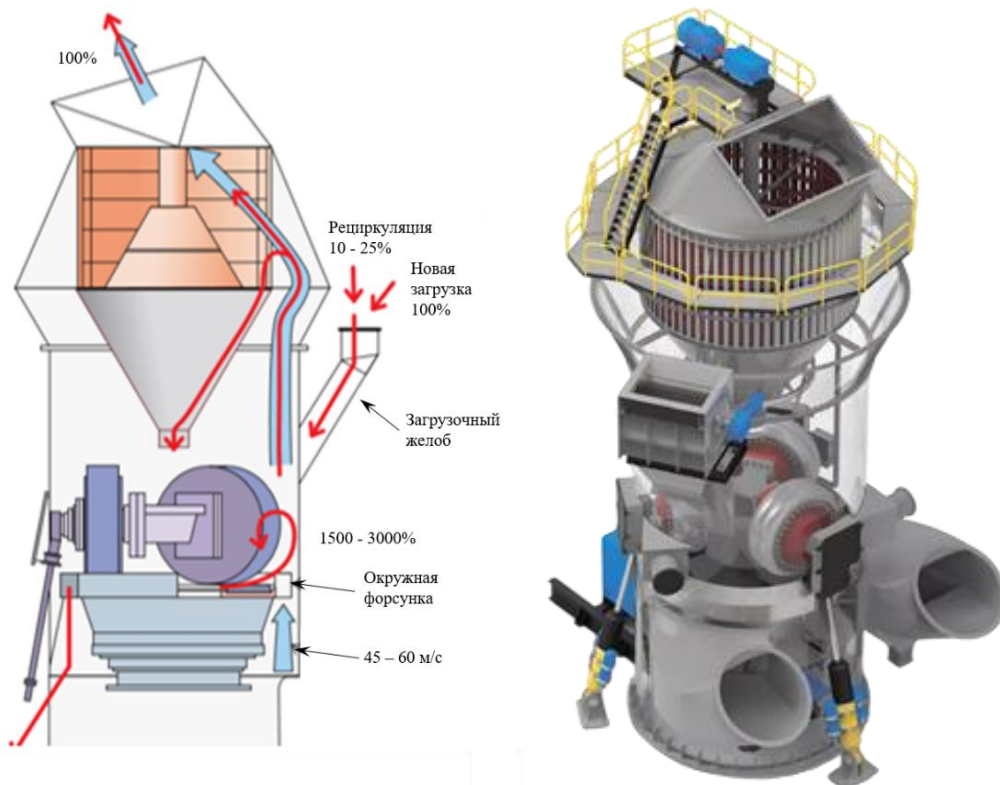


Рисунок 1.6 – Конструкция вертикально-валковой мельницы АТОХ

Современной конструкцией сырьевой вертикальной валковой мельницы является мельница «АТОХ» (рис. 1.6), которая обладает компактностью и

надежностью. Современной конструкцией сырьевой вертикальной валковой мельницы является мельница «АТОХ» (рис. 1.6), к достоинствам которой можно отнести компактность, длительный срок службы, высокую эффективность разделения, простое обслуживание, удобное управление и высокую гибкость [8].

1.1.3 Кольцевые шаровые мельницы.

В мельницах «Claudius Peters» типа «EM» (рис. 1.7) процессы помола, сушки, сепарации и транспортировки происходят в одной компактной конструкции. Диапазон производительности мельниц «EM» составляет от 10 до 120 т/ч, поставляется 12 моделей мельниц типа «EM». Их преимущества заключаются в простоте конструкции и надежности [9].

Узел помола данных мельниц сконструирован по принципу упорного шарикоподшипника большого размера [7]. В то время как мелющие ролики роликовых мельниц закреплены жестко, шары в мельнице «EM» свободно перемещаются между мелющими тарелками.

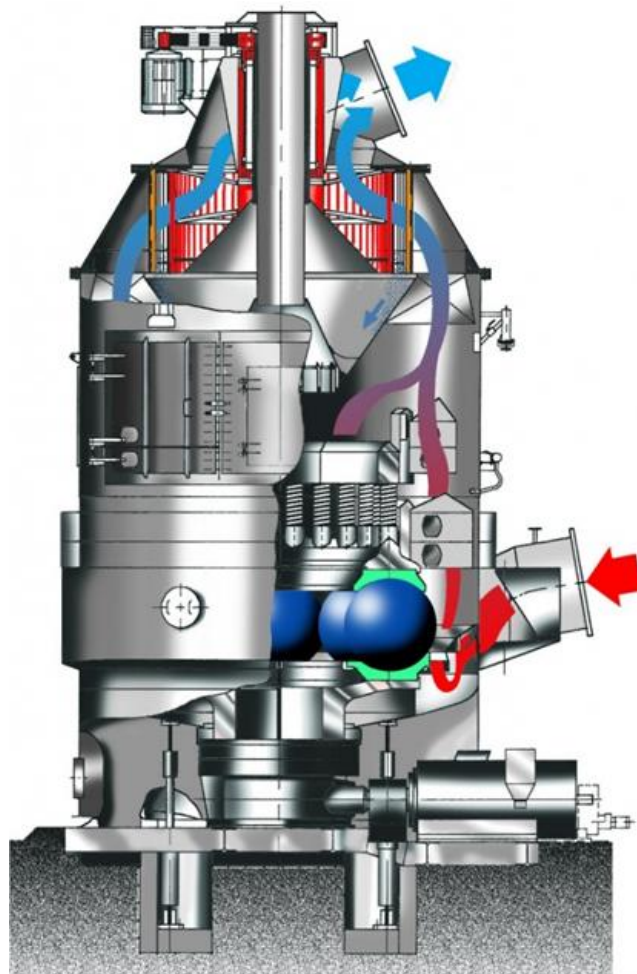


Рисунок 1.7 – Тарельчато-шаровая мельница

1.1.4 Барабанные валковые мельницы.

Принципиально новой конструкцией мельниц являются барабанные валковые мельницы, отличительной особенностью которых являются отсутствие мелющих тел, а измельчение слоя материала производится на внутренней поверхности барабана с помощью роллера (валка) [10].

Барабан мельницы, схематически представленной на рисунке 1.8, опирается на гидродинамические подшипники скольжения и имеет периферийный привод. Материал, поступая в мельницу, центрифугируется и раздавливается вращающимся роллером. Скребки срезают деформированный материал со стенки барабана, который, перемешиваясь, попадает на наклонную плиту-регулятор скорости. Плита направляет поток на следующий этап измельчения, каждый с давлением 40-100 МПа. После этого измельченный материал попадает в сепаратор. Недомолотый продукт возвращается из сепаратора на повторный помол.

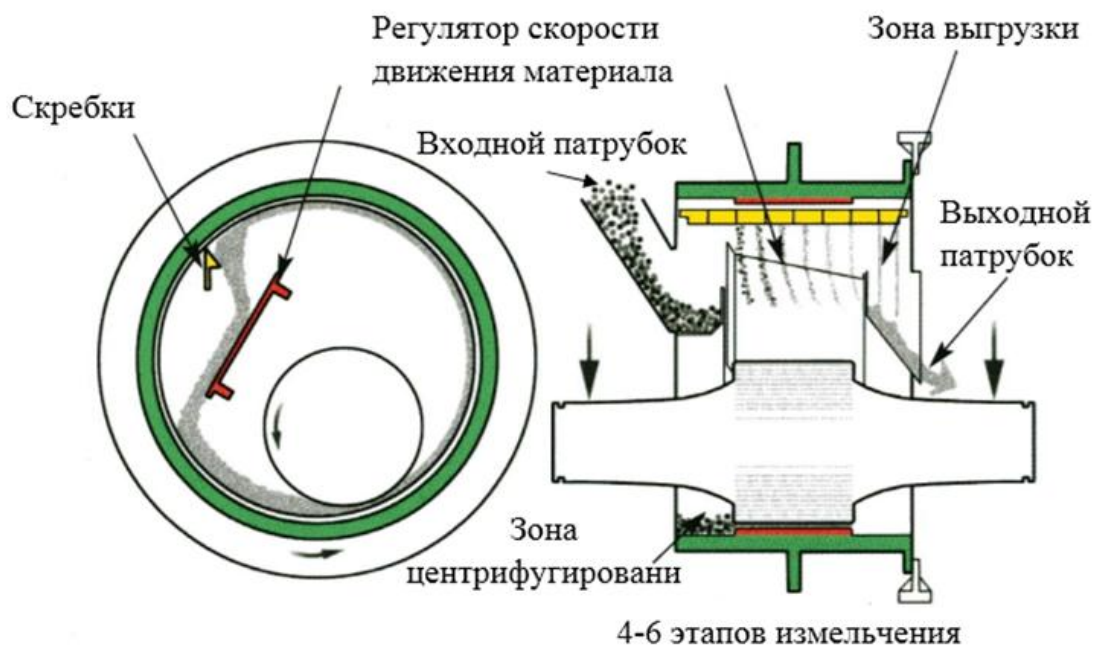


Рисунок 1.8 – Барабанная валковая мельница

Энергопотребление барабанно-валковых мельниц для помола клинкера и добавок может достигать значения порядка 25-28 кВт·ч/т [10].

1.1.5 Вертикальные роликово-маятниковые мельницы.

Вертикальная роликово-маятниковая мельница – промышленная установка (рис. 1.9), которая характеризуется широким диапазоном уровней измельчения [7].



Рисунок 1.9 – Вертикальная роlikово-маятниковая мельница

Используется для сверхтонкого помола пигментов и наполнителей разной влажности, размолоспособности и твердости. Данная мельница позволяет совместить в себе на одном этапе обработки: функции измельчения, классификации и предварительной сушки сырья при необходимости [7]. За один этап работы мельницы на выходе можно получить частицы размером до 15 мкм при начальном размере до 50 мкм [7]. Применение данных мельниц считается рациональным при измельчении материала твердостью от шести по шкале Мооса.

1.2 Направления совершенствования барабанных шаровых мельниц.

Одним из основных направлений развития барабанных шаровых мельниц является увеличение габаритов вновь вводимых в эксплуатацию мельниц. Самая большая отечественная мельница, предназначенная для помола цемента, имеет диаметр 5 м и длину барабана 16,5 м, установочная мощность привода 4000 кВт, производительность 200 т/ч. Опыт эксплуатации доказано, что с увеличением габаритных размеров мельниц капитальные затраты на строительство снижаются на 25-30%, однако эксплуатационные расходы на содержание возрастают на 15-20%.

В свою очередь увеличение размеров помольных агрегатов формирует следующие недостатки, свойственные крупногабаритным барабанным шаровым мельницам:

- усложнение конструкции узлов помольных агрегатов;
- увеличение доли дорогостоящих материалов;
- усложнение транспортировки узлов мельницы к месту ее эксплуатации;
- ухудшение условий работы (шум, вибрация и др.);
- повышенные требования к точности изготовления, монтажу узлов и деталей, необходимость применения сложной пусковой аппаратуры;
- возможность возникновения при остановках скачков нагрузок в электрической цепи, которые могут привести к выходу из строя дорогостоящей электроаппаратуры.

Следующим направлением совершенствования барабанных шаровых мельниц является разработка новых конструкций внутримельничных устройств. Известно, что только 45% мелющих тел в барабанной мельнице активно участвуют в процессе измельчения, остальные 55% перемещаются в плотном компактном слое в центральной части загрузки, образуя застойные зоны, препятствующие продольному перемещению измельчаемого материала в направлении разгрузки. Интенсифицировать работу измельчения в барабанных мельницах возможно за счет создания условий, обеспечивающих разрушение застойных зон в загрузке, что может быть достигнуто за счет специальной конструкции внутримельничных устройств, обеспечивающих режим поперечно-продольного движения мелющих тел. За время эксплуатации барабанных шаровых мельниц вследствие износа, заменяются внутримельничные устройства: футеровка, межкамерные перегородки, выходные решетки, мелющие тела. В ходе модернизации мельницы переоснащались, в них устанавливались современные бронеплиты с оптимизированной геометрией, загружались износостойкие мелющие тела, устанавливались регулируемые межкамерные перегородки.

В последнее время прослеживается устойчивая тенденция к исключению цапфовых опор из проектных решений перспективных конструкций барабанных шаровых мельниц. Основной причиной такого отказа служат значительные энергозатраты, обусловленные высокими потерями мощности на преодоление сил трения скольжения в указанных узлах. Альтернативой выступают бандажные опоры, базирующиеся на башмаках подшипников скольжения гидродинамического типа, что позволяет существенно снизить потери энергии и повысить общую эффективность помольного агрегата.

С целью оптимизации процесса измельчения в барабанных шаровых мельницах получила распространение двухстадийная схема измельчения. На первой стадии шихта измельчается в пресс-валках до размера – 5 мм, подается в сепаратор, где выделяются частицы готового продукта размером менее 80 мкм, а крупка направляется в барабанную шаровую мельницу для финишного помола. При такой схеме удельный расход энергии снижается до 30%, а полученный цемент отличается высокими потребительскими свойствами.

1.2.1 Футеровки, назначения и направления совершенствования.

Функциональным назначением футеровки является предотвращение износа корпуса мельницы и обеспечение требуемого режима работы мелющей загрузки [11].

При проектировании новых типов футеровок для барабанных шаровых мельниц к их конструкции предъявляют ряд технических требований:

- достижение высокой технологичности производственных операций при изготовлении футеровок;
- унификация типоразмерных рядов и крепежных элементов;
- обеспечение эргономичности и ремонтпригодности конструкции футеровки на этапах монтажа и ремонтно-восстановительных работ;
- минимизация абразивного износа рабочей поверхности футеровки.

При определении рационального поперечного профиля футеровки учитывают внутренний диаметр корпуса мельницы, размер и ассортимент мелющих тел, рациональный режим работы мелющей загрузки, а также размер

измельчаемого материала и частоту вращения. Общепринято классифицировать футеровки по размеру и поперечному профилю [2, 11].

К широко распространенным типам футеровок обычно относят одноволновые (рис. 1.10, а) и двухволновые профили футеровок (рис. 1.10, б), которые обеспечивают водопадный режим работы мелющей загрузки в первой камере мельницы. Каскадный профиль (рис. 1.10, в) футеровки применяют во второй камере мельниц для обеспечения каскадного режима работы мелющей загрузки.

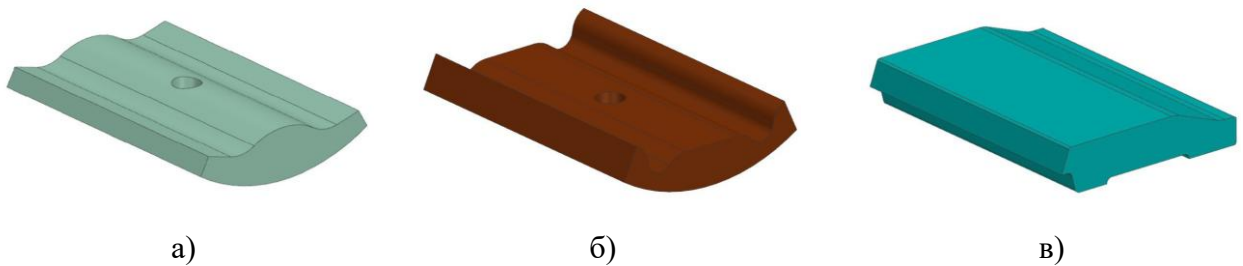


Рисунок 1.10 – Футеровка барабанных шаровых мельниц:

а – одноволновая; б – двухволновая; в – каскадная

Блочный профиль (рис. 1.11, а) футеровки является довольно массивным, при этом более долговечным, обычно такой профиль применяется в камере грубого помола. Футеровки с подъемной планкой (рис. 1.11, б) коэффициент сцепления с мелющими телами увеличивается, в результате чего они используются при водопадном режиме, который используется в первой камере для грубого помола. Унифицированный профиль (рис. 1.11, в) футеровки благодаря своей форме позволяет использовать его в обеих камерах мельницы и при разных режимах работы, как при водопадном, так и при каскадном режиме, что упрощает техническое обслуживание мельницы.

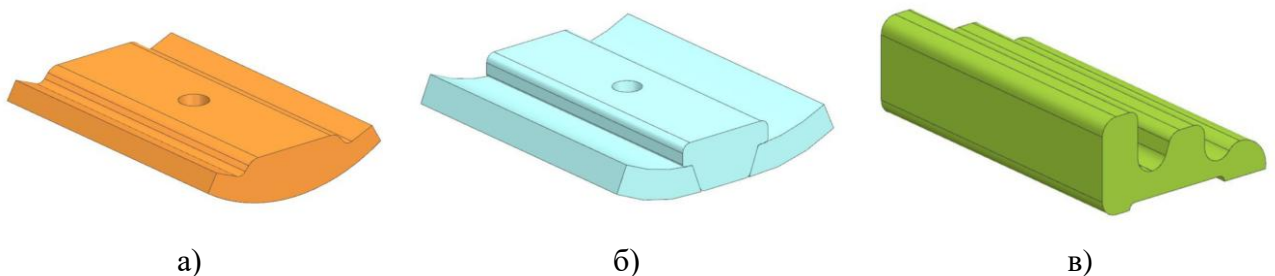


Рисунок 1.11 – Футеровка барабанных шаровых мельниц:

а – блочная; б – с подъемной планкой; в – унифицированная

Плоские футеровки (рис. 1.12, а) являются довольно простыми и применяются в камерах для тонкого помола. Ступенчатая футеровки (рис. 1.12, в) применяется в камере грубого помола. С целью обеспечения классификации мелющих тел по барабану мельницы в продольном направлении применяются классифицирующие цилиндрические самосортирующие футеровки полочного типа (рис. 1.12, б).

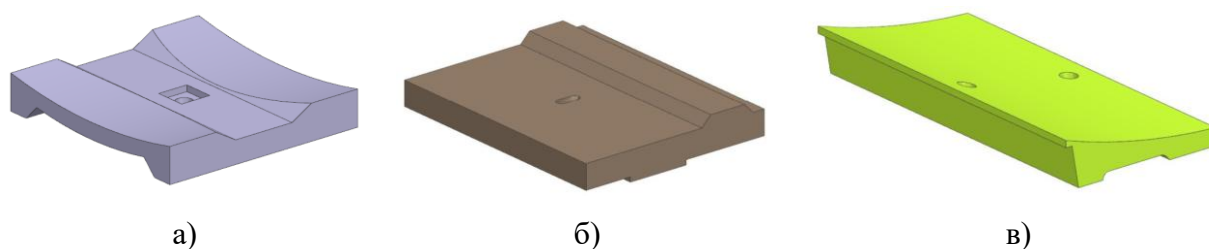


Рисунок 1.12 – Футеровка барабанных шаровых мельниц:

а – плоская; б – цилиндрическая полочного типа из стального проката; в – ступенчатая

Каблучковая футеровка (рис. 1.13, а) обеспечивает подъем материала в шаровых барабанных мельницах и используется для самоизмельчения материала [12, 13]. В свою очередь конусно-ступенчатый профиль футеровки (рис. 1.13, б) помогает с сортировкой материала. Резиновая футеровка (1.13, в) является износостойким материалом, помогающим защитить от абразивного и агрессивного воздействия материала на оборудование, позволяют поглощать шум и вибрации, обладают меньшим весом. Такие плиты часто применяются при мокром измельчении.

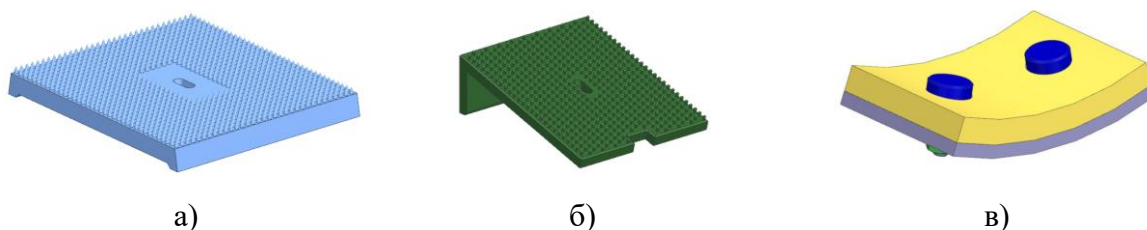


Рисунок 1.13 – Футеровка барабанных шаровых мельниц:

а – каблучковая обыкновенная; б – конусно-ступенчатая с каблучковой поверхностью;

в – резиновая

На сырьевых и цементных мельницах устанавливаются футеровки следующих отечественных и зарубежных производителей:

1. ЗАО «ТД «Кварц» (г. Железногорск);
2. ООО «ЗЛЗ-Метапласт» (г. Златоуст);

3. «*FLSmidth*» (Дания);
4. «*Christian Pfeiffer*» (Германия);
5. «*Metso*» (Финляндия);
6. «*Estanda*» (Испания);
7. «*Korfez ENG*» (Германия).

Для цементных барабанных шаровых мельниц диаметром от 2 до 4,2 м занимается разработкой и производством футеровок более 20 лет ЗАО ТД «Кварц». С целью разработки новых профилей футеровок в компании применяются современные методы численного моделирования режимов работы мелющей загрузки.

Одним из лидеров рынка по производству футеровок (рис. 1.14) для сырьевых и цементных трубных шаровых мельниц является ООО «ЗЛЗ-Метапласт» [14]. Отличительной особенностью футеровок разрабатываемых данной компании является наличие унифицированного профиля, обеспечивающего постоянный коэффициент сцепления с шаровой загрузкой.



Рисунок 1.14 – Виды футеровок, выпускаемых на «ЗЛЗ-Метапласт»:

- а – футеровочная плита камеры грубого помола;
- б – футеровочная плита камеры тонкого помола

Компания «*FLSmidth*» применяет двухкамерные цементные мельницы, первая камера которых футеруется ступенчатыми футеровками, обеспечивающими водопадный режим работы мелющей загрузки для осуществления грубого помола. Вторая камера барабанной шаровой мельницы футеруется плитами с рифленой поверхностью, обеспечивающей поглощение энергии, эффективное измельчение и самосортировку мелющих тел [2, 15, 16].

В цементной промышленности широкое применение нашли футеровки компании «*Christian Pfeiffer*» (рис. 1.15), обладающие оптимизированным профилем и новым видом крепления к барабану [17].



Рисунок 1.15 – Футеровки барабанных шаровых мельниц производства компании «*Christian Pfeiffer*»:
а – 1-й камеры; б – 2-й камеры

Компания «*Christian Pfeiffer*» применяет для камер грубого помола барабанных шаровых мельниц инновационный профиль (рис. 1.15, а), обеспечивающий подъем мелющих тел выше, создавая оптимальную энергию для удара в камере грубого помола. Вторая камера футеруется плитами с волнообразным профилем (рис. 1.15, б). Такое решение позволяет удерживать шары большего диаметра в начале, а меньшего ближе к концу измельчения, что является оптимальным решением для применения в камерах тонкого помола. Оптимизированный профиль футеровок «*Christian Pfeiffer*» (рис. 1.16) обладает постоянной высотой выступа [18] за весь период эксплуатации.



Рисунок 1.16 – Постоянство высоты выступа футеровки компании «*Christian Pfeiffer*»

Для исследования процесса измельчения и режимов работы мелющей загрузки в компании «*Metso*» используются высокоточные симуляторы «*HFS*» [19, 20], позволяющие разработать перспективные профили футеровок.

Футеровки компании «Estanda» изготавливаются из широкой номенклатуры сплавов и применяются в первой и во второй камерах трубных шаровых мельниц (рис. 1.17). Срок эксплуатации футеровки может достигать 80000 ч [18].



Рисунок 1.17 – Футеровки от компании «Estanda»:

а – футеровка для подъема мелющих тел; б – футеровка для классификации мелющих тел

Компания «KORFEZ ENG» занимается производством футеровочных плит (рис. 1.18) для шаровых барабанных мельниц, применяемых в цементной и горнодобывающей отраслях, с 2011 года [18]. В компании успешно занимаются разработками классифицирующих футеровочных плит с содержанием 27% хрома для второй камеры цементных мельниц.

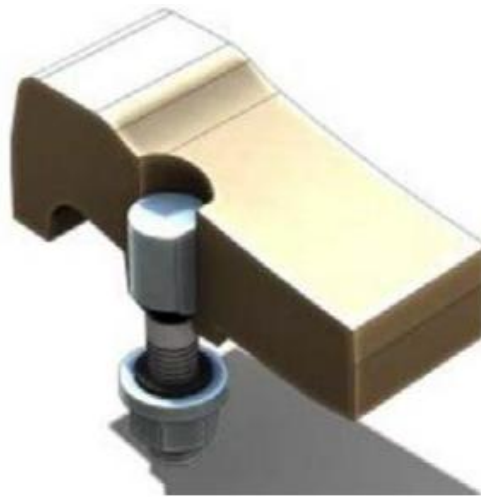


Рисунок 1.18 – Футеровка первой камеры барабанной шаровой мельницы производства «Korfez ENG»

Таким образом, выполненный анализ существующих конструктивных исполнений футеровок барабанных шаровых мельниц и их производителей позволяет сделать вывод о том, что проектирование новых профилей футеровок представляет собой нетривиальную и актуальную задачу. Ее решение сопряжено с необходимостью комплексного учета широкого спектра технологических

факторов, определяющих режимы работы мелющей загрузки и, как следствие, энергоэффективность процесса измельчения.

1.3 Цифровые технологии в разработке барабанных шаровых мельниц.

В настоящее время в различных отраслях промышленности, в частности, в цементной и горнодобывающей промышленности внедряются современные технологии цифровизации.

Цифровые технологии, внедряемые в цементной и горнодобывающей промышленности, трансформируют разработку и эксплуатацию оборудования, повышая его эффективность, снижая расход энергии и минимизируя простои. Основными цифровыми технологиями, применяемыми в промышленности, являются компьютерное моделирование, цифровые двойники, системы управления на базе искусственного интеллекта и сенсоров, а также анализ данных в режиме реального времени.

Большое внимание уделяется созданию цифровых двойников помольного оборудования, в частности, барабанных шаровых мельниц.

Цифровой двойник – это виртуальная копия физического актива, процесса или системы, которая используется для моделирования его поведения и работы в виртуальной среде [21]. Применение цифрового двойника позволяет виртуально тестировать работу барабанных шаровых мельниц, изучать физические процессы, производительность, критические нагрузки и вероятность выхода из строя. Создание цифрового двойника барабанной шаровой мельницы, обладающего высокой степенью адекватности реальному объекту, тесно связано с применением компьютерного моделирования на основе численных методов, в частности, метода дискретных элементов *DEM*.

Применение метода дискретных элементов в общем случае позволяет [22]:

- установить оптимальные режимы работы мельницы;
- увеличить энергоэффективность процессов измельчения;
- прогнозировать износ футеровки и мелющих тел;
- снизить вероятность появления запредельных и аварийных нагрузок;

– получать информацию состояния наиболее нагруженных узлов и элементов мельницы, чтобы предотвратить аварийные поломки.

Модели можно разбить на такие категории, как:

1. Дискретные модели (частично опытные и численные), позволяющие рассматривать взаимодействие мелющей загрузки в барабанной шаровой мельнице. В основе дискретных моделей применяется метод дискретных элементов (*DEM*), позволяющий рассматривать траектории отдельных тел, силы контакта, скорость столкновений. При *DEM* моделировании используются программные пакеты: *EDEM*, *Rocky DEM*, *LIGGGHTS* [23].

2. Континуальные модели (непрерывные), позволяющие рассматривать шаровую загрузку не как отдельные тела, а как псевдожидкость (вязкую массу). В основе континуальных моделей заложено уравнение Навье-Стокса и законы реологии. Данные модели представляются в разных вариантах в зависимости от точности и сложности (модель Розена, модели на основе уравнений движения среды с учетом трения и вязкости).

3. Смешанные модели, которые группируются на:

– смешанная модель *FEM+DEM*, объединяющая расчет напряженно-деформированного состояния конструкций оборудования с учетом воздействия движения сыпучей среды (модель К.К. Торнтон, модель *Cundall & Strack*);

– смешанная модель *DEM+Breakage Models.*, интегрирующая модель измельчения в метод дискретных элементов (например, *Tavares model*), позволяющая учитывать изменение размера частиц в процессе измельчения [23];

– смешанная модель *CFD-DEM*, позволяющая проводить моделирование процессов, протекающих в оборудовании при наличии жидкой фазы, например, мельниц мокрого самоизмельчения, вследствие чего учитывается движение твердой и жидкой среды.

Для моделирования режимов работы мелющей загрузки барабанных шаровых мельниц широкое применение нашли *DEM* и гибридные модели (*CFD-DEM*, *FEM-DEM*) [24].

В настоящей работе представлен процесс создания цифрового двойника трубной шаровой мельницы $\text{Ø}4 \times 13,5$ м (рис. 1.19) с применением численного моделирования на основе метода дискретных элементов.

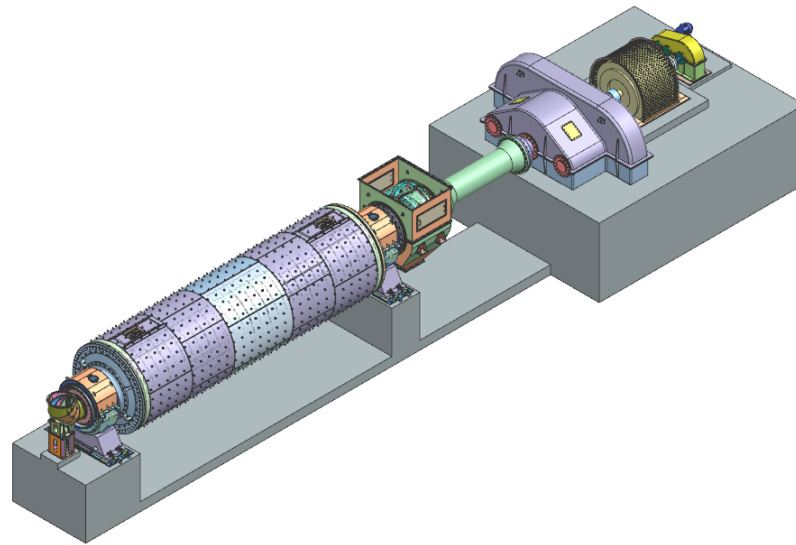


Рисунок 1.19 – Цифровой двойник трубной шаровой мельницы $\text{Ø}4 \times 13,5$ м

Создание цифрового двойника трубной шаровой мельницы является трудоемким процессом, требующим разработки математических моделей расчета кинематических и энергетических параметров мелющей загрузки, современных методов цифрового моделирования поперечного и продольного профиля футеровки, и проведение экспериментальных исследований с целью верификации результатов численного моделирования.

В соответствии с ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» целью создания цифрового двойника является выполнение технических и тактико-технических требований к изделию, снижение себестоимости и сроков разработки опытных образцов изделия, повышение технологичности изделия, а также повышение надежности и эффективности эксплуатации изделия [25]. Достижение данной цели становится возможным благодаря применению цифрового моделирования, в ходе которого осуществляется проведение множества цифровых испытаний, за счет чего сокращается количество натуральных (нецифровых) испытаний. За счет этого сокращаются экономические затраты на производство опытных образцов изделий и сроки выхода изделия на рынок.

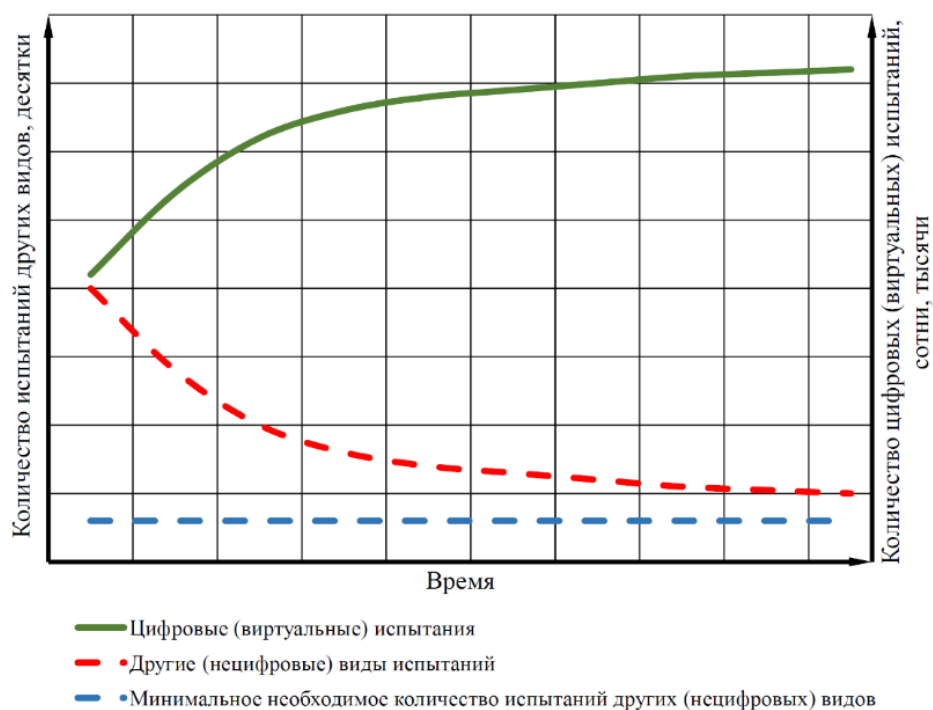


Рисунок 1.20 – График снижения объемов испытаний за счет проведения достаточного количества цифровых (виртуальных) испытаний [25]

На рисунке 1.20 представлен график, иллюстрирующий снижение объемов десятков необходимых испытаний изделия за счет проведения достаточного количества цифровых (виртуальных) испытаний, которые составляют сотни или тысячи, в зависимости от технической сложности изделия.

Таким образом, применение цифрового моделирования позволяет сократить экономические затраты на производство изделия и его модернизацию.

1.4 Научные и методологические основы проектирования футеровок барабанных шаровых мельниц.

К футеровкам, применяемым в сырьевых и цементных мельницах, предъявляют различные требования, основными из которых являются:

1. Высокая износостойкость, необходимая для повышения срока службы футеровки и увеличения коэффициента использования мельниц. Это требование связано с необходимостью защиты корпуса мельницы от ударного воздействия и истирания.

2. Геометрические размеры футеровки не должны превышать размеров внутренних диаметров цапф и люков, расположенных на корпусе мельницы. При этом, чрезмерное уменьшение размеров футеровки влечет за собой возрастание их

количества и, следовательно, увеличение количества отверстий в корпусе для их крепления, что существенно снижает прочность корпуса.

3. Сохранение поперечного профиля футеровки при работе мельницы, то есть обеспечение равномерного износа поперечного профиля футеровки.

4. Высокая прочность крепления футеровки к корпусу, препятствующая отрыву плиты от корпуса.

5. Плотность прилегания футеровки к корпусу, препятствующая пропуску пылевидного или полужидкого материала через отверстия в корпусе.

6. Обеспечение водопадного или каскадного режимов работы в первой и во второй камере барабанной шаровой мельницы.

1.5 Анализ существующих методов моделирования барабанных шаровых мельниц методом дискретных элементов *DEM*.

С развитием методов численного моделирования процессов поведения сыпучих сред большую популярность в научной среде приобрели исследования режимов работы мелющей загрузки барабанных шаровых мельниц (рис. 1.21), износа футеровки и подбора рациональных параметров.

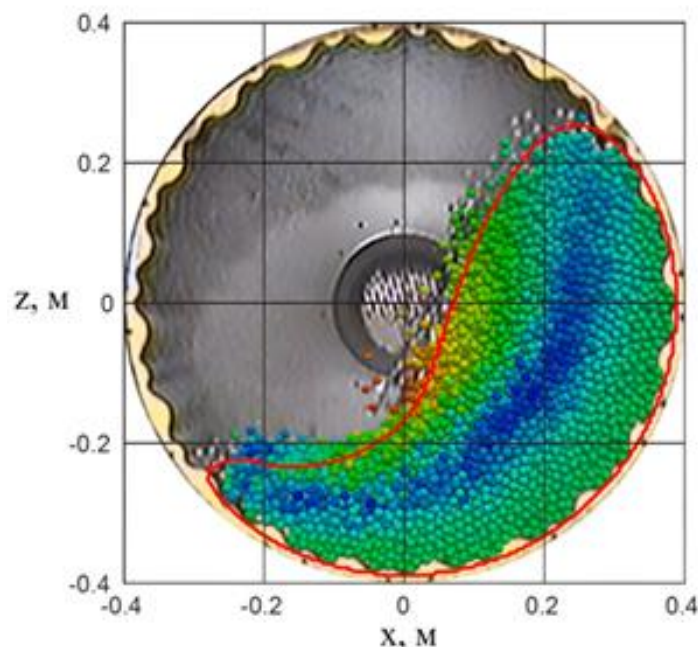


Рисунок 1.21 – Поперечное сечение барабанной шаровой мельницы [26]

В исследовании, упомянутом в [26], приведен метод прогнозирования движения мелющей загрузки и потребляемой мощности привода барабанной

шаровой мельницы с применением метода дискретных элементов. Приведенный вычислительный метод описан как замена необходимым экспериментальным испытаниям, для снижения сроков исследования мелющей загрузки. На основе данного метода разработан процесс прогнозирования распределения износа и постепенного изменения формы футеровки, который подтвержден данными реального профиля износа футеровки корпуса на примере первой камеры цементной мельницы диаметром 5,8 м, собранными «*Magotteaux International S.A.*» в течение десятилетий эксплуатации барабанных шаровых мельниц [26]. Кроме этого, в работе анализ изменения профиля износа футеровки выполнялся без учета осевых изменений. Авторами определены дальнейшие направления исследования в области моделирования режимов работы барабанной шаровой мельницы и прогнозирования профиля износа футеровки, к которым отнесены:

- разработка более эффективных решателей на основе метода дискретных элементов с целью их применения при решении промышленных задач и снижения времени вычислений;
- изучение влияния параметров геометрии и граничных условий имитационных моделей (размер фасетов геометрической модели, количество шагов продолжительности расчета, торцевые стенки с трением) на динамику износа футеровки;
- изучение последствий износа футеровки для оптимизации их конструкции и определения влияния износа на мощность мельницы, высоту подъема мелющих тел и срок службы футеровки.

В работе [27] рассмотрена имитационная модель процесса тонкого измельчения в лабораторной барабанной шаровой мельнице (рис. 1.22) с применением программного обеспечения, основанного на методе дискретных элементов. В настоящее время практически любые исследования режимов работы барабанных шаровых мельниц основаны на исследовании движения мелющей загрузки и анализе ее взаимодействия с конструкцией мельницы, что раньше было связано с невозможностью включения в имитационную модель большого

количества частиц измельчаемого сырья из-за небольшой вычислительной мощности персональных компьютеров.

В настоящее время стало возможным выполнять моделирование процесса измельчения с учетом мелющей загрузки и частиц материала, что предоставляет возможность определить влияние частиц материала на шаровую загрузку и наоборот. Исследование выполняется с варьированием заполнения объема пор в шаровой загрузке частицами материала от 0% до 150%. В ходе исследований определено число столкновений частиц материала с шаровой загрузкой, что использовано для оценки степени разрушения и использованием модели разрушения *JKMRC*. Определено, что рациональным значением для обеспечения процесса измельчения является 100% заполнение пустот шаровой загрузке, снижение или увеличение процента заполнения пустот в шаровой загрузке приводит к снижению эффективности измельчения [27].

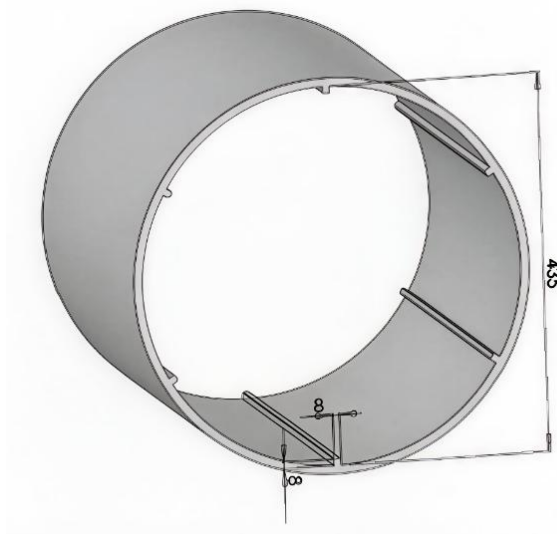


Рисунок 1.22 – Модель барабанной шаровой мельницы диаметром 0,5 м [26]

В работе [28] проведено исследование режимов работы мелющей загрузки с применением численного моделирования (рис. 1.23), основанного на методе дискретных элементов, при различных размерах барабанной шаровой мельницы. Модель была проверена путем сравнения результатов моделирования режимов работы мелющей загрузки и потребляемой мощности с результатами измерений на лабораторной мельнице того же масштаба. Был проведен подробный анализ энергии удара частиц при различных условиях эксплуатации [28]. Результаты

показали, что энергия удара зависит от условий эксплуатации мельницы и может быть связана со скоростью измельчения данного материала [28].

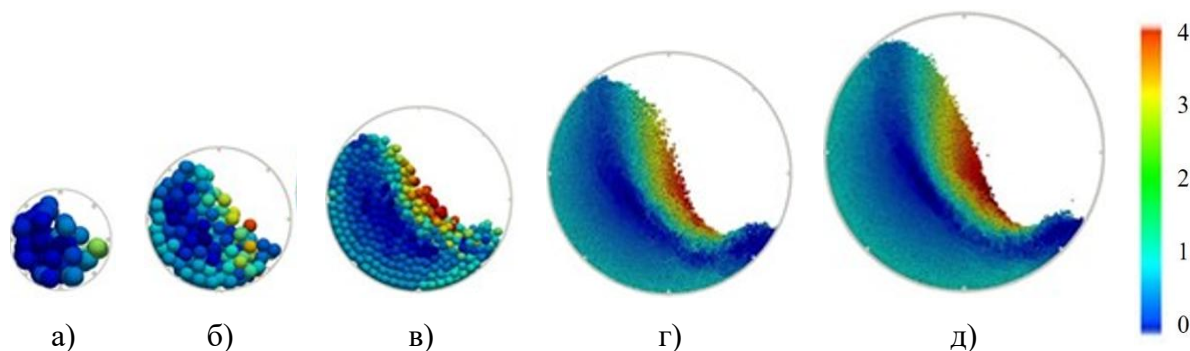


Рисунок 1.23 – Схемы движения в барабанных шаровых мельницах различных размеров при диаметре шаров 25,4 мм [28]:

а – 127 мм; б – 254 мм; в – 508 мм; г – 2000 мм; д – 3000 мм

Кроме того, была предложена система машинного обучения, основанная на данных, для прогнозирования энергии удара при различных условиях эксплуатации. Было обнаружено, что прогнозирование для мельниц диаметром 2000 мм и 3000 мм на основе обучающей модели, разработанной для мельниц диаметром менее 254 мм, может быть выполнено с точностью 80% и коэффициентом корреляции 0,9. Благодаря сочетанию моделирования *DEM* и благодаря подходу, основанному на данных, время вычислений, необходимое для определения энергии удара на крупномасштабных мельницах, может быть значительно сокращено.

В работах [29, 30] исследуется процесс измельчения в барабанных шаровых мельницах (рис. 1.24) с использованием метода дискретных элементов (*DEM*). Бинарные частицы используются для обозначения мелющих шаров и измельчаемых материалов. Исследованы три вида энергии: энергия столкновения, затрачиваемая энергия и максимальная энергия удара, которые связаны с разрушением частиц. Благодаря сопоставлению информации об энергии с моделями баланса массы, прогнозируется изменение размера продукта в зависимости от времени измельчения, а результаты сравниваются с ожидаемыми экспериментальными данными из литературы.

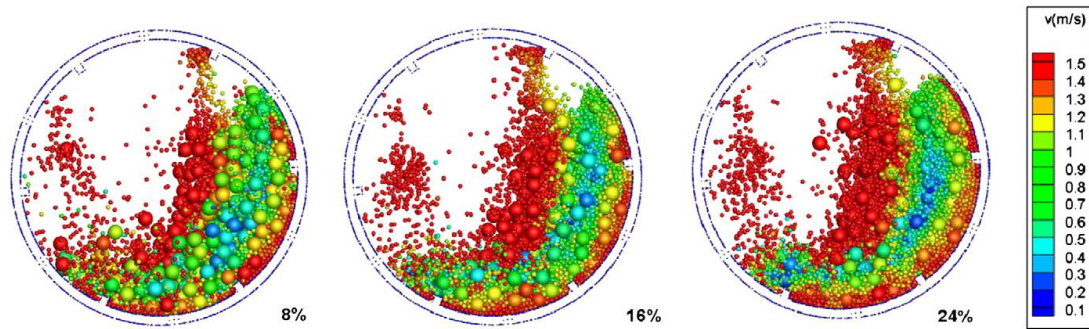


Рисунок 1.24 – Поток частиц в мельнице

при различной загрузке мелющих шаров $n=36$ об/мин [29]

Результаты показывают, что энергия столкновения напрямую влияет на разрушение частиц и позволяет достаточно точно предсказать размер продукта без корректировки. Две другие энергии также могут быть использованы для прогнозирования размера, но функция выбора должна быть тщательно откалибрована. Также исследуется влияние условий эксплуатации, таких как скорость вращения барабана мельницы на силу удара мелющих тел об измельчаемый материал [29].

Значительные энергетические затухания в ходе исследования возникают в области «пяты» материала из-за сильных столкновений шаров и частиц материала. Разрушение частиц материала возникает вследствие контакта частиц материала с шарами. Хотя количество контактов частиц с шариками было на порядок меньше, чем контактов частиц друг с другом, общая энергия демпфирования частиц с шарами составляла до 70% от эффективной энергии демпфирования при разрушении частиц, поскольку энергия демпфирования каждого контакта частиц с шарами в среднем была на порядок больше, чем другие формы контактов. Выявлено что, более высокая загрузка частиц уменьшает движение шаров, что приводит к менее динамичному потоку и снижению скорости измельчения [29].

Кроме этого, авторами сделан вывод о возможности применения мельниц большего диаметра ввиду их большей эффективности при измельчении, поскольку частицы поднимаются выше и обладают большей кинетической энергией.

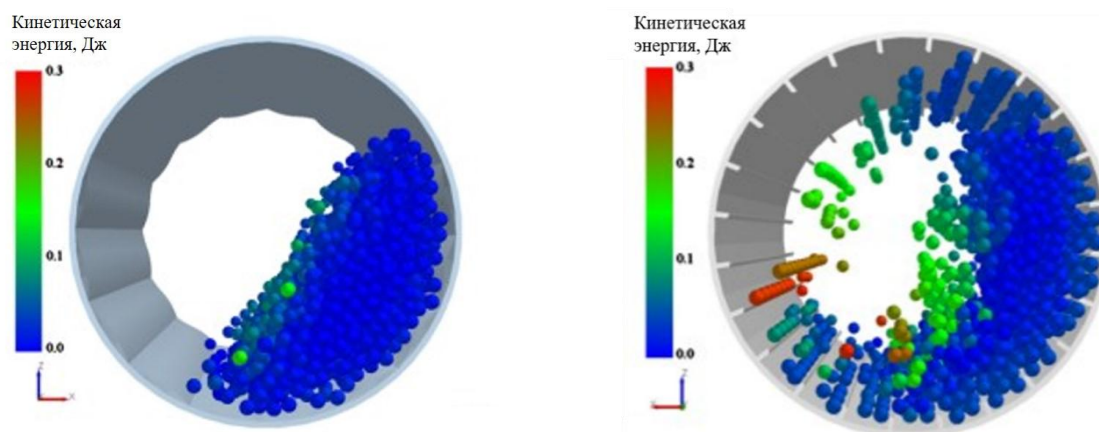


Рисунок 1.25 – Математическое моделирование влияния конструкции футеровки на мельницу диаметром 0,6 м, работающую на скорости 68% от критической, с 30% заполнением керамическими и стальными мелющими телами диаметром 25 мм [31]

В работе [31] приводятся результаты испытаний периодического измельчения для определения влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на процесс шарового измельчения (рис. 1.25). С использованием данных этого моделирования были рассчитаны показатели разрушения первого порядка, которые были использованы для изучения влияния параметров эксплуатации и проектирования переменных при измельчении. Тенденции, предсказанные с помощью механистической модели, в целом согласуются с эмпирическими моделями. Также была обнаружена хорошая корреляция между моделируемыми удельными коэффициентами измельчения и удельной мощностью мельницы.

В работах [32-37] рассматривается концепция использования многомерных статистических методов в моделировании технологических данных, полученных при добыче полезных ископаемых. Описана применяемая система датчиков, а также наиболее распространенные методы измерения характеристик нагрузки на мельницу. Было показано, что датчик в сочетании с методами моделирования способен определять положение материала внутри мельницы и обеспечивает расширенные знания о движении материала и его влияния на производительность измельчения.

Реализованный новый метод представляет собой новый подход. Также выполняется моделирование процесса и дальнейшее сравнение между реальными и прогнозируемыми отклонениями на качественной основе. Результаты этой части

работы показывают, что их можно использовать при проектировании профилей футеровки, где используются гибкие материалы.

В работе [38] представлено математическое и численное исследование разрушения частиц в процессе измельчения в барабанных шаровых мельницах. Эксперименты по периодическому измельчению генерируют макроинформацию о разрушении частиц при измельчении. Затем для прогнозирования производительности измельчения использовался обратный метод расчета. Численные исследования, основанные на методе дискретных элементов (*DEM*) [38], позволили получить микромасштабную информацию о процессе измельчения, которую невозможно получить из физических экспериментов. Было проведено моделирование бинарных частиц в барабанных шаровых мельницах. Были проанализированы различные формы энергии, энергия столкновения, энергия рассеивания и максимальная энергия удара. Связывая энергию измельченных порошков с методом создания виртуальных представлений систем *PBM* (*Physics-Based Modeling*), были предсказаны распределения продукта по размерам при различных условиях. Было замечено, что энергия столкновения между крупными и мелкими частицами может быть использована непосредственно для прогнозирования размеров продукта. С другой стороны, для двух других энергий требуется регулируемый параметр, который необходимо откалибровать. На основе информации об энергии столкновения, влияния скорости вращения мельницы, было исследовано влияние нагрузок на мелющие тела и измельчаемый материалы на производительность мельницы [38].

В работе [39] описана разработанная структура, основанная на модели баланса (*PBM*), для исследования непрерывного измельчения в барабанных шаровых мельницах. Платформа смогла предсказать распределение частиц по размерам (*PSD*) путем объединения информации, полученной в результате моделирования и полученной в результате физических экспериментов [39].

Также было исследовано влияние конструктивных параметров, таких как количество выступов, форма выступа, размер шара и размер частиц. При увеличении размера шара энергия столкновения увеличивалась, а среднее время

выдержки сокращалось. Однако размер продукта уменьшался с увеличением размера шара, что указывает на то, что оптимальная производительность измельчения может быть достигнута за счет балансировки времени пребывания и энергии столкновения. С другой стороны, исследование показало, что количество выступов и их форма имели оптимальные значения, которые должны быть точно рассчитаны на основе других переменных. Сделаны выводы о необходимости разработки модели для прогнозирования непрерывного уменьшения размера частиц внутри барабанных шаровых мельниц.

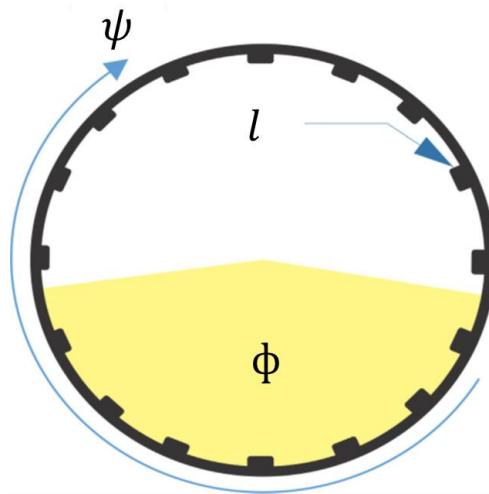


Рисунок 1.26 – Поперечное сечение мельницы [39]

В работе [40] приведено, что все условия работы мельницы приводят к изменениям в распределении энергии столкновения внутри загрузки (рис. 1.26). Все остальные рабочие параметры мельницы снижают ударный износ и повышают эффективность измельчения благодаря уменьшению высоты подъема, увеличению уровня заполнения шихты и уменьшению соотношения материалов и мелющих тел в загрузке [40].

В работе [41] изучено влияние формы частиц на износ футеровки в барабанной мельнице (рис. 1.27). Были использованы три несферические частицы, и износ, вызванный этими частицами, сравнивался с износом, вызванным сферическими частицами. Результаты исследования показывают, что форма частиц оказывает существенное влияние на профили износа футеровки, что позволяет предположить, что простых моделей сферических частиц недостаточно для точного прогнозирования износа футеровки барабанных шаровых мельниц [41].

Кроме того, форма частиц, использованная в данной работе, не повлияла на основную причину износа футеровки, которая заключается в интенсивном скольжении частиц по стенкам футеровки во время ускорения частиц в зоне контакта с загрузкой [41].

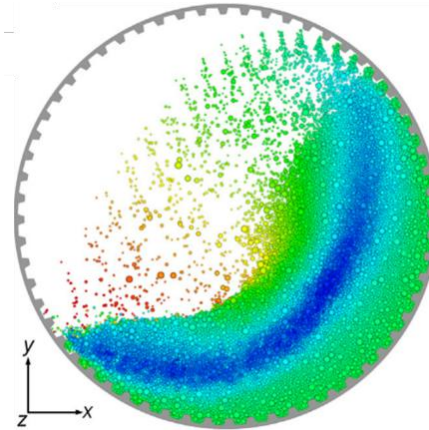


Рисунок 1.27 – Поведение загрузки в стационарном режиме при скорости вращения 10,5 об/мин ($n = 77\%$) [41]

В работе [42] сделаны выводы о необходимости определения характеристик среды измельчения для определения расхода мелющих тел вследствие износа и проведения исследований связывающих свойства материалов с их износостойкостью в различных системах.

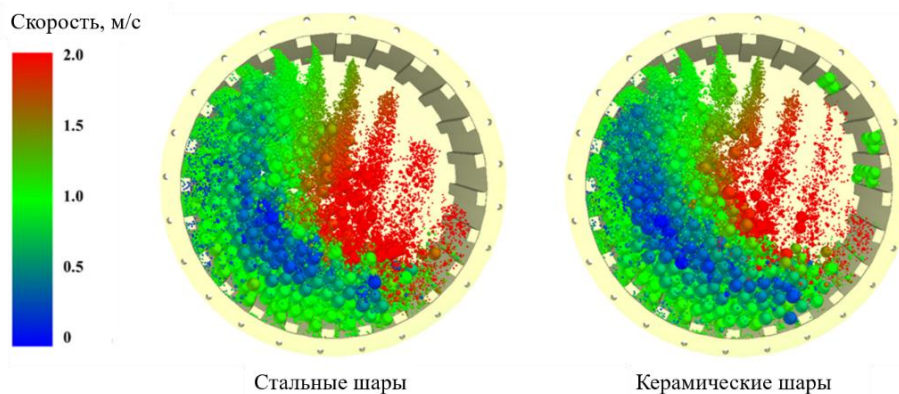


Рисунок 1.28 – Распределение частиц по скоростям при измельчении [43]

В работе [43] приведены исследования с помощью экспериментов и численного моделирования особенностей движения и энергетической эволюции бинарной среды (смеси стальных и керамических шаров) в барабанной шаровой мельнице (рис. 1.28).

В ходе исследования представленного в работе [43] были получены следующие результаты:

– При одинаковых условиях траектории движения стальных и керамических шаров существенно различаются. Из-за большого веса стальные шары имеют меньшую дальность падения. При сравнении систем с одной средой и бинарных сред было обнаружено, что движение стальных и керамических шаров в бинарной системе значительно сходится. В частности, для стальных шаров присутствие керамических шаров в бинарной среде снижает склонность стальных шариков к оседанию, тем самым предотвращая неэффективность, вызванную чрезмерной силой тяжести, которая ограничивает эффективное каскадирование.

– Анализ степени смешивания бинарных сред показывает, что стратегия использования бинарных сред не приводит к расслоению из-за значительной разницы в плотности между стальными и керамическими шарами.

– Измерения энергопотребления при измельчении и анализ энергии столкновения материала с минералом показали, что стальные шары обеспечивают более высокую энергию столкновения, которая достигается за счет более высокого расхода энергии на измельчение, в то время как керамические шары, благодаря своей меньшей плотности, при тех же условиях потребляют меньше энергии. Сочетание стальных и керамических шаров не только увеличивает энергию столкновения с минералами, но и снижает энергопотребление мельницы. Кроме того, технология бинарного измельчения обеспечивает определенную степень контроля, позволяя регулировать пропорции материала для оптимизации баланса между эффективностью измельчения и энергопотреблением.

В работе [44] проведено имитационное моделирование и описание метода количественной оценки движения материала для барабанной шаровой мельницы (рис. 1.29). Приведен анализ четырех характерных параметров движения загрузки с целью определения различий в поведении мелющей загрузки при нагрузке. В этом исследовании предлагается теоретическая расчетная модель для прогнозирования мощности барабанной шаровой мельницы.

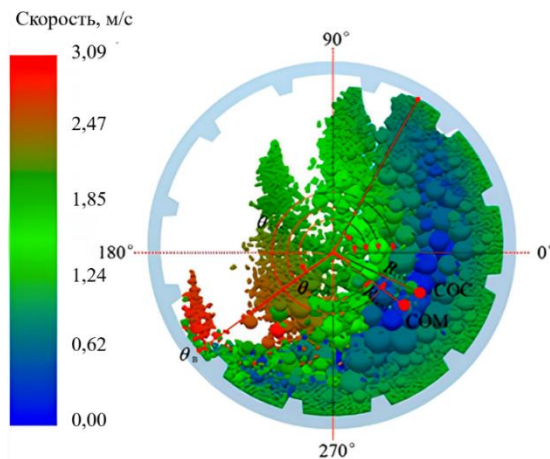


Рисунок 1.29 – Поперечное сечение имитационной модели [44]

В работе [44] определено два фактора, которые делают крайне сложным экспериментальное сопоставление крутящего момента и уровня заполнения в барабанной шаровой мельнице.

В работе [46, 47] изучено значительное изменение поверхности частиц, в частности, кислотно-основных энергий Льюиса. Таким образом, агломерация частиц может быть связана с электронным дефектом на поверхности частицы. Этот дефект может быть заменен другой частицей, также обладающей электронным дефектом. Интерфейс между матрицей и наполнителем, в случае смесей, может быть ограничен близостью частиц. С другой стороны, в случае совместного измельчения модификация поверхности частиц создает образование связи между наполнителем и матрицей.

Таким образом, всесторонний анализ известных методик показал, что существующие основы моделирования режимов работы мелющей загрузки с применением метода дискретных элементов учитывают наличие материала и мелющих тел, что позволяет определить траектории движения загрузки в поперечном сечении барабана мельниц, потребляемую мощность, а также осуществить моделирование износа футеровки мельницы.

Однако, следует отметить, что в представленных методах не рассматриваются вопросы моделирования поперечного и продольного профилей футеровок. Кроме этого отсутствует исследование влияния формы футеровки и геометрических параметров на режимы работы мелющей загрузки, износ футеровки и влияние износа на потребляемую мощность и срок службы. Именно

поэтому, разработка методов цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы с учетом режимов работы мелющей загрузки является актуальной задачей.

1.6 Цель и задачи.

Настоящее исследование базируется на следующей рабочей гипотезе – цифровое моделирование поперечного и продольного профиля футеровки с учетом режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы на ранних стадиях проектирования позволяет определить рациональные параметры мелющей загрузки, снизить износ футеровки и обеспечить повышение эффективности процесса измельчения.

Научная идея работы заключается в разработке метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки.

Целью настоящей работы является разработка метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.

В соответствии с поставленной целью работы необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ техники и технологии в области измельчения, существующих конструкций футеровок и направлений повышения эффективности их использования.
2. Изучить существующие технические решения и подходы, а также методы проектирования футеровок барабанных шаровых мельниц и исследования режимов работы мелющей загрузки.
3. Разработать математическую модель расчета энергетических и кинематических параметров мелющей загрузки.
4. Осуществить многовариантное цифровое моделирование поперечного и продольного профиля футеровки и определить рациональные режимы работы мелющей загрузки.

5. Разработать метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.

6. Разработать план и провести экспериментальные исследования процесса измельчения на лабораторной барабанной шаровой мельнице. Получить уравнения регрессии описывающие зависимости выходных показателей: потребляемой мощности привода, остатка на сите №008, характеризующего тонкость помола готового продукта, удельного расхода энергии от исследуемых факторов.

7. Установить рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы.

8. Разработать технические рекомендации по внедрению методов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанных шаровых мельниц с вариативным исполнением футеровки и определить их экономическую эффективность.

1.7 Выводы.

1. На основе анализа научно-технической литературы и исследований отечественных и зарубежных ученых установлено, что основным направлением совершенствования барабанных шаровых мельниц является разработка высокоэффективных внутримельничных устройств с применением современных методов и подходов цифрового моделирования.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУТЕРОВКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ШАРОВ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Исследованию процесса измельчения в барабанных шаровых мельницах посвящено множество научных работ [22, 48-57]. Процесс движения мелющих тел в поперечном сечении барабанной шаровой мельницы является объектом исследования.

На потенциальную энергию шаров в барабане мельницы существенную роль наряду с профилем футеровки барабана оказывают размеры шаров. В связи с этим рассмотрение движения мелющей загрузки, состоящей из набора шаров различного диаметра и параметров футеровки представляет собой актуальную задачу.

2.1 Определение угла схода шара с выступа футеровки.

Рассмотрим частный случай поведения некоторого выделенного шара радиусом r_w находящегося на ступенчатой футеровки размером r_0 радиально ориентированной по отношению к центру барабана мельницы.

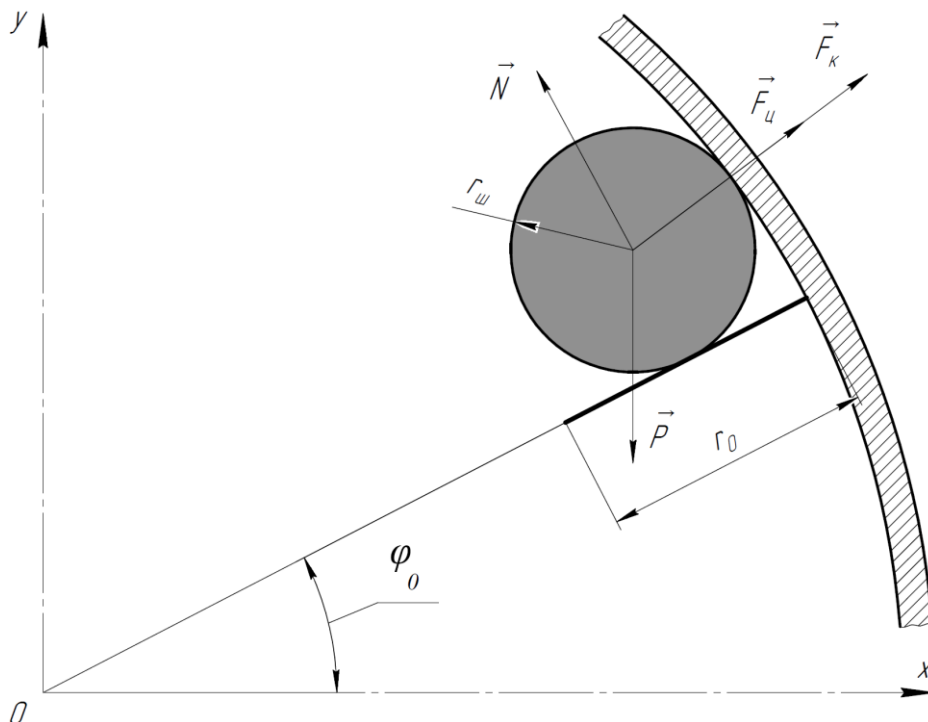


Рисунок 2.1 – Расчетная схема равновесия шара

При вращении барабана мельницы с частотой ω шар, находящийся на плоской поверхности футеровки, под действием совокупности сил будет находиться

в состоянии покоя при вращении барабана до того момента пока угол поворота плоскости футеровки не достигнет значения равного φ_0 .

На основании сказанного условие равновесия шара согласно расчетной схемы, представленной на рисунке 2.1, можно записать в следующем виде:

$$\vec{P} + \vec{N} + \vec{F}_c + \vec{F}_k = 0, \quad (2.1)$$

здесь \vec{P} – сила тяжести, равная:

$$P = mg. \quad (2.2)$$

\vec{N} – сила реакции площадки футеровки, равная:

$$N = mg \cos \varphi_0. \quad (2.3)$$

\vec{F}_c – центробежная сила равная:

$$F_c = m\omega^2(R - r_{ш}), \quad (2.4)$$

R – радиус барабана мельницы.

\vec{F}_k – сила трения качения, равная:

$$F_k = \frac{f \cdot N}{r_{ш}}, \quad (2.5)$$

где m – масса шара, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

f – коэффициент трения качения.

Соотношение (2.1) в системе координат с центром в точке « O » можно записать в виде:

$$mg \sin \varphi_0 = m\omega^2(R - r_{ш}) + \frac{f \cdot mg \cos \varphi_0}{r_{ш}}. \quad (2.6)$$

Частоту вращения барабана, как это принято, можно определить в долях ψ от критической частоты вращения барабана мельницы

$$\omega_k = \sqrt{\frac{g}{R - r_{ш}}}, \quad (2.7)$$

а именно

$$\omega = \psi \cdot \omega_k, \quad (2.8)$$

или

$$\omega = \psi \cdot \sqrt{\frac{g}{R - r_{ш}}}. \quad (2.9)$$

С учетом (2.9) выражение (2.6) принимает вид:

$$\sin\varphi_0 - \frac{f}{r_{\text{ш}}} \cos\varphi_0 = \psi^2. \quad (2.10)$$

Полученное соотношение (2.10) можно рассматривать как уравнение для определения предельного значения угла поворота плоскости футеровки, при которой сохраняется состояние покоя шара радиусом $r_{\text{ш}}$.

Формулу (2.10) можно преобразовать к следующему виду:

$$\sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}} \cdot \sin\varphi_0 - \frac{f \cdot \cos\varphi_0}{r_{\text{ш}} \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}} \right) = \psi^2. \quad (2.11)$$

Для нахождения решения уравнения (2.11) введем следующие обозначения:

$$\cos\delta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}}, \quad (2.12)$$

$$\sin\delta = \frac{f}{r_{\text{ш}} \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}}, \quad (2.13)$$

$$\delta = \arctg \frac{f}{r_{\text{ш}}}. \quad (2.14)$$

Подстановка (2.12) и (2.13) в (2.11) позволяет получить:

$$\sin\varphi_0 \cos\delta - \sin\delta \cos\varphi_0 = \psi^2. \quad (2.15)$$

На основании (2.15) можно получить:

$$\sin(\varphi_0 - \delta) = \psi^2, \quad (2.16)$$

$$\varphi_0 = \delta + \arcsin\psi^2. \quad (2.17)$$

С учетом (2.14) формула (2.17) принимает вид:

$$\varphi_0 = \arctg \frac{f}{r_{\text{ш}}} + \arcsin\psi^2. \quad (2.18)$$

В случае отсутствия на поверхности барабана шаровой мельницы футеровки в виде радиально расположенной ступеньки в формуле (2.18) необходимо положить значение коэффициента трения скольжения равным нулю. Поэтому согласно (2.18) получаем:

$$\varphi_{01} = \arcsin\psi^2. \quad (2.19)$$

Полученное соотношение (2.19) в выбранной системе координат представляет собой хорошо известную формулу для определения угла отрыва шара от внутренней поверхности барабана шаровой мельницы

Сравнительный анализ соотношений (2.18) и (2.19) показывает, что величина угла отрыва шара от поверхности футеровки установленную на гладкую поверхность барабана больше на величину (2.14).

После отделения шара от внутренней поверхности барабана мельницы происходит его качение по плоской поверхности футеровки. При качении шара передняя часть поверхности шара тормозится за счет преодоления барьера на поверхности футеровки, который образуется в результате деформации последней. Данное торможение приводит к возникновению силы трения качения.

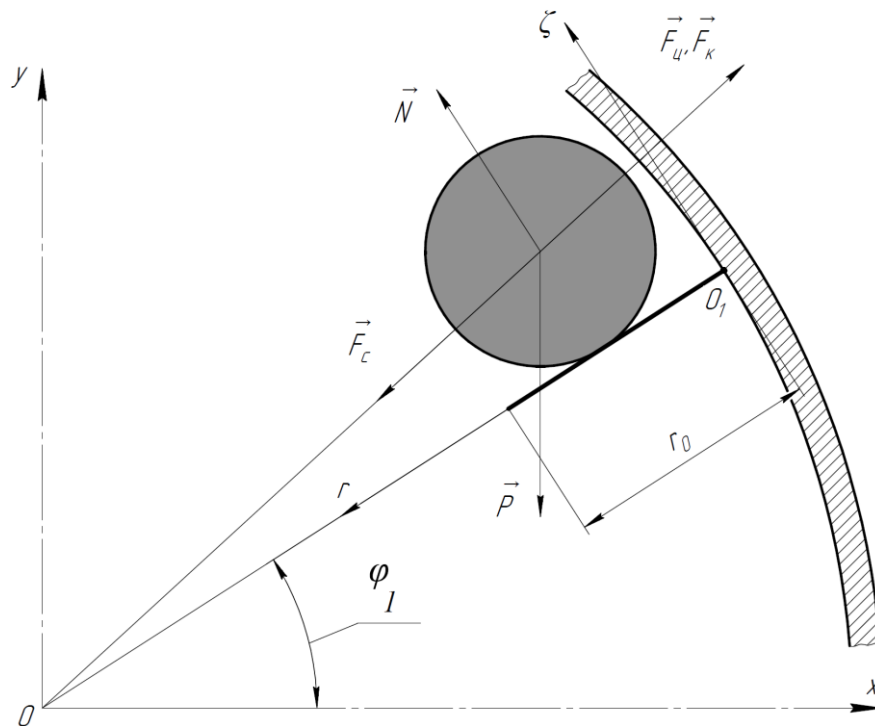


Рисунок 2.2 – Расчетная схема движения шара по площадке футеровки длиной r_0

Рассмотрим динамику движения центра массы шара по поверхности футеровки при углах последней на углы $\varphi > \varphi_0$ с учетом силы трения качения.

Для этого введем двумерную локальную систему координат $rO_1\zeta$ согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 2.2.

После отрыва шара от внутренней поверхности при значении угла $\varphi > \varphi_0$ происходит движение шара по наклонной поверхности с изменяющимся во времени углом наклона плоскости поверхности футеровки:

$$\varphi = \omega t. \quad (2.20)$$

Динамика движения шара в системе координат $rO_1\zeta$ в рамках детерминированной модели описывается следующим уравнением:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mg \sin \varphi - mr \omega^2 - \frac{fN}{r_{\text{ш}}}. \quad (2.21)$$

С учетом соотношения (2.3) уравнение (2.21) принимает вид:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mg \sin \varphi - mr \omega^2 - \frac{fmg \cos \varphi}{r_{\text{ш}}}. \quad (2.22)$$

В уравнении (2.22) произведем замену переменной согласно (2.20) и с учетом (2.9) получаем следующее уравнение:

$$\frac{d^2 r}{d\varphi^2} + r = \frac{R-r_{\text{ш}}}{\psi^2} \sin \varphi - \frac{f(R-r_{\text{ш}})}{\psi^2 r_{\text{ш}}} \cos \varphi. \quad (2.23)$$

Введем следующие обозначения:

$$A = \frac{R-r_{\text{ш}}}{\psi^2}, \quad (2.24)$$

$$B = \frac{f(R-r_{\text{ш}})}{\psi^2 r_{\text{ш}}}. \quad (2.25)$$

С учетом (2.24) и (2.25) уравнение (2.23) примет вид:

$$\frac{d^2 r}{d\varphi^2} + r = A \sin \varphi - B \cos \varphi. \quad (2.26)$$

Преобразуем следующее соотношение:

$$A \sin \varphi - B \cos \varphi = \sqrt{A^2 + B^2} \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin \varphi - \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos \varphi \right). \quad (2.27)$$

На основании (2.24) и (2.25) находим:

$$\sqrt{A^2 + B^2} = \frac{R-r_{\text{ш}}}{\psi^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}. \quad (2.28)$$

Введем следующие обозначения:

$$\sin \gamma = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (2.29)$$

$$\cos \gamma = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (2.30)$$

$$\gamma = \arctg \frac{B}{A}. \quad (2.31)$$

Подстановка (2.29) и (2.30) в (2.27) приводит к следующему соотношению:

$$A \sin \varphi - B \cos \varphi = A_0 \sin(\varphi - \gamma), \quad (2.32)$$

где введено следующее обозначение:

$$A_0 = \frac{R-r_{\text{ш}}}{\psi^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}. \quad (2.33)$$

С учетом (2.32) уравнение (2.26) принимает вид:

$$\frac{d^2 r}{d\varphi^2} + r = A_0 \sin(\varphi - \gamma). \quad (2.34)$$

С помощью замены:

$$\alpha = \varphi - \gamma, \quad (2.35)$$

уравнение (2.34) окончательно принимает следующий вид:

$$\frac{d^2r}{d\varphi^2} + r(\alpha) = A_0 \sin \alpha. \quad (2.36)$$

С математической точки зрения выражение (2.36) представляет собой дифференциальное неоднородное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами.

Решение уравнения (2.36) можно найти согласно следующему правилу. В начале находим решение однородного уравнения следующего вида:

$$\frac{d^2r_1}{d\alpha^2} + r_1(\alpha) = 0, \quad (2.37)$$

которое определяется выражением:

$$r_1(\alpha) = C_1 \cos \alpha + C_2 \sin \alpha, \quad (2.38)$$

где C_1 и C_2 в (2.38) произвольные постоянные.

На втором шаге ищем частные решения уравнения (2.36) в виде:

$$r_2(\alpha) = \alpha(A_1 \cos \alpha + B_1 \sin \alpha). \quad (2.39)$$

Для определения постоянных значений A_1 и B_1 необходимо вычислить:

$$\frac{dr_2}{d\alpha} = A_1 \cos \alpha + B_1 \sin \alpha - A_1 \alpha \sin \alpha + B_1 \alpha \cos \alpha, \quad (2.40)$$

$$\frac{d^2r_2}{d\alpha^2} = -A_1 \cos \alpha + B_1 \cos \alpha - A_1 \alpha \cos \alpha - A_1 \sin \alpha + B_1 \cos \alpha - B_1 \alpha \sin \alpha. \quad (2.41)$$

Подстановка (2.41) и (2.39) в формулу (2.36) приводит к следующему результату:

$$-A_1 \sin \alpha + B_1 \cos \alpha - A_1 \sin \alpha + B_1 \cos \alpha = A_0 \sin \alpha. \quad (2.42)$$

Полученное выражение (2.42) обращается в тождество при следующих значениях:

$$A_1 = -\frac{A_0}{2}, \quad (2.43)$$

$$B_1 = 0. \quad (2.44)$$

Подстановка (2.43) и (2.44) в (2.39) позволяет получить следующий результат:

$$r_2(\alpha) = -\frac{A_0}{2} \alpha \cos \alpha. \quad (2.45)$$

На третьем шаге решение уравнения (2.36) представляем в виде линейной комбинации:

$$r(\alpha) = r_1(\alpha) + r_2(\alpha). \quad (2.46)$$

Подстановка (2.38) и (2.45) позволяет окончательно получить следующий результат:

$$r(\alpha) = C_1 \cos \alpha + C_2 \sin \alpha - \frac{A_0}{2} \alpha \cos \alpha. \quad (2.47)$$

Полученное выражение (2.47) представляет собой общее решение уравнения (2.36), для получения частного решения необходимо определить постоянные величины C_1 и C_2 используя следующие начальные условия:

$$\text{при } t = 0, \varphi = \varphi_0, \alpha = \alpha_0 = \varphi_0 - \gamma, r(\alpha_0) = 0, \quad (2.48)$$

$$\text{при } t = 0, \varphi = \varphi_0, \alpha = \alpha_0 = \varphi_0 - \gamma, \frac{dr}{d\alpha}(\alpha = \alpha_0) = 0. \quad (2.49)$$

Применение условия (2.48) к соотношению (2.47) приводит к результату:

$$C_1 \cos \alpha_0 + C_2 \sin \alpha_0 = \frac{A_0}{2} \alpha_0 \cos \alpha_0. \quad (2.50)$$

Подстановка (2.47) в формулу (2.49) дает:

$$-C_1 \sin \alpha_0 + C_2 \cos \alpha_0 = \frac{A_0}{2} (\cos \alpha_0 - \sin \alpha_0). \quad (2.51)$$

Полученные выражения (2.50) и (2.51) можно рассматривать как систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных величин C_1 и C_2 .

Используя метод детерминантов находим значения постоянных:

$$C_1 = \frac{A_0}{2} (\alpha_0 - \sin \alpha_0 \cos \alpha_0), \quad (2.52)$$

$$C_2 = \frac{A_0}{2} \cos^2 \alpha_0. \quad (2.53)$$

Подстановка (2.52) и (2.53) в формулу (2.47) окончательно приводит к следующему результату:

$$r(\alpha) = \frac{A_0}{2} (\cos \alpha \cdot (\alpha_0 - \alpha - \cos \alpha_0 \sin \alpha_0) + \cos^2 \alpha_0 \sin \alpha_0). \quad (2.54)$$

Если через α_1 – обозначить значение величины, при которой центр шара достигает края длинны поверхности футеровки, тогда в этом случае должно выполняться равенство:

$$r(\alpha_1) = r_0. \quad (2.54)$$

На основании (2.54) можно записать следующее соотношение:

$$\frac{2r_0}{A_0} = \cos \alpha \cdot (\alpha_0 - \alpha - \cos \alpha_0 \sin \alpha_0) + \cos^2 \alpha_0 \sin \alpha_0. \quad (2.55)$$

С учетом (2.35) (2.55) примет вид:

$$\frac{2r_0}{A_0} = \cos(\varphi_1 - \gamma) \cdot (\varphi_0 - \varphi_1 - 0,5 \sin(2\varphi_0 - 2\gamma)) + \cos^2(\varphi_0 - \gamma) \sin(\varphi_1 - \gamma). \quad (2.56)$$

Соотношение (2.56) необходимо рассматривать как уравнение для нахождения значения угла поворота φ_1 , при котором центр шара достигает края площадки футеровки. Ввиду сложности уравнения (2.56) найти его аналитическое решение не представляет возможным.

Однако найти решение уравнения (2.56) можно с помощью компьютера численными методами с использованием современных вычислительных программ. В частности, можно использовать вычислительную систему «Maple». В приложении 1 в рамках этой системы приведен текст программы для нахождения значений угла φ_1 в зависимости от f , r_{uv} , r_0 , ψ .

Определение угла схода шара с выступа футеровки барабанной шаровой мельницы имеет значительное научное и практическое значение для оптимизации процесса измельчения, повышения энергоэффективности и продления срока службы футеровки. Эта задача позволяет глубже понять кинематику движения мелющих тел, что критично для проектирования рационального профиля футеровки и управления технологическим процессом.

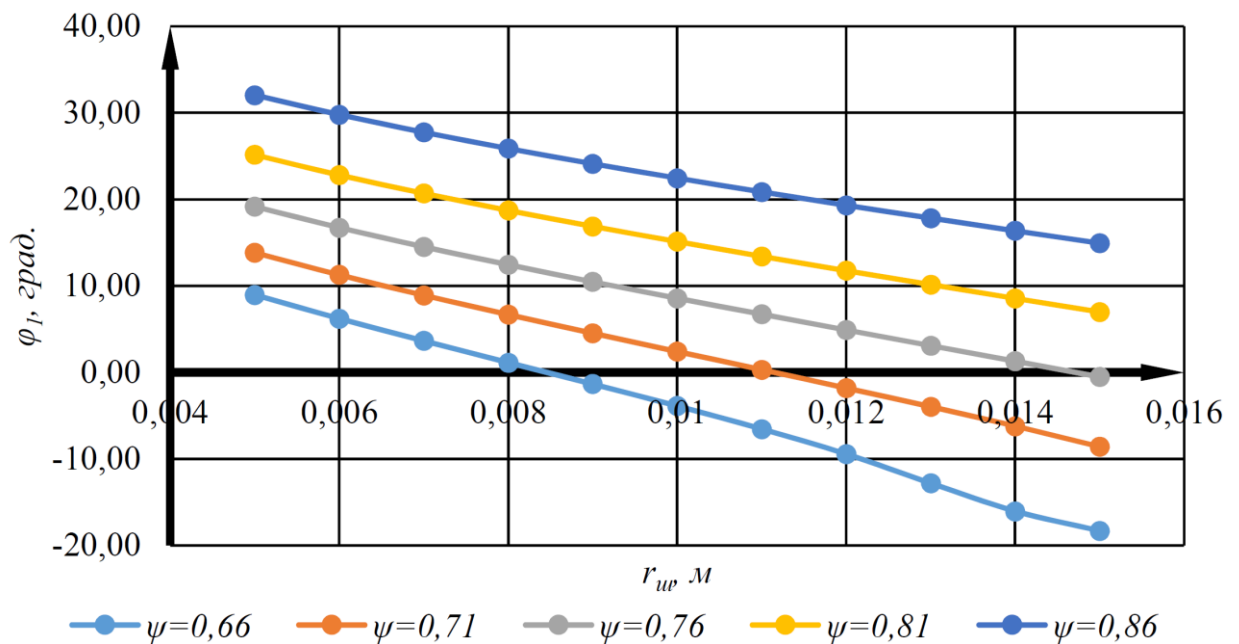


Рисунок 2.3 – График зависимости угла φ_1 схода шара с выступа футеровки от радиуса шара при $r_0=2r_{uv}$

Исходя из графика, представленного на рисунке 2.3 видно, что с увеличением радиуса шара наблюдается уменьшение угла φ_1 схода шара, ввиду чего, можно

сделать вывод о том, что при увеличении диаметра шара требуется увеличение высоты выступа футеровки r_0 .

2.2 Определение кинетических параметров шара в момент схода с выступа футеровки и падения.

На основании формулы (2.54), которая определяет изменение величины пути пройденного центром шара в зависимости от угла поворота площадки футеровки можно найти изменение скорости перемещения центра шара согласно следующим формулам:

$$\vartheta_r = \frac{dr}{dt}, \quad (2.57)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.58)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\alpha(\varphi-\gamma)}{dt}, \quad (2.59)$$

с учетом формулы (2.20) (2.59) примет вид:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\alpha(\omega e)}{dt} = \omega. \quad (2.60)$$

Подстановка (2.60) в (2.58) дает:

$$\vartheta_r = \omega \cdot \frac{dr}{d\alpha}. \quad (2.61)$$

Вычислим:

$$\frac{dr}{d\alpha} = \frac{A_0}{2} (-\sin\alpha \cdot (\alpha_0 - \alpha) - \cos\alpha + \cos^2\alpha_0 \cos\alpha). \quad (2.62)$$

После математических преобразований находим:

$$\frac{dr}{d\alpha} = \frac{A_0}{2} \omega ((\alpha - \alpha_0) \sin\alpha - \sin^2\alpha_0 \cos\alpha). \quad (2.63)$$

С учетом (2.63) формула (2.61) примет вид:

$$\vartheta_r = \frac{A_0}{2} \omega ((\alpha - \alpha_0) \sin\alpha - \sin^2\alpha_0 \cos\alpha). \quad (2.64)$$

Используя выражения (2.9) и (2.33) находим:

$$\frac{A_0}{2} \cdot \omega = \frac{\sqrt{(g(R-r_{ш})(1+\frac{f^2}{r_{ш}^2}))}}{2\psi}. \quad (2.65)$$

С целью определения скорости шара в момент схода с выступа футеровки введем следующее обозначение:

$$\vartheta_0 = \frac{\sqrt{(g(R-r_{ш})(1+\frac{f^2}{r_{ш}^2}))}}{2\psi}. \quad (2.66)$$

Соотношение (2.64) с учетом (2.35) можно записать в следующем компактном виде:

$$v_r = v_0 \cdot f(\varphi_0, \varphi_1), \quad (2.67)$$

где функция $f(\varphi_0, \varphi_1)$ определяется соотношением следующего вида:

$$f(\varphi_0, \varphi_1) = (\varphi_1 - \varphi_0) \sin(\varphi_1 - \gamma) + \sin^2(\varphi_0 - \gamma) \cos(\varphi_1 - \gamma). \quad (2.68)$$

В момент схода шара с площадки футеровки центр шара на ряду со скоростью (2.67) обладает также окружной скоростью v_ω равной:

$$v_\omega = \omega(R - r_0). \quad (2.69)$$

С учетом (2.9) формулу (2.69) можно представить в виде:

$$v_\omega = \psi \cdot v_{0\omega}, \quad (2.70)$$

где

$$v_{0\omega} = \sqrt{\frac{g}{R - r_{ш}}} \cdot (R - r_{ш}). \quad (2.71)$$

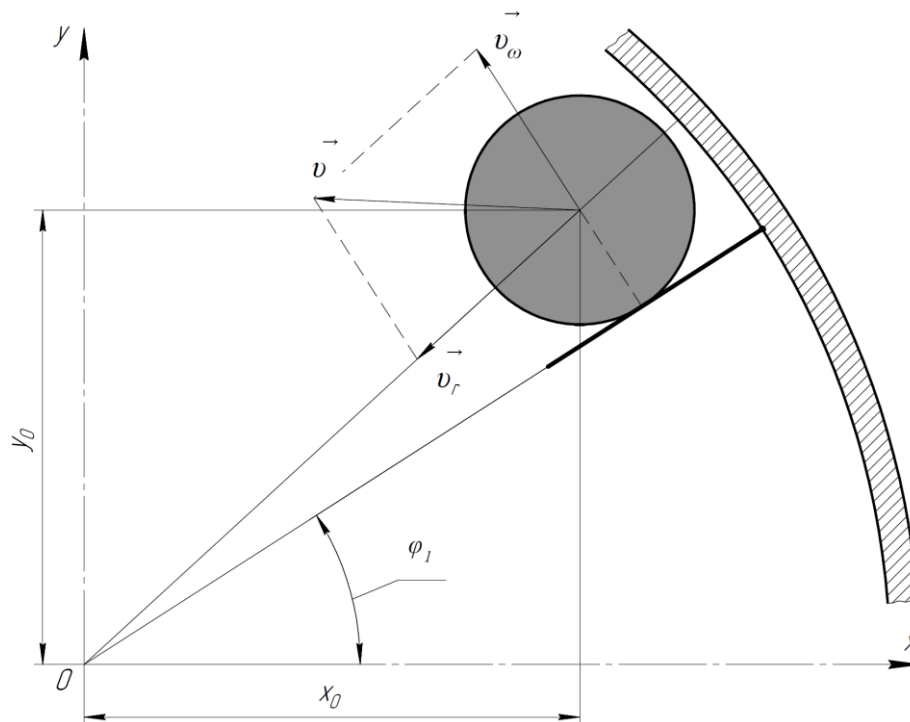


Рисунок 2.4 – Расчетная схема определения скорости схода шара с плоскости футеровки

Согласно расчетной схеме на рисунке 2.4 величина скорости отделения определяется соотношением:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\omega^2}. \quad (2.72)$$

Подстановка (2.67), (2.70) и (2.71) в формулу (2.72) приводит к следующему результату:

$$v = v_0 \sqrt{f(\varphi_0, \varphi_1) + \beta_1^2}, \quad (2.73)$$

где

$$\beta_1 = \frac{2\psi^2(R-r)}{(R-r_{\text{ш}}) \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}}. \quad (2.74)$$

На основании расчетной схемы на рисунке 2.4 значение угла φ_2 между векторами $\vec{\vartheta}$ и $\vec{\vartheta}_2$ можно определить согласно формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\vartheta_{\omega}}{\vartheta_r}. \quad (2.75)$$

С учетом (2.71) и (2.67) находим:

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{2\psi^2(R-r_0)}{(R-r_{\text{ш}}) \sqrt{1 + \frac{f^2}{r_{\text{ш}}^2}}}. \quad (2.76)$$

После схода шара с плоскости футеровки его перемещение в пространстве барабана мельницы аналогично движению тела, брошенного под углом к горизонту с начальной скоростью (2.73):

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (2.77)$$

На основании этого факта и расчетной схемы на рисунке 2.3 можно записать следующие соотношения:

$$\vartheta_{x_0} = \vartheta \cos \varphi_3, \quad (2.78)$$

$$\vartheta_{y_0} = \vartheta \sin \varphi_3, \quad (2.79)$$

здесь ϑ_{x_0} , ϑ_{y_0} – соответственно проекции вектора скорости на координатные оси декартовой системы координат «ХОУ».

Используя (2.78) и (2.79) находим:

$$y = \vartheta_{y_0} t - \frac{gt^2}{2} + y_0, \quad (2.80)$$

$$x = \vartheta_{x_0} t + x_0, \quad (2.81)$$

где t – время, отсчитываемое с момента схода первого шара с плоскости футеровки;

x_0 , y_0 – соответственно координаты в момент схода шара с футеровки.

Приведенное соотношение (2.80) и (2.81) представляет собой параметрическое уравнение движения шара в поперечном сечении барабана мельницы после схода с плоскости футеровки.

Время подъема шара до максимальной высоты y_{\max} можно определить исходя из соотношения: $dy/dx=0$.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = 0. \quad (2.82)$$

Используя соотношения (2.80), (2.81) на основании формулы (2.82) находим:

$$t_n = \frac{\vartheta \sin \varphi_3}{g}. \quad (2.83)$$

Подстановка (2.83) в (2.80) позволяет получить следующий результат:

$$y_{max} = y_0 + \frac{\vartheta^2 \sin^2 \varphi_3}{2g}. \quad (2.84)$$

Таким образом полученное выражение (2.84) позволяет сделать вывод о энергетическом преимуществе шара при наличие рассматриваемой футеровки по сравнению с отсутствием выступа. Это в свою очередь означает повышение эффективности и производительности шара в его процессе измельчения материала в барабанной шаровой мельнице.

2.3 Расчет потребляемой мощности привода барабанной шаровой мельницы.

Мощность, потребляемая приводом барабанной шаровой мельницы, может быть определена по формуле [1, 57, 58]:

$$P = \frac{P_1 + P_2}{\eta}, \quad (2.85)$$

где P_1 – мощность, затрачиваемая на передачу мелющим телам потенциальной энергии, Вт;

P_2 – мощность, затрачиваемая на передачу мелющим телам кинетической энергии, Вт;

η – коэффициент полезного действия привода, доли ед.

Мощность P_1 , затрачиваемая на передачу мелющим телам потенциальной энергии равна произведению частоты вращения барабана мельницы на работу затрачиваемая на подъем мелющих тел [1]:

$$P_1 = \frac{n}{60} \cdot A_{II} = \frac{n}{60} \cdot \sum_{i=1}^k G \cdot H, \quad (2.86)$$

где n – частота вращения барабана мельницы, об/мин;

A_{II} – работа, затрачиваемая на подъем мелющих тел, Дж;

Мощность P_2 , затрачиваемая на передачу мелющим телам кинетической энергии может быть определена как произведение частоты вращения барабана

мельницы на работу, затрачиваемую на сообщение мелющим телам кинетической энергии [1]:

$$P_2 = \frac{n}{60} \cdot A_K = \frac{n}{60} \cdot \sum_{i=1}^k m \cdot v_s^2 / 2. \quad (2.87)$$

2.4 Выводы.

1. Получено аналитическое выражение, позволяющее определить угол схода шара с выступа футеровки с учетом конструктивных параметров футеровки.
2. Сформулировано аналитическое выражение для расчета скорости шара как в момент схода от выступа футеровки, так и в момент падения в зону пяты материала, что дает возможность оценить энергию удара и интенсивность измельчения.
3. Разработано аналитическое описание траектории движения шара на в поперечном сечении барабана, учитывающее конструктивно-технологические параметры барабанной шаровой мельницы.
4. Получено аналитическое выражение, позволяющее рассчитать максимальную высоту подъема шара в зависимости от угловой скорости вращения барабана мельницы и параметров футеровки.

3 МЕТОДИКА ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУТЕРОВКИ БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

3.1 Основные положения метода дискретных элементов.

Для проведения цифрового моделирования процесса измельчения использовался фундаментальный метод численного моделирования, в котором дискретные частицы сталкиваются друг с другом и с другими поверхностями в ходе явного динамического моделирования с расчетом всех контактных взаимодействий [60-63]. Данный метод начал использоваться в инженерной практике с развитием компьютерной техники в конце XX века [64, 65]. Метод дискретных элементов основан на втором законе Ньютона и рассматривает каждую частицу как отдельный элемент для оценки взаимодействия между ними. Взаимодействие между частицами регулируется контактной механикой, включающей в себя различные силы, такие как нормальные и тангенциальные контактные силы, силы демпфирования. Силы, действующие на частицу, вычисляются на основе начальных данных, соответствующих физических законов и моделей контактов.

Особое место данный метод занял в оптимизации рабочих органов оборудования для измельчения в горно-обогатительной и цементной промышленности, в частности при оптимизации процессов измельчения в барабанных шаровых мельницах. Применение метода дискретных элементов связано с разработкой барабанных шаровых мельниц [66, 67], в частности, при исследовании движения мелющей загрузки [68], прогнозировании и снижении износа футеровки и мелющих тел [69, 70], снижении энергопотребления [71, 72].

Основным преимуществом метода дискретных элементов в сравнении с существующими аналитическими методами является возможность исследования процессов горно-обогатительной и цементной промышленности с учетом различных факторов, влияющих на них. Следует отметить, что данное преимущество позволяет инженерам сокращать экономические ресурсы для обоснования технических и технологических решений [73, 74].

Кроме этого, в мировой практике исследования процессов измельчения [75], протекающих в различном помольном оборудовании [76] с применением метода

дискретных элементов стало возможным благодаря развитию специализированного программного обеспечения. Основным программным обеспечением для моделирования процесса измельчения являются [74, 77, 78-82]:

1. *JK SAG Charge* – программный продукт, базирующийся на математической модели кинематики движения мелющей загрузки, предложенной *Morrell S.* [83, 84]. Отличительной особенностью данного программного обеспечения является возможность расчета мощности, потребляемой мельницей в установившемся режиме.

2. *Rocky DEM* – программный комплекс, созданный на базе вычислительного кода, разработанного компанией «*Convey-or Dynamics, Inc.*» и ведущего свою историю с 1995 г.

3. *Altair EDEM* – среда моделирования, обеспечивающая детальный анализ динамики взаимодействия как между отдельными мелющими телами, так и между мелющими телами и внутренней поверхностью корпуса мельницы. Расчет контактных взаимодействий между упругими телами выполняется с использованием контактной модели, основанной на теории Г. Герца и теории Р. Миндлина.

4. *JKSimMet* – программное обеспечение, позволяющее пользователям проектировать и оптимизировать работу дробильно-измельчительных установок [92].

5. *USIM PAC* – программное обеспечение для расчета и оптимизации технологических схем, действующих и проектируемых обогатительных предприятий [85].

Таким образом, разработка и усовершенствование методов исследования процессов измельчения в барабанных шаровых мельницах с применением программного обеспечения, использующего метод дискретных элементов, является актуальной задачей [86].

3.2 Описание блок-схемы цифрового моделирования.

В настоящей работе разработан цифровой двойник лабораторной барабанной шаровой мельницы (рис. 3.2), обладающий высокой степенью соответствия

реальному объекту. На основе цифрового двойника осуществляется цифровое моделирование процесса измельчения в барабанной шаровой мельнице с применением специализированного программного обеспечения на основе метода дискретных элементов. Процесс цифрового моделирования состоит из 5 этапов, представленных на рисунке 3.1.

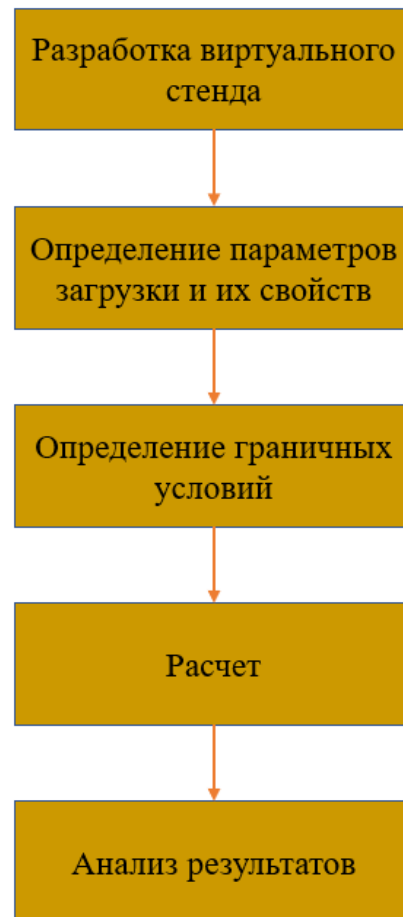


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма цифрового моделирования

1. Разработка виртуального стенда представляет собой упрощение цифрового двойника лабораторной барабанной шаровой мельницы (рис. 3.2) и создание модели для проведения цифрового моделирования. Ввиду того, что цифровое моделирование подразумевает под собой проведение виртуальных экспериментов для широкого диапазона геометрических параметров футеровки барабанной шаровой мельницы, создано множество виртуальных стендов (рис. 3.3) с помощью разработанной программы формирования модели корпуса барабанной мельницы для цифрового моделирования режимов работы мелющей загрузки (Приложение 2).

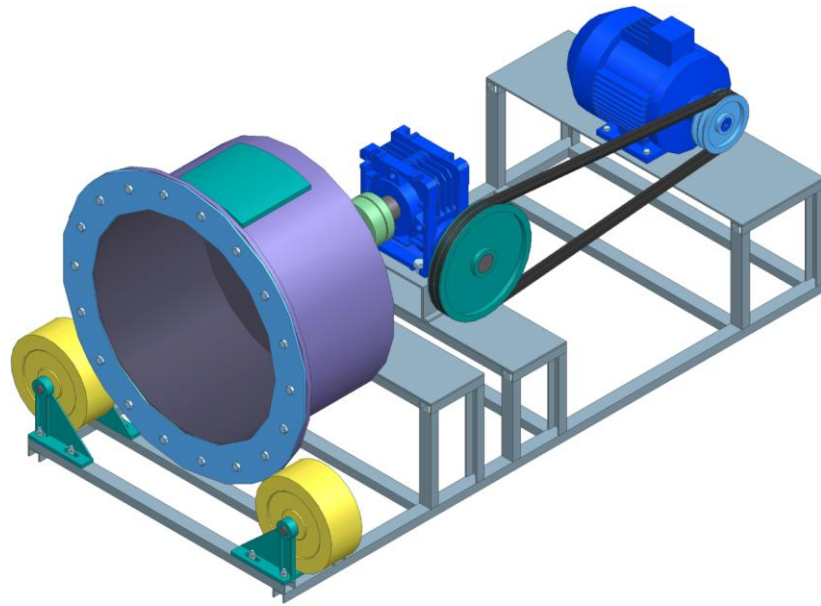


Рисунок 3.2 – Цифровой двойник лабораторной барабанной шаровой мельницы

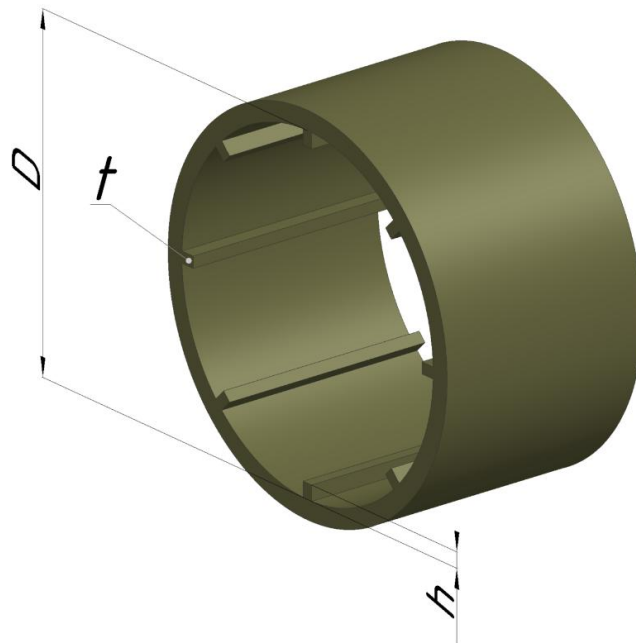


Рисунок 3.3 – Виртуальный стенд для цифрового моделирования футеровки с одинарными выступами

2. Определение параметров загрузки и физико-механических свойств подразумевает под собой выбор ассортимента мелющих тел, их физико-механических свойств и свойств измельчаемого материала.

3. Определение граничных условий осуществляется в специализированном программном обеспечении для задания параметров взаимодействия между парами контактного взаимодействия.

4. Расчет осуществляется для всех подготовленных виртуальных стендов, которых может быть бесконечное множество.

5. Анализ результатов выполняется для всех виртуальных стендов, в ходе которого выполняется сравнение максимальной скорости мелющих тел, кинетической и потенциальной энергий, потребляемой мощности.

3.3 План цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы.

В ходе цифрового моделирования подготовлены виртуальные стенды барабана мельницы (рис. 3.3). Внутренний диаметр футеровки барабанной шаровой мельницы D равен 450 мм, длина рассчитываемого участка составляет 285 мм.

Для проведения цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы при исследовании режимов работы мелющей загрузки разработан план, представленный в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – План цифрового моделирования прокатной футеровки с одинарными выступами

Параметр	Обозначение	Ед. из-я	Значение				
Частота вращения барабана мельницы	n	об/мин	40,51	43,51	46,51	49,51	52,51
Коэффициент загрузки мельницы мелющими телами и материалом	φ	доли ед.	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Высота выступов	h	мм	10	15	20	25	30
Количество выступов	t	ед.	8	12	16	20	24

Для исследования режимов работы мелющей загрузки в лабораторной барабанной шаровой мельнице были заданы диаметры мелющих тел – 35% диаметром 30 мм, 30% диаметром 20 мм, 15% диаметром 15 мм, 20% диаметром 10 мм.

В соответствии с планом цифрового моделирования определено количество виртуальных экспериментов равное 625, необходимое для определения

рациональных геометрических параметров футеровки барабанной шаровой мельницы.

3.4 Описание методики цифрового моделирования.

Разработанная нами методика цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы и процесса измельчения на первом этапе заключается в создании проекта и выбора физической модели в специализированном программном обеспечении (рис. 3.4).

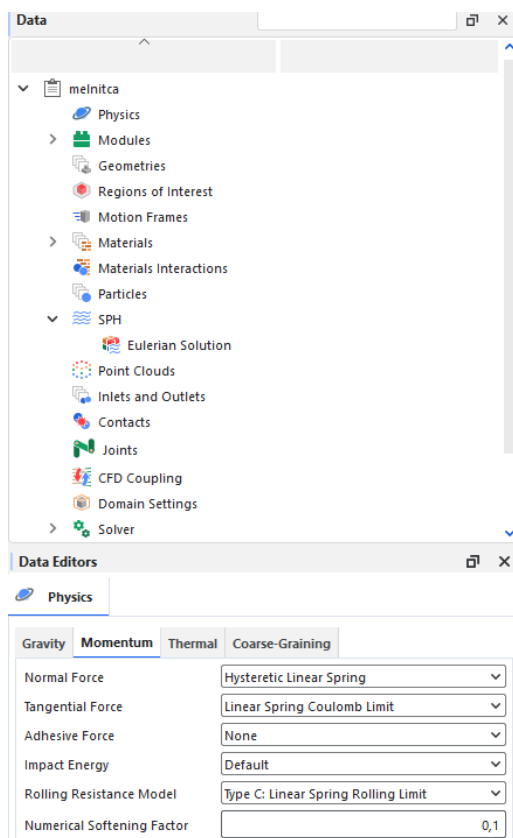


Рисунок 3.4 – Параметры проекта и физической модели

В блоке «*Physics*» («Физика») в разделе «*Momentum*» («Импульс») в поле «*Normal Force*» («Нормальная сила») устанавливается опция «*Hertzian Spring Dashpot*» («Герцовский упругий демпфер»), в поле «*Tangential Force*» («Тангенциальная сила») устанавливается опция «*Linear Spring Coulomb Limit*» («Линейный пружинный кулоновский предел»), в поле «*Rolling Resistance Model*» («Модель сопротивления качению») устанавливается опция «*Type C: Linear Spring Rolling Limit*» («Тип C: Линейный предел качения пружины»), в поле «*Numerical Softening Factor*» («Численный коэффициент смягчения») выставляем на значение «0,1» для облегчения процесса моделирования.

Затем в блоке «*Modules*» («Модули») устанавливаются флажки с соответствующими модулями (рис. 3.5).

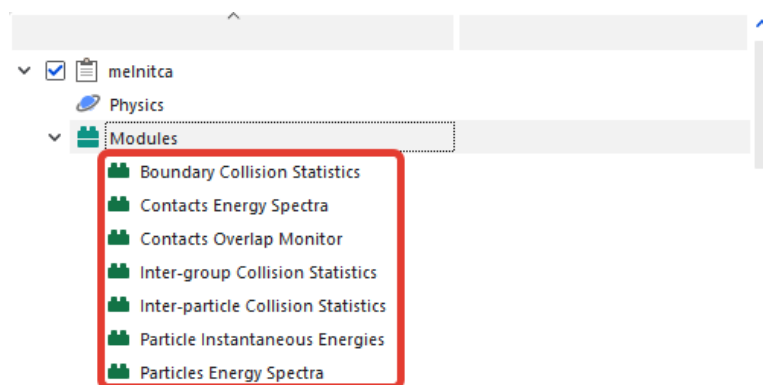


Рисунок 3.5 – Подключаемые модули

Для сбора данных цифрового моделирования осуществляется активация следующих модулей (рис. 3.6):

- «*Boundary Collision Statistics*» («Статистика столкновений границ») – модуль позволяет собирать данные о столкновениях, связанных с геометрией (с частицами), такие как частота столкновений, интенсивность и скорость удара.

- «*Contacts Energy Spectra*» («Энергетические спектры столкновений») – модуль позволяет собирать значения энергии на основе столкновений во время моделирования, результирующие данные классифицируются по паре контактов (группе частиц и / или геометрии).

- «*Contacts Overlap Statistics*» («Статистика совпадения столкновений») – модуль проверяет каждую пару контактов (частица-частица или частица-граница) на величину, на которую они наложились, процентная доля которой определяется размером наименьшей частицы в контактной паре при превышении величины перекрытия на панели журнала моделирования появляется сообщение любой из трех заданных вами уровней предупреждения.

- «*Inter-group Collision Statistics*» («Статистика столкновений границ») – модуль, отвечающий за сбор данных о распределении энергии между каждыми парами контактов: частицы- частица, частица-геометрия.

- «*Inter-particle Collision Statistics*» («Статистика столкновений частиц») – модуль, отвечающий за сбор данных о количестве столкновений, между всеми частицами в моделировании.

– «*Particles Energy Spectra*» («Энергетические спектры частиц») – модуль позволяет собирать во время моделирования значения энергии, которые относятся только к частицам, а результирующие данные классифицируются по размеру и группе частиц.

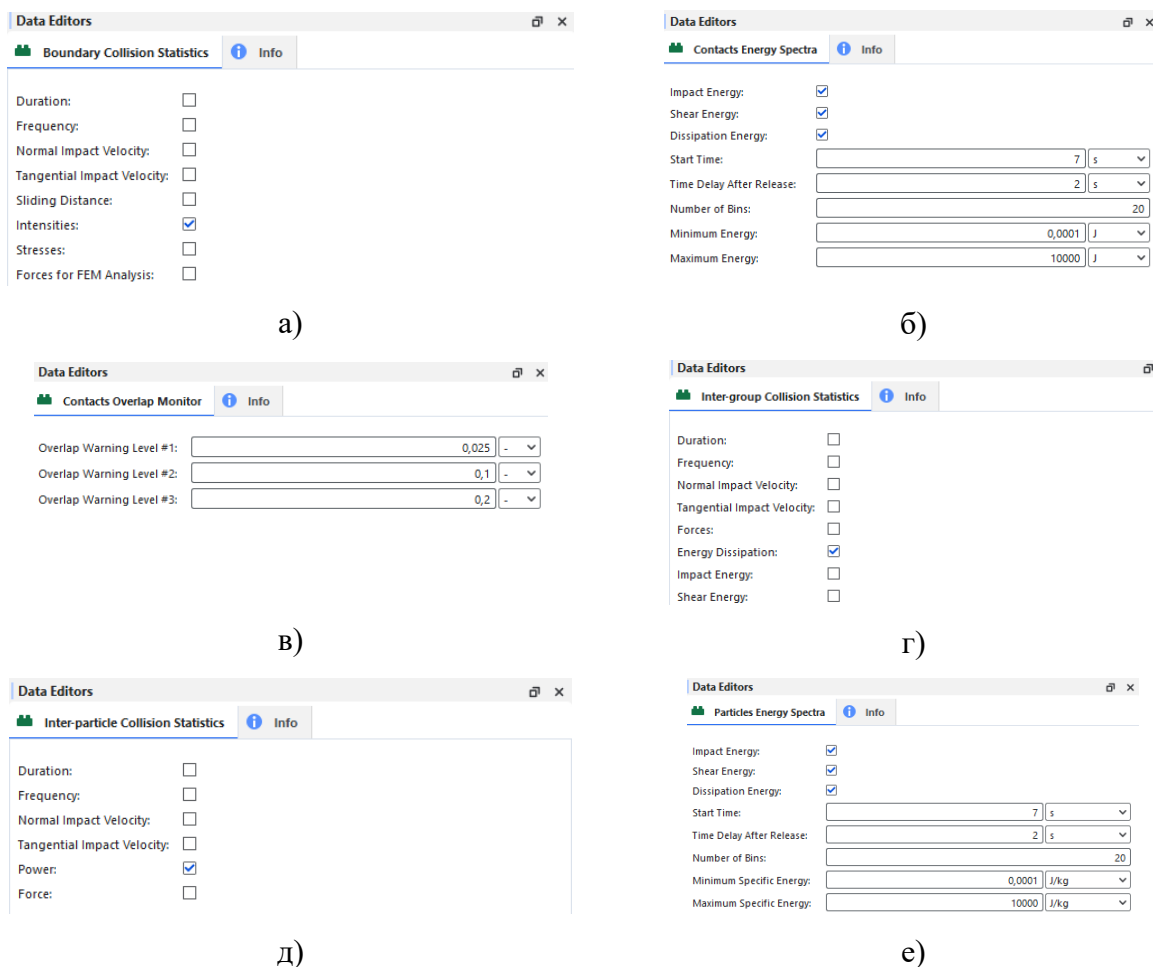


Рисунок 3.6 – Опции подключенных модулей:

- а – «*Boundary Collision Statistics*»; б – «*Contacts Energy Spectra*»;
 в – «*Contacts Overlap Statistics*»; г – «*Inter-group Collision Statistics*»;
 д – «*Inter-particle Collision Statistics*»; е – «*Particles Energy Spectra*»

В модуле «*Boundary Collision Statistics*» («Статистика столкновений границ») (рис. 3.6, а) активируется опция «*Intensities*» («Интенсивности»).

В модуле «*Contacts Energy Spectra*» (рис. 3.6, б) («Энергетические спектры столкновений») активируются опции «*Impact Energy*» («Энергия удара»), «*Shear Energy*» («Энергия сдвига») и «*Dissipation Energy*» («Энергия рассеивания»).

В модуле «*Contacts Overlap Statistics*» («Статистика совпадения столкновений») (рис. 3.6, в) в поле «*Overlap Warning Level #1*» («Уровень

предупреждения о перекрытии #1») задается значение «0,025», в поле «*Overlap Warning Level #2*» («Уровень предупреждения о перекрытии #2») задается значение «0,1», в поле «*Overlap Warning Level #3*» («Уровень предупреждения о перекрытии #3») задается значение «0,2».

В модуле «*Inter-group Collision Statistics*» («Статистика столкновений границ») (рис. 3.6, г) активируется опция «*Dissipation Energy*» («Энергия рассеивания»).

В модуле «*Inter-particle Collision Statistics*» («Статистика столкновений частиц») (рис. 3.6, д) активируется опция «*Power*» («Мощность»).

В модуле «*Particles Energy Spectra*» («Энергетические спектры частиц») (рис. 3.6, е) активируются опции «*Impact Energy*» («Энергия удара»), «*Shear Energy*» («Энергия сдвига») и «*Dissipation Energy*» («Энергия рассеивания»).

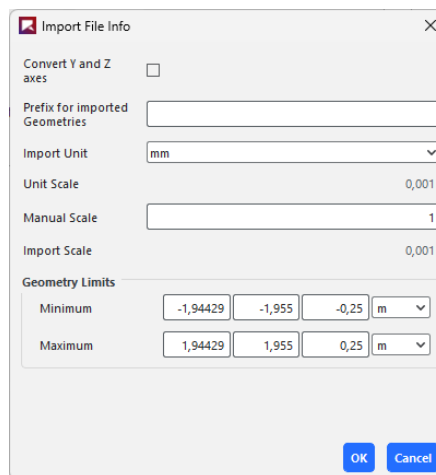


Рисунок 3.7 – Диалоговое окно «*Import File Info*» («Информация об импорте файла»)

Далее в блоке «*Geometries*» («Геометрия») выполняется импорт разработанной в системе автоматизированного проектирования *Siemens NX* геометрической модели. В появившемся диалоговом окне «*Import File Info*» («Информация об импорте файла») из раскрывающегося списка «*Import Unit*» («Единицы измерения импорта») указывается «*mm*» (рис. 3.7).

После импорта геометрической модели в блоке «*Motion Frames*» («Кадры движения») (рис. 3.8) в разделе «*Motions*» («Движения») создается тип движения «*Rotation*» («Вращение»), в поле «*Start Time*» («Время начала») задается время начала движения геометрической модели «*4 s*», в поле «*Initial Angular Velocity*»

(«Начальная угловая скорость») задается частота вращения барабана барабанной шаровой мельницы «46,51» об/мин.

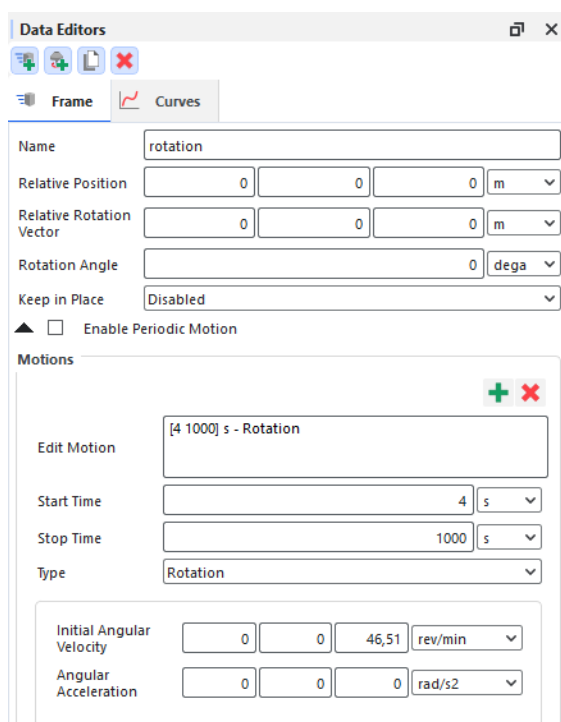


Рисунок 3.8 – Задание вращения

Затем задаются физико-механические свойства материалов (рис. 3.9) для каждой из пар контактов, для футеровки выбран пластик *PETG*, для мелющих тел выбрана сталь ШХ-15, измельчаемый материал цементный клинкер.

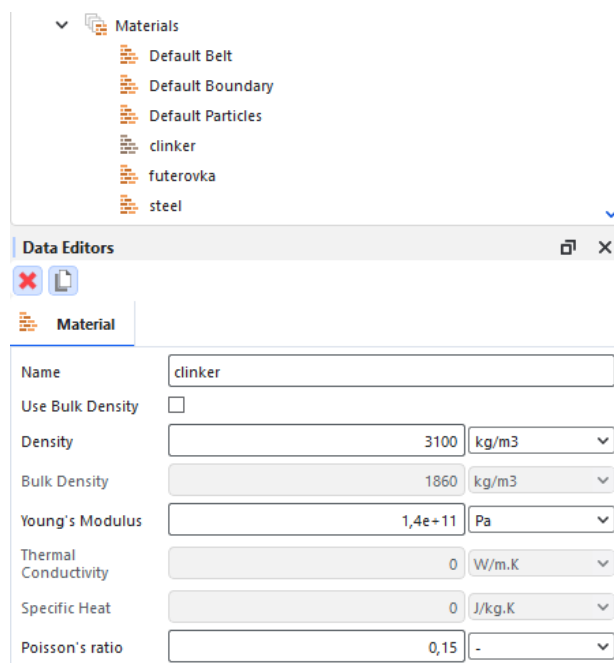


Рисунок 3.9 – Создание материалов и их физико-механических свойств

В таблице 3.2 приведены физико-механические свойства материалов для каждой из пар контактов.

Таблица 3.2 – Физико-механические свойства материалов футеровки, мелющих тел и измельчаемого материала

Наименование параметра	Футеровка	Мелющие тела	Измельчаемый материал
Наименование материала	Пластик PETG	Сталь ШХ-15	Цементный клинker
Плотность, кг/м ³	1270	7812	3100
Модуль Юнга, Па	2·10 ⁸	2,1·10 ¹¹	1,4·10 ¹¹
Коэффициент Пуассона	0,38	0,3	0,15

Далее в блоке «*Materials Interactions*» («Взаимодействие материалов») создаются параметры взаимодействия каждой пары контактов, которые приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры взаимодействия материалов

Наименование параметра	Наименование пары контактов				
	Клинкер-клинкер	Мелющие тела-мелющие тела	Мелющие тела-клинкер	Мелющие тела-футеровка	Клинкер-футеровка
Коэффициент статического трения	0,7	0,4	0,6	0,5	0,7
Коэффициент динамического трения	0,55	0,1	0,5	0,5	0,55
Коэффициент восстановления	0,5	0,68	0,5	0,5	0,5

Следующим шагом является создание частиц измельчаемого материала и мелющей загрузки (рис. 3.11). Для этого в блоке «*Particles*» («Частицы») в разделе «*Particle*» («Частица») задается наименование частицы, в поле «*Diameter*» задается значение диаметра частицы «0,005 m». Аналогичным образом создаются остальные частицы.

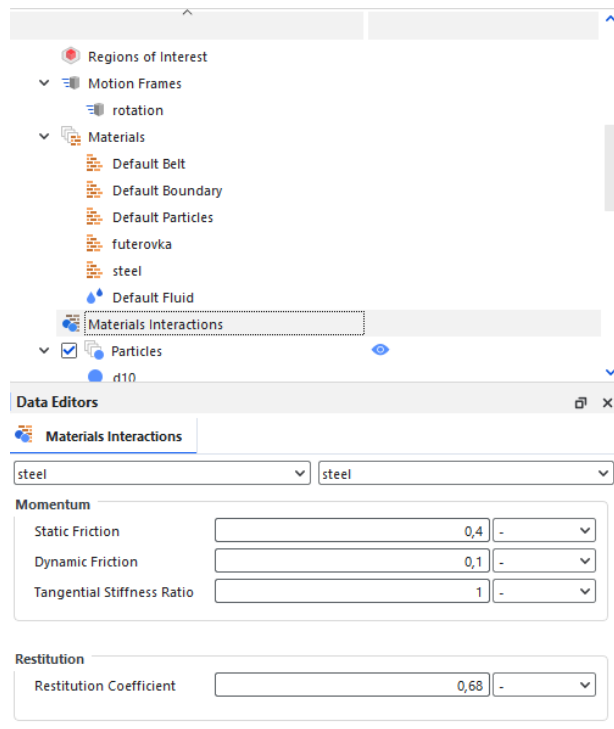


Рисунок 3.10 – Задание параметров взаимодействия для пары контактов «Мелющие тела-мелющие тела»

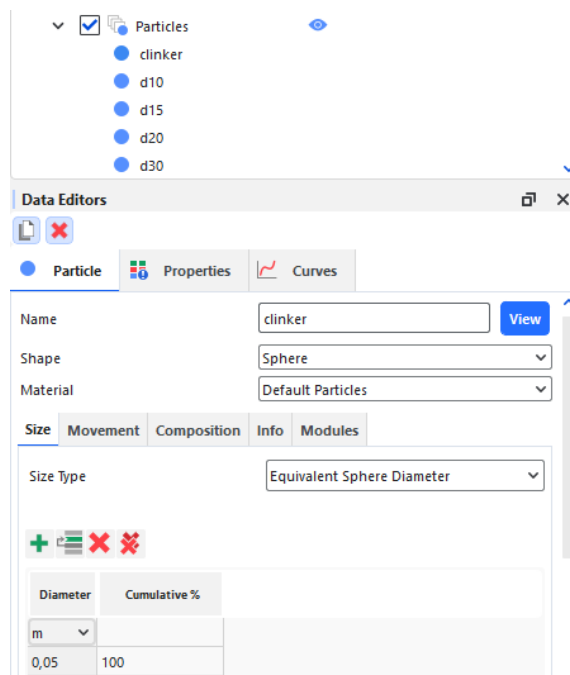


Рисунок 3.11 – Создание частиц измельчаемого материала и мелющей загрузки

Далее в блоке «*Inlets and Outlets*» («Входы и выходы») создается «*Volumetric Inlet*» («Объемный вход») для которого в разделе «*Particles*» («Частицы») задается имя «*zagruzka*» (рис. 3.12), и затем задается тип частиц и их масса (рис. 3.12).

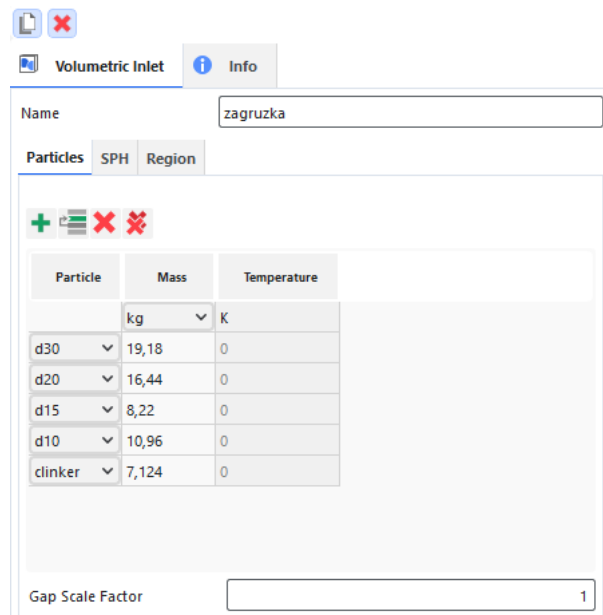


Рисунок 3.12 – Задание частиц для «*Volumetric Inlet*» («Объемный вход»)

Затем на вкладке «*Region*» («Область») устанавливается флажок на импортированной ранее геометрии «*melnitca*» (рис. 3.13), и устанавливается флажок «*Use Geometries to Compute*» («Использовать геометрию для вычисления»).

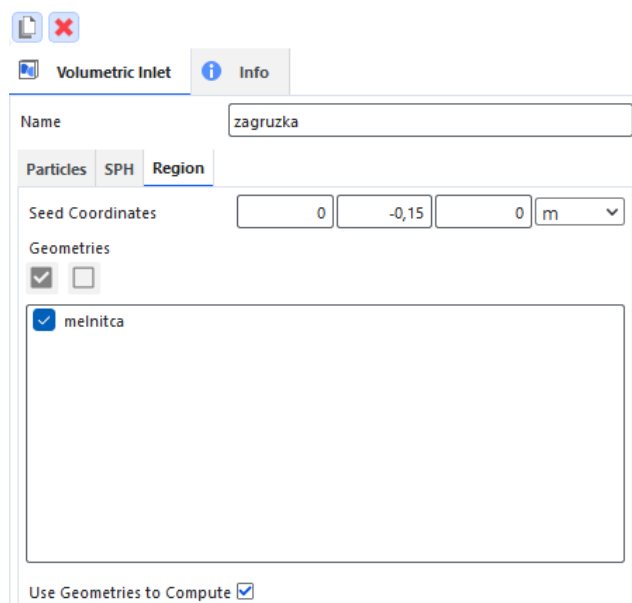


Рисунок 3.13 – Задание параметров для «*Region*» («Область»)

Далее в блоке «*Domain Settings*» («Настройки области») из раскрывающегося списка «*Periodic Domain Type*» («Периодический тип области») выбирается опция «*Cartesian*» («Декартово»), для функции «*Periodic Direction*» («Периодическое направление») устанавливается флажок «*Z*» (рис. 3.14).

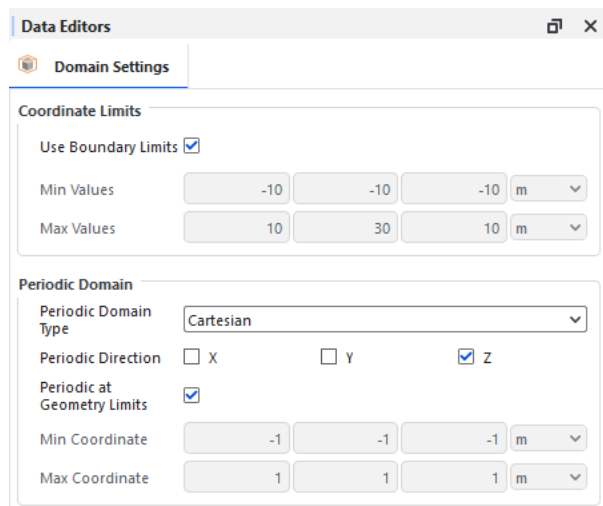


Рисунок 3.14 – Задание параметров для «*Domain Settings*» («Настройки области»)

Затем создаются параметры решателя цифрового моделирования в блоке «*Solver*» («Решатель») задается время моделирования «*100 s*» (рис. 3.15), на вкладке «*General*» («Общие») в разделе «*Execution*» («Исполнение») в раскрывающемся списке «*Simulation Target*» («Цель моделирования») устанавливается «*GPU*» для ускорения процесса цифрового моделирования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы (рис. 3.16).

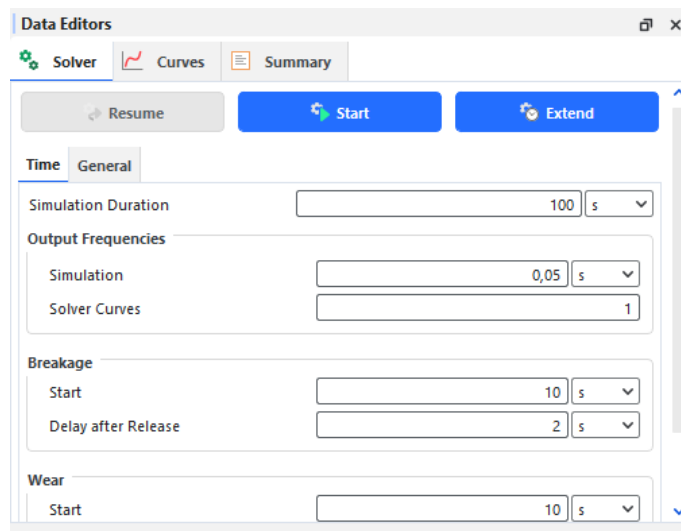


Рисунок 3.15 – Задание параметров для «*Solver*» («Решатель»)

После завершения процесса цифрового моделирования осуществляется анализ результатов при установившемся режиме работы барабанной шаровой мельницы, который достигается в момент, когда средние координаты всех частиц клинкера и мелющих тел по вертикальной и горизонтальной осям приходят к условно неизменным значениям (рис. 3.17).

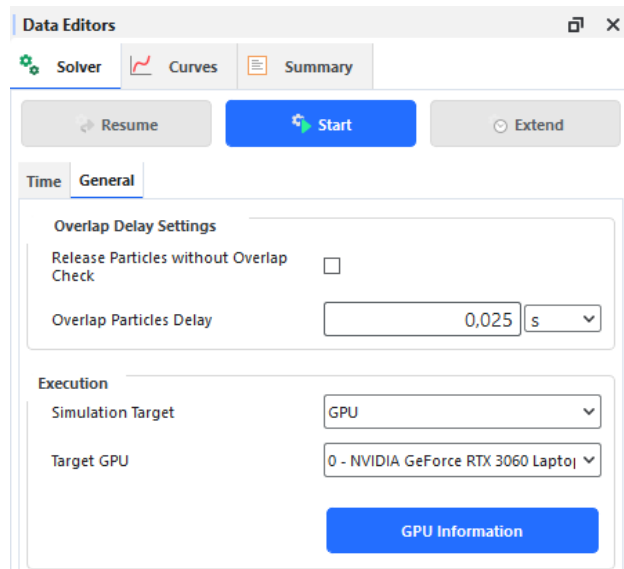


Рисунок 3.16 – Задание параметров для «Simulation Target» («Цель моделирования»)

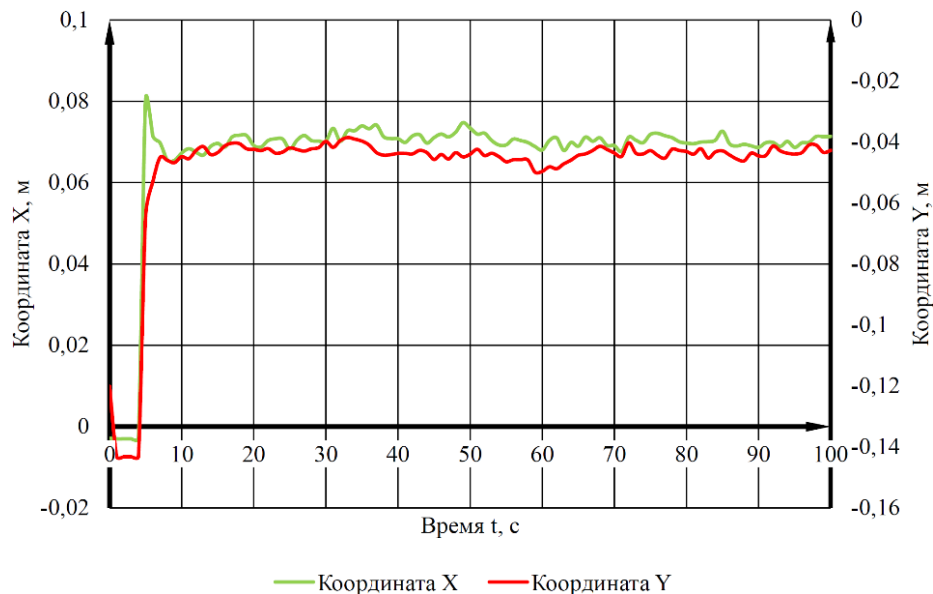


Рисунок 3.17 – График выхода барабанной шаровой мельницы в установившийся режим работы при $h=20$ мм, $t=16$ ед., $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин

В установившийся режим работы мельница входит после 10 с, исследование режима работы барабанной шаровой мельницы, таким образом осуществляется в период времени с 10 с по 100 с.

В ходе цифрового моделирования определена полезная мощность необходимая барабану лабораторной барабанной шаровой мельницы $\varnothing 0,5 \times 0,295$ м для приведения мелющей загрузки в движение.

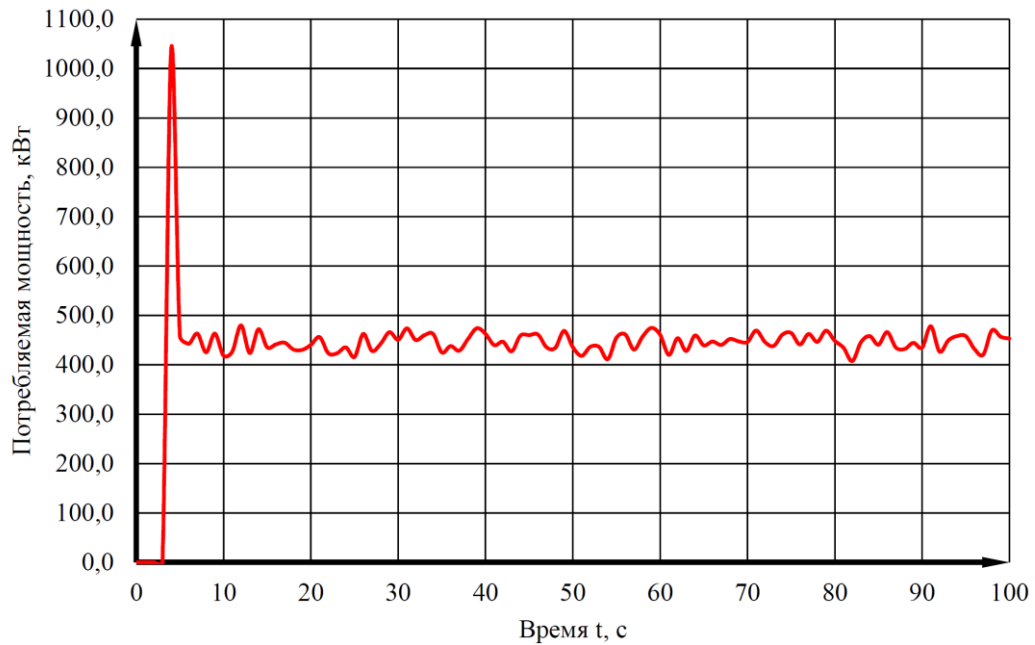


Рисунок 3.18 – График потребляемой мощности моделью мельницы

С учетом КПД электродвигателя (составляет 0,85), КПД клиноременной передачи (составляет 0,95), КПД червячного редуктора (составляет 0,64) определена потребляемая мощность привода барабанной шаровой мельницы. После достижения установившегося режима работы лабораторной барабанной шаровой мельницы среднее значение потребляемой мощности привода составляет 445,90 Вт (рис. 3.18).

В сложившейся практике интерпретации результатов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы на основе цифрового моделирования ключевым методологическим приемом выступает анализ траекторий движения мелющих тел. В рамках существующих подходов к анализу траекторий движения мелющих тел в поперечном сечении барабана мельницы принято представлять их перемещение в виде сфер (рис. 3.19, а) или векторов (рис. 3.19, б) на протяжении всех временных шагов численного моделирования. Подобная стратегия анализа отличается неоправданной громоздкостью и недостаточной точностью, что существенно затрудняет определение рациональных режимов движения мелющей загрузки.

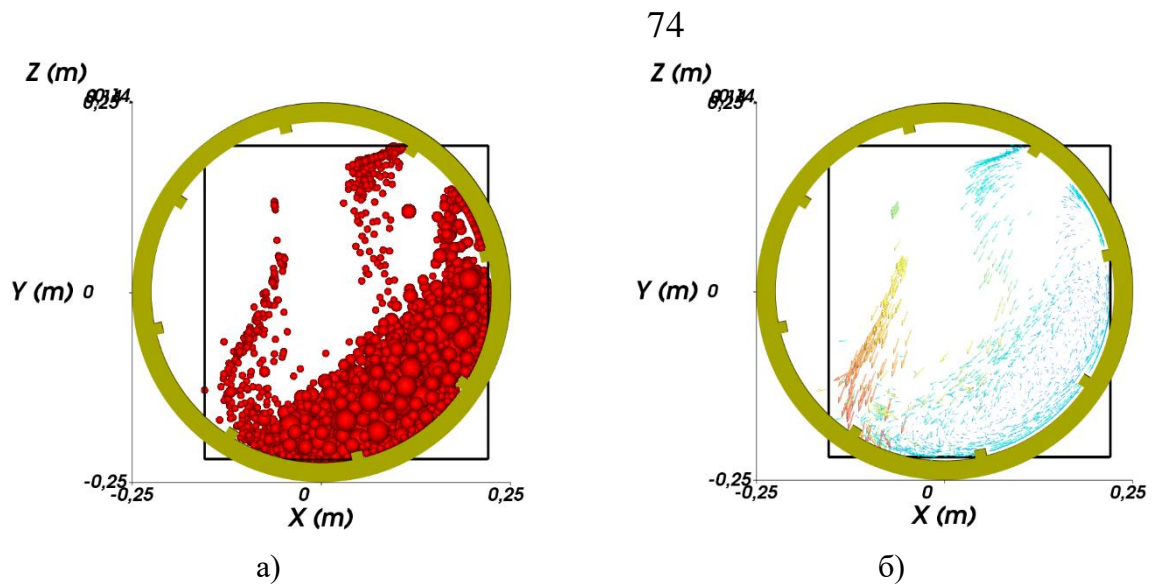


Рисунок 3.19 – Визуализация движения мелющей загрузки:

а – в виде сфер; б – в виде векторов

В рамках настоящего исследования предлагается производить анализ траекторий движения мелющих тел на избранных временных интервалах (расчетных шагах) цифрового моделирования с использованием специализированного программного обеспечения.

Таким образом, создается опция «*Particles Trajectory*» («Траектория частиц»), далее в поле «*Number of Timesteps*» («Количество временных шагов») задается значение «5», означающее что для каждой частицы траектория будет строиться на основе 5 временных шагов. После этого в поле «*Particle Stride*» («Шаг частицы») задается значение «2», означающее, что траектория будет строиться для каждой 2 частицы. Далее с помощью команды «*Update Particles Selection*» («Обновить выбор частиц») осуществляется создание и отображение траекторий в графическом окне (рис. 3.20).

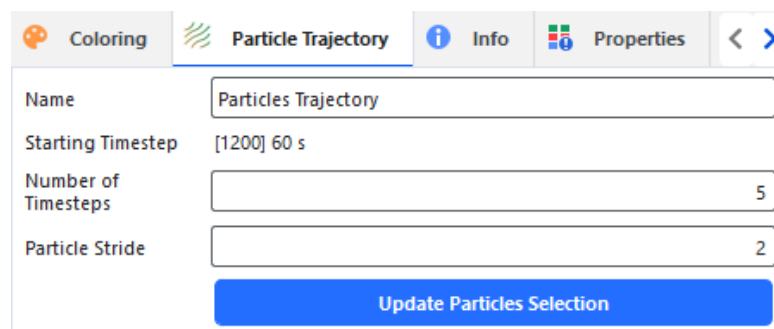


Рисунок 3.20 – Создание траекторий частиц

На рисунке 3.21 представлено отображение траекторий всех частиц, заданных при цифровом моделировании в графическом окне.

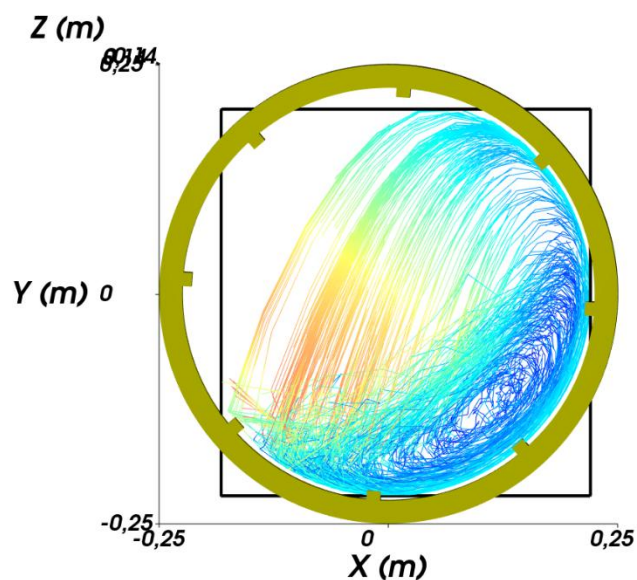


Рисунок 3.21 – Визуализация траекторий частиц

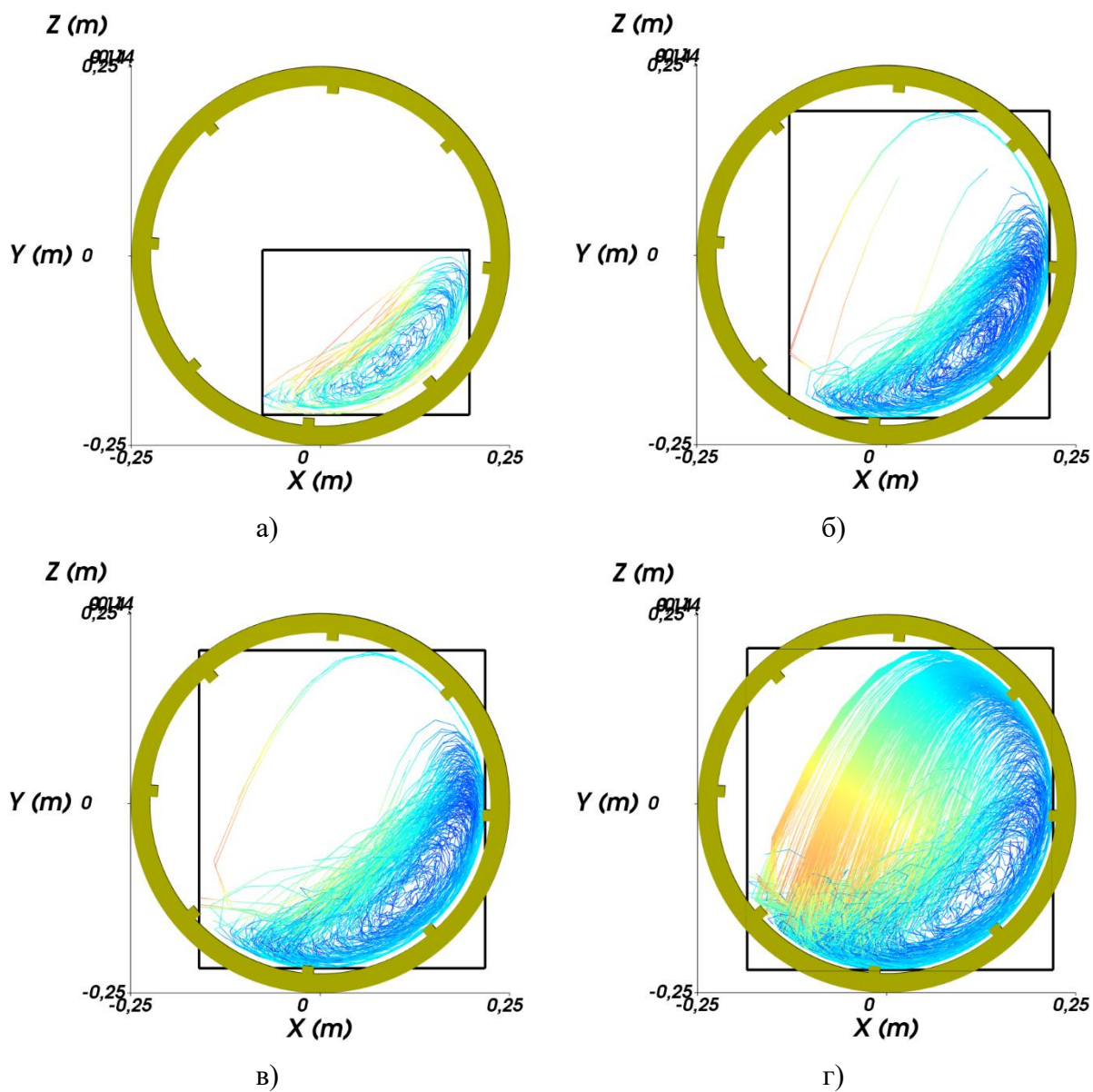


Рисунок 3.22 – Траектории движения частиц каждой группы:

а – диаметром 30 мм; б – диаметром 20 мм; в – диаметром 15 мм; г – диаметром 10 мм

В промышленности большой интерес представляет анализ траекторий движения каждой группы частиц мелющей загрузки с целью определения застойных зон и эффективности работы мелющих тел каждого диаметра. Для достижения этой цели предложено применение фильтров групп частиц каждого диаметра и создания их траекторий. На рисунке 3.22 представлены траектории движения мелющих тел каждого диаметра при использовании одинарного прокатного профиля футеровки.

Так из рисунка 3.22а видно, что шары диаметром 30 мм работают в каскадном режиме, при этом известно, что для измельчения частиц материала требуется ударное воздействие шара большего диаметра на частицу материала. При этом, шары диаметром 20 мм и 15 мм начинают работать в водопадном режиме работы (рис. 3.22, б, в). Следует отметить, что шары диаметром 20 мм работают в водопадном и каскадном режимах (рис. 3.22, б, в). Шары диаметром 10 мм вовлекаются в водопадный режим работы с большей интенсивностью (рис. 3.22, г), однако, шары меньшего диаметра должны работать в каскадном режиме, чтобы измельчать материал истиранием. Учитывая, что необходимо обеспечить работу мелющих тел большего диаметра в водопадном режиме работы, а меньшего диаметра в каскадном режиме, определение рационального профиля футеровки является актуальной и наукоемкой задачей.

Таким образом, представленная методика цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы и режимов работы мелющей загрузки обеспечивает возможность проведения многовариантного моделирования и определения рациональных режимов работы [86, 87].

3.5 Результаты цифрового моделирования.

3.5.1 Анализ траекторий и скорости движения мелющих тел.

В ходе цифрового моделирования поперечного профиля футеровки барабанной шаровой мельницы с учетом режимов работы мелющей загрузки было рассчитано 625 подготовленных в соответствии с планом моделей, для каждой из которых определены кинетические и энергетические параметры мелющей загрузки. Построенные модели представляют собой цифровые двойники

технологического процесса измельчения, реализуемого в барабанной шаровой мельнице типоразмера $\varnothing 0,5 \times 0,295$ м, и характеризуются высоким уровнем адекватности по отношению к физическому объекту.

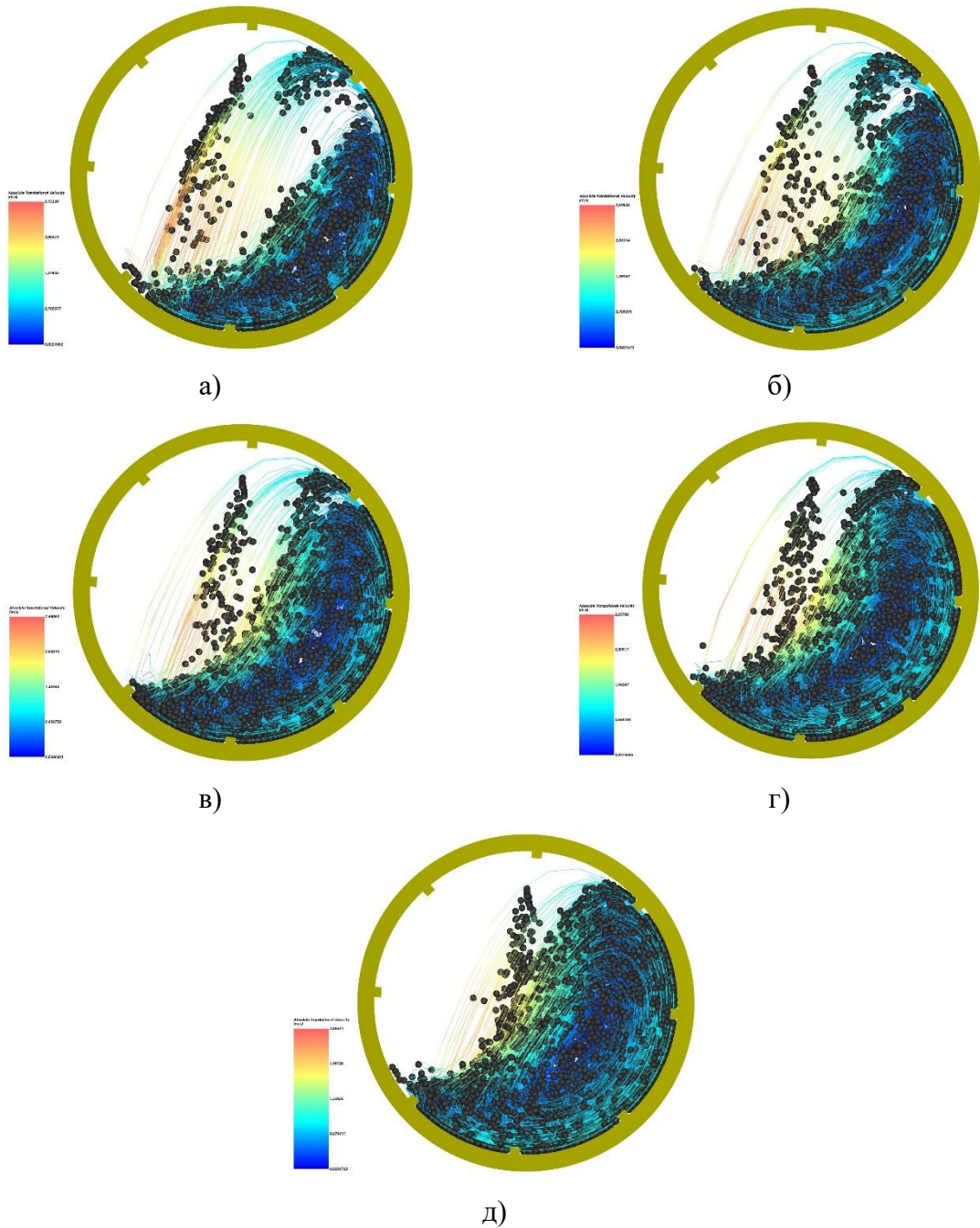


Рисунок 3.23 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=8$ ед., $h=10$ мм, $n=40,51$ об/мин:
а – $\varphi=0,20$; б – $\varphi=0,25$; в – $\varphi=0,30$; г – $\varphi=0,35$; д – $\varphi=0,40$

При частоте вращения $n=40,51$ об/мин, количестве выступов футеровки $t=8$ ед., высоте выступов футеровки $h=10$ мм и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ максимальная скорость движения мелющих тел составляет 2,896 м/с (рис. 3.23, а).

При увеличении коэффициента загрузки до $\varphi=0,25$ максимальная скорость движения мелющих тел уменьшилась до 2,83 м/с, то есть на 2,28% (рис. 3.23, б). С увеличением коэффициента загрузки до $\varphi=0,30$, максимальная скорость увеличивается до 2,85 м/с (рис. 3.23, в), то есть на 0,7 %.

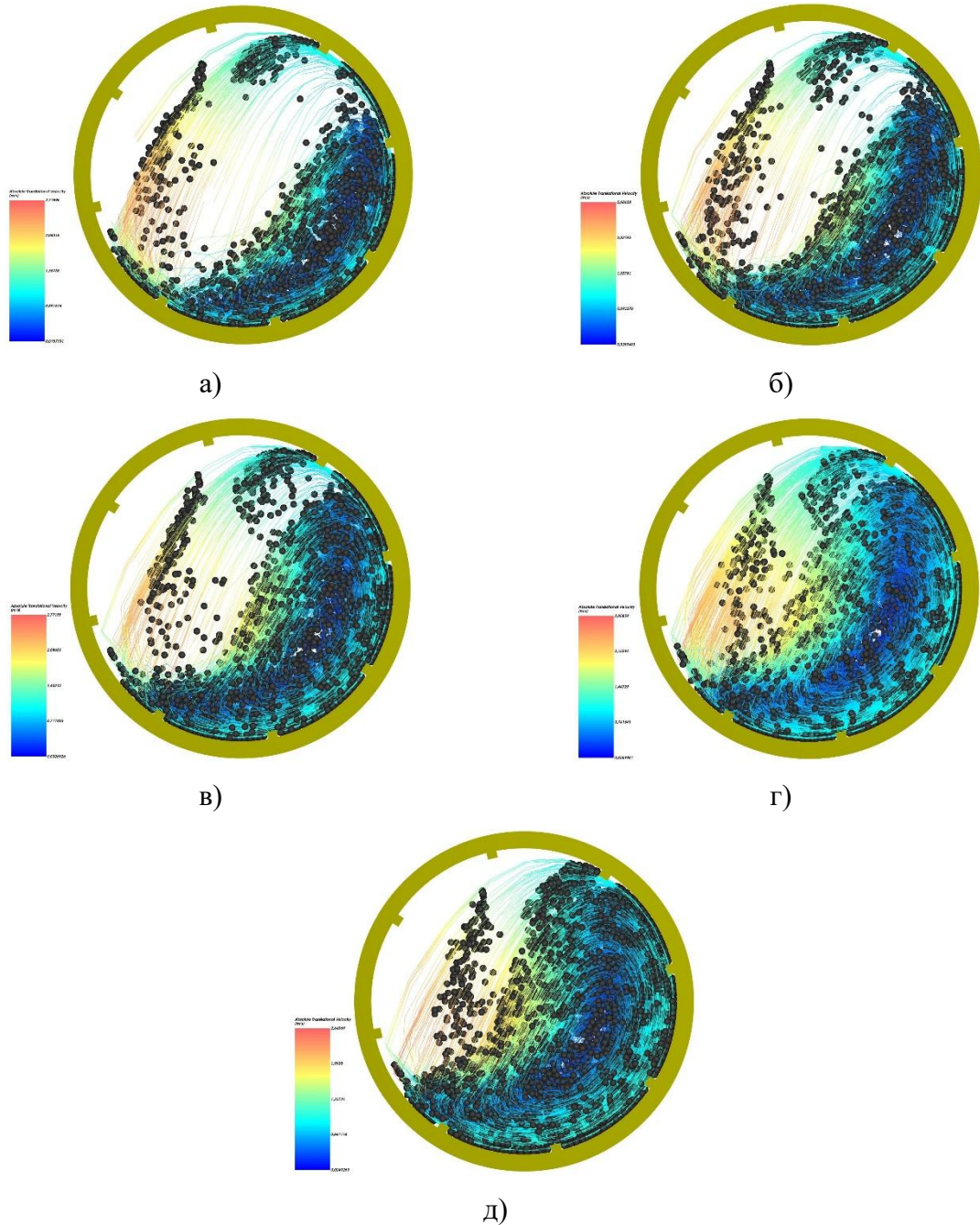


Рисунок 3.24 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=8$ ед., $h=10$ мм, $n=46,51$ об/мин:

а – $\varphi=0,20$; б – $\varphi=0,25$; в – $\varphi=0,30$; г – $\varphi=0,35$; д – $\varphi=0,40$

При коэффициенте загрузки $\varphi=0,35$ максимальная скорость движения мелющих тел уменьшилась до 2,83 м/с, то есть на 0,7% (рис. 3.23, г). Минимальная

скорость движения мелющих тел равная 2,69 м/с достигается при коэффициенте загрузки $\varphi=0,40$.

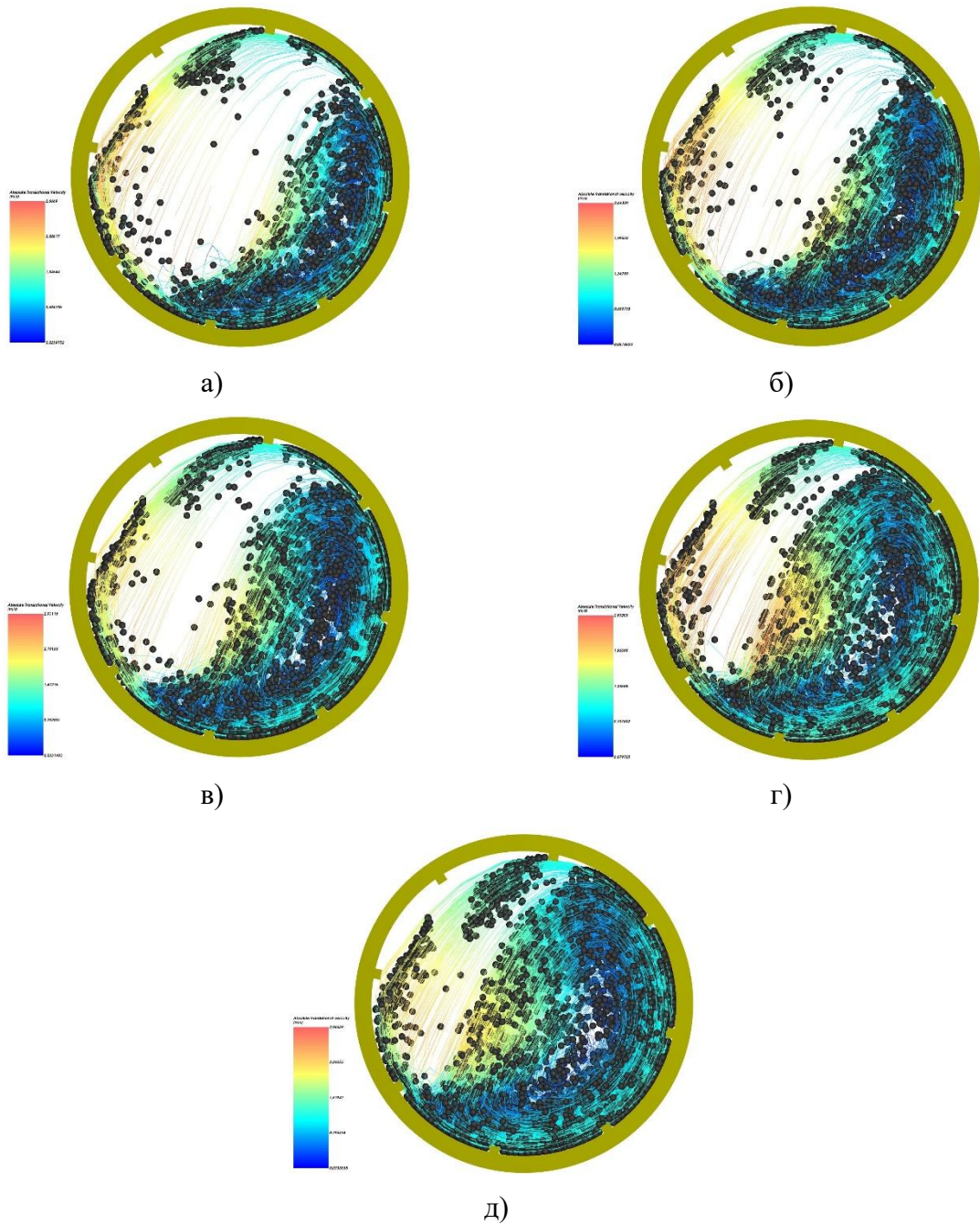


Рисунок 3.25 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости

мелющих тел при $t=8$ ед., $h=10$ мм, $n=52,51$ об/мин:

а – $\varphi=0,20$; б – $\varphi=0,25$; в – $\varphi=0,30$; г – $\varphi=0,35$; д – $\varphi=0,40$

Такое изменение максимальной скорости движения мелющих тел объясняется незначительным влиянием количества выступов футеровки. Уменьшение максимальной скорости мелющих тел объясняется увеличением давления верхних слоев мелющей загрузки на нижние слои [88].

При количестве выступов футеровки $t=8$ ед., высоте выступов футеровки $h=10$ мм и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ с увеличением частоты вращения n барабана мельницы с 40,51 об/мин до 46,51 об/мин максимальная скорость движения мелющих тел незначительно уменьшается на 1,3% (рис. 3.24).

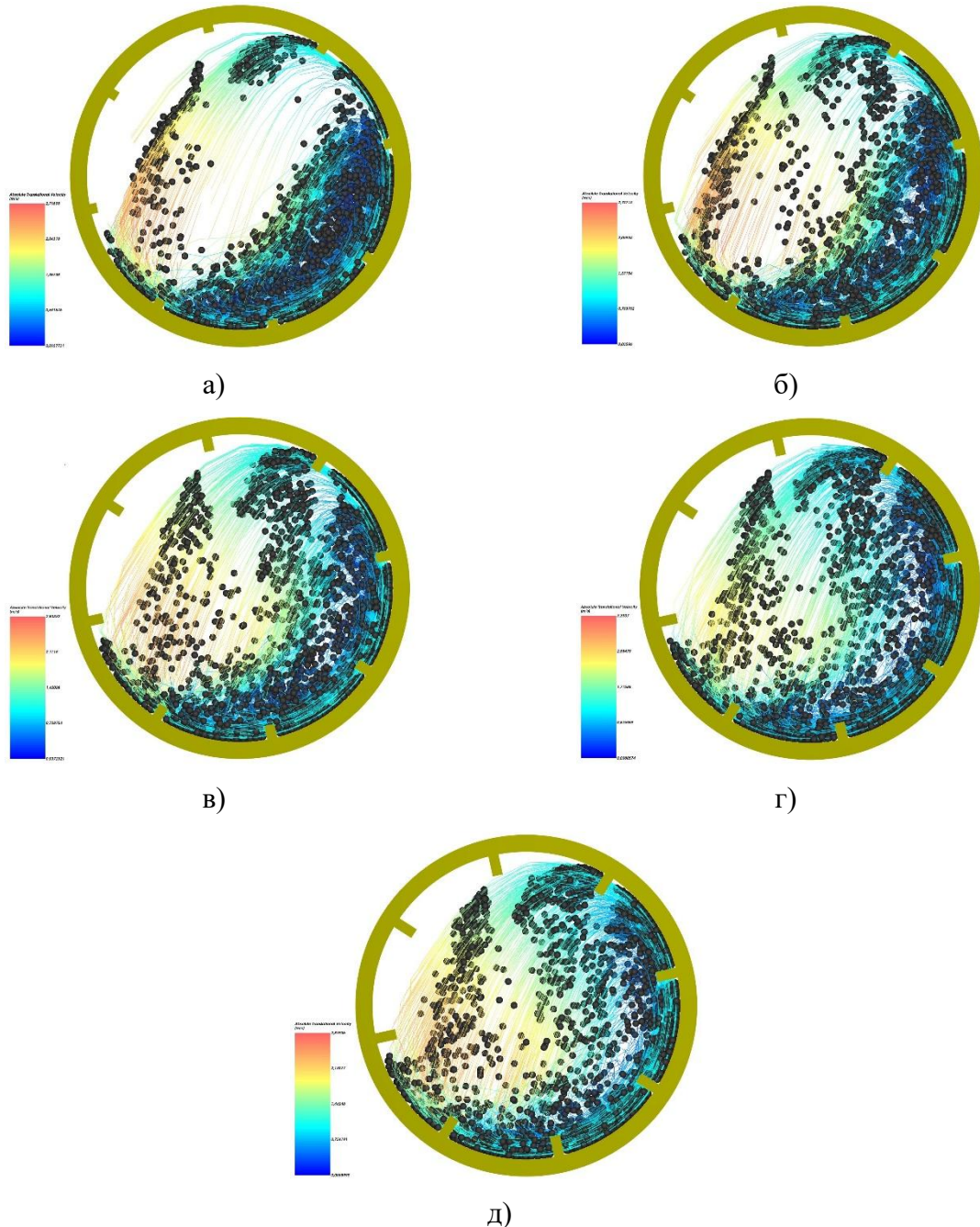


Рисунок 3.26 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=8$ ед., $\varphi=0,20$, $n=46,51$ об/мин:

а – $h=10$ мм; б – $h=15$ мм; в – $h=20$ мм; г – $h=25$ мм; д – $h=30$ мм

С увеличением частоты вращения барабана мельницы n до 52,51 об/мин изменение максимальной скорости движения мелющих тел не наблюдается

(рис. 3.25), при этом увеличивается интенсивность ударного воздействия мелющих тел на футеровку. Из выше сказанного можно сделать вывод, что частоты вращения равные 49,51 об/мин и 52,51 об/мин не являются рациональными, и при их задании увеличивается интенсивность ударного воздействия мелющих тел на футеровку, из-за чего снижается срок ее службы.

Наиболее стабильный режим работы мелющей загрузки обеспечивается при частоте вращения $n=46,51$ об/мин, что составляет 0,76 от критической частоты вращения.

При количестве выступов футеровки $t=8$ ед., частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ с увеличением высоты выступов футеровки с $h=10$ мм до $h=15$ мм максимальная скорость движения мелющих тел увеличивается с 2,86 м/с до 3,06 м/с, то есть на 6,99% (рис. 3.26, а-б). Увеличение высоты выступов футеровки с $h=15$ мм до $h=25$ мм не приводит к существенным изменениям максимальной скорости движения мелющих тел (рис. 3.26, б-г). Последующее увеличение высоты выступов футеровки с $h=25$ мм до $h=30$ мм приводит к увеличению максимальной скорости движения мелющих тел до 3,77 м/с, то есть на 23,2% (рис. 3.26, д). Такое существенное увеличение максимальной скорости движения мелющих тел связано с вовлечением мелющих тел диаметром 30 мм и 20 мм в водопадный режим работы (рис. 3.27).

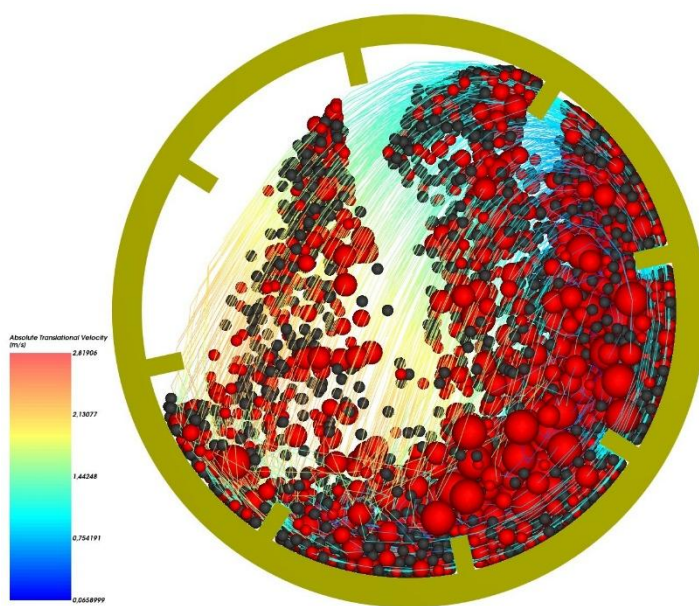


Рисунок 3.27 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=8$ ед., $\varphi=0,20$, $n=46,51$ об/мин, $h=30$ мм

При частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин, коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$, высоте выступов футеровки $h=10$ мм и количестве выступов $t=24$ ед. максимальная скорость движения мелющих тел составляет $3,05$ м/с (рис. 3.28, а), то есть на $24,4\%$ меньше чем при $t=20$ ед.

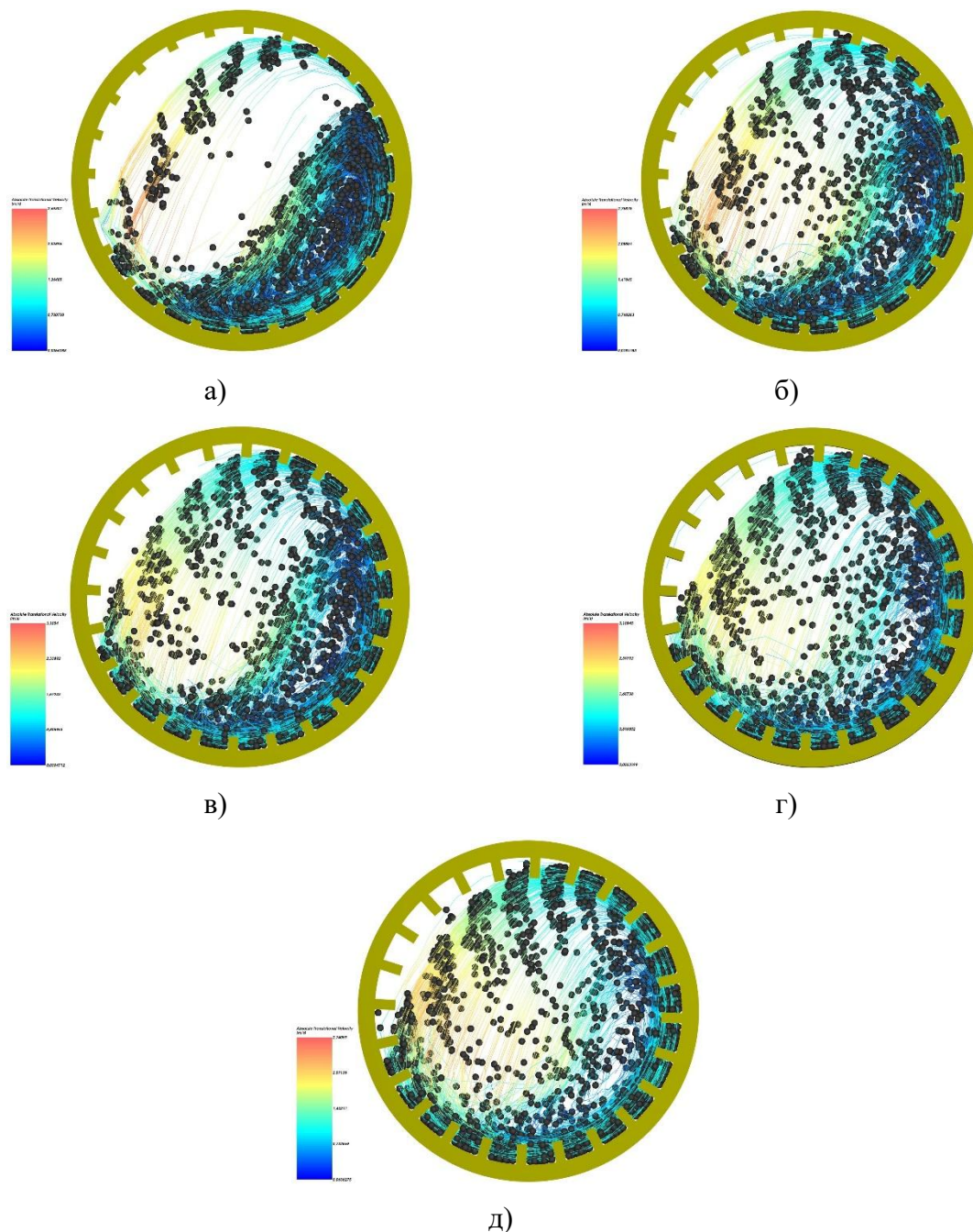


Рисунок 3.28 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=24$ ед., $\varphi=0,20$, $n=46,51$ об/мин:

а – $h=10$ мм; б – $h=15$ мм; в – $h=20$ мм; г – $h=25$ мм; д – $h=30$ мм

Это объясняется тем, что при большом значении количества выступов футеровки расстояние между соседними выступами является недостаточным для

попадания шаров на выступ и их подъема на определенную высоту. В ходе цифрового моделирования прокатной футеровки с одинарными выступами определено что рациональные режимы работы мелющей загрузки обеспечиваются при частоте вращения барабана 46,51 об/мин.

Для цифрового моделирования прокатной футеровки со двойными выступами (рис. 3.29) с высотами h_1 и h_2 частота вращения барабана мельницы принималась равной 46,51 об/мин.

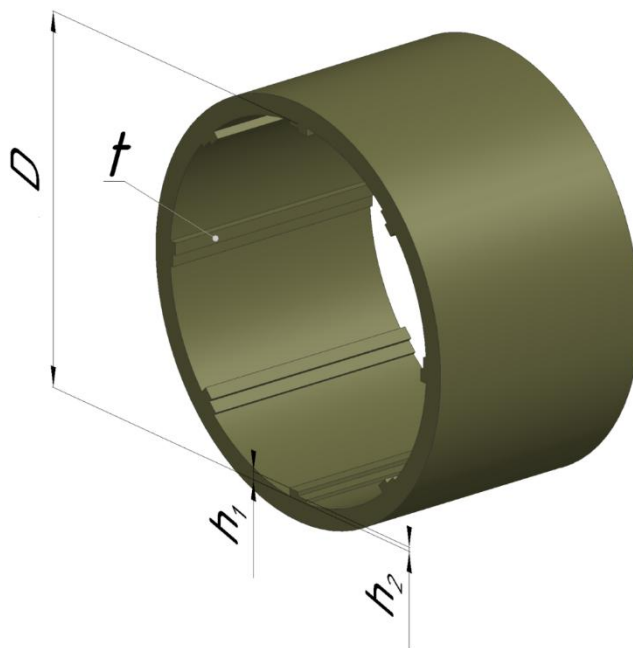


Рисунок 3.29 – Виртуальный стенд для цифрового моделирования футеровки со двойными выступами

В таблице 3.4 приведены параметры для цифрового моделирования прокатной футеровки со двойными выступами.

Таблица 3.4 – План цифрового моделирования прокатной футеровки со двойными выступами

Параметр	Обозначение	Ед. из-я	Значение				
Коэффициент загрузки мельницы мелющими телами и материалом	φ	доли ед.	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Высота выступов №1	h_1	мм	10	15	20	25	30
Высота выступов №2	h_2	мм	5	10	15	20	25

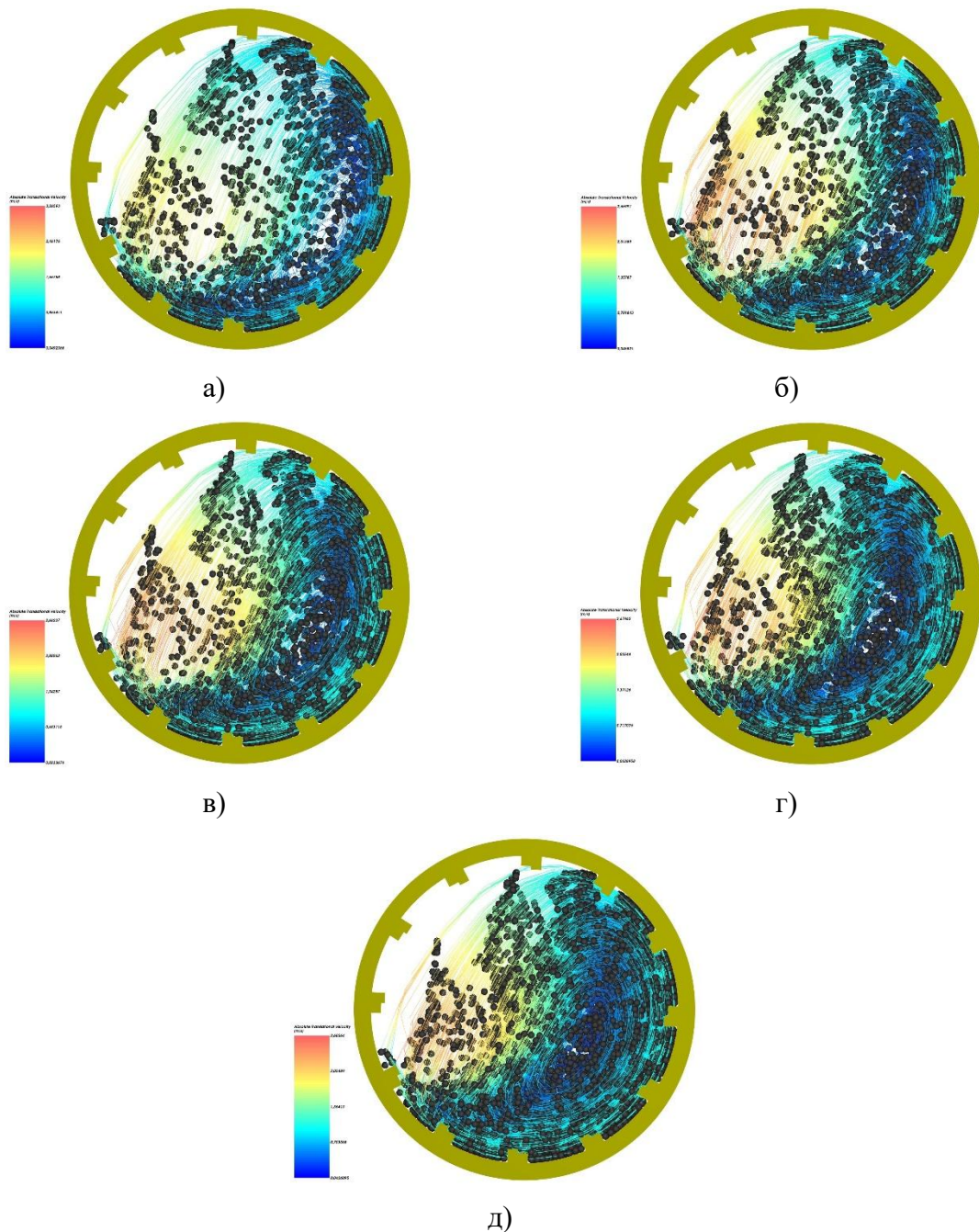


Рисунок 3.31 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм, $n=46,51$ об/мин:
 а – $\varphi=0,20$; б – $\varphi=0,25$; в – $\varphi=0,30$; г – $\varphi=0,35$; д – $\varphi=0,40$

В ходе цифрового моделирования прокатной футеровки со сдвоенными выступами определено, что при количестве выступов $t=12$ ед., высоте выступов $h_1=15$ мм и $h_2=10$ мм, частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ максимальная скорость движения мелющих тел составляет 2,94 м/с (рис. 3.30, а). С увеличением коэффициента загрузки с 0,20 до 0,40 максимальная скорость движения мелющих тел снизилась до 2,69 м/с

(рис. 3.30, д), что объясняется уменьшением количества мелющих тел большего диаметра вовлекаемых в водопадный режим работы [89, 90]. При этом, обеспечивается рациональная траектория движения мелющей загрузки.

С увеличением высоты выступов h_1 до 20 мм и h_2 до 15 мм при коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ максимальная скорость движения мелющих тел увеличивается с 2,94 м/с (рис. 3.30, а) до 2,99 м/с (рис. 3.31, а), то есть на 1,67%. Увеличение коэффициента загрузки до 0,40 приводит к увеличению максимальной скорости движения мелющих тел до 3,14 м/с (рис. 3.31, д).

В таблице 3.5 приведены параметры для цифрового моделирования волнистой футеровки с высотой выступов h и радиусом $R=1,1h$.

Таблица 3.5 – План цифрового моделирования волнистой футеровки

Параметр	Обозначение	Ед. из-я	Значение				
Коэффициент загрузки мельницы мелющими телами и материалом	φ	доли ед.	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Высота выступа	h	мм	10	15	20	25	30
Количество выступов	t	ед.	8	12	16	20	24

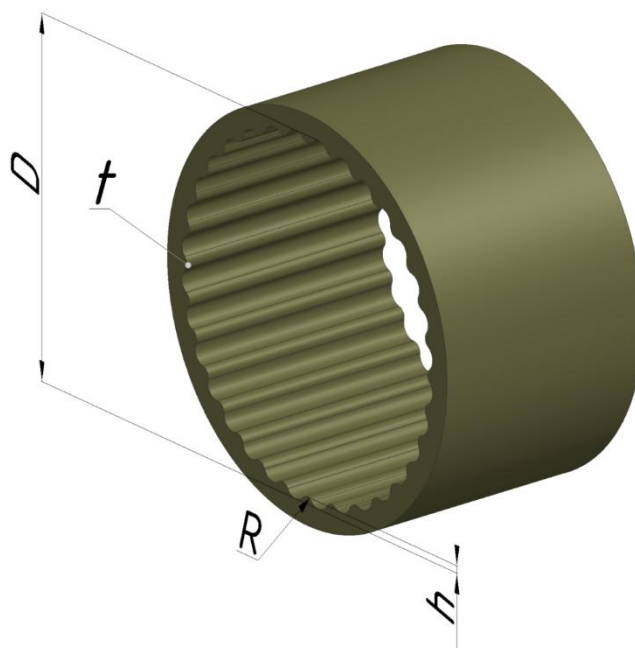


Рисунок 3.32 – Виртуальный стенд для цифрового моделирования волнистой футеровки

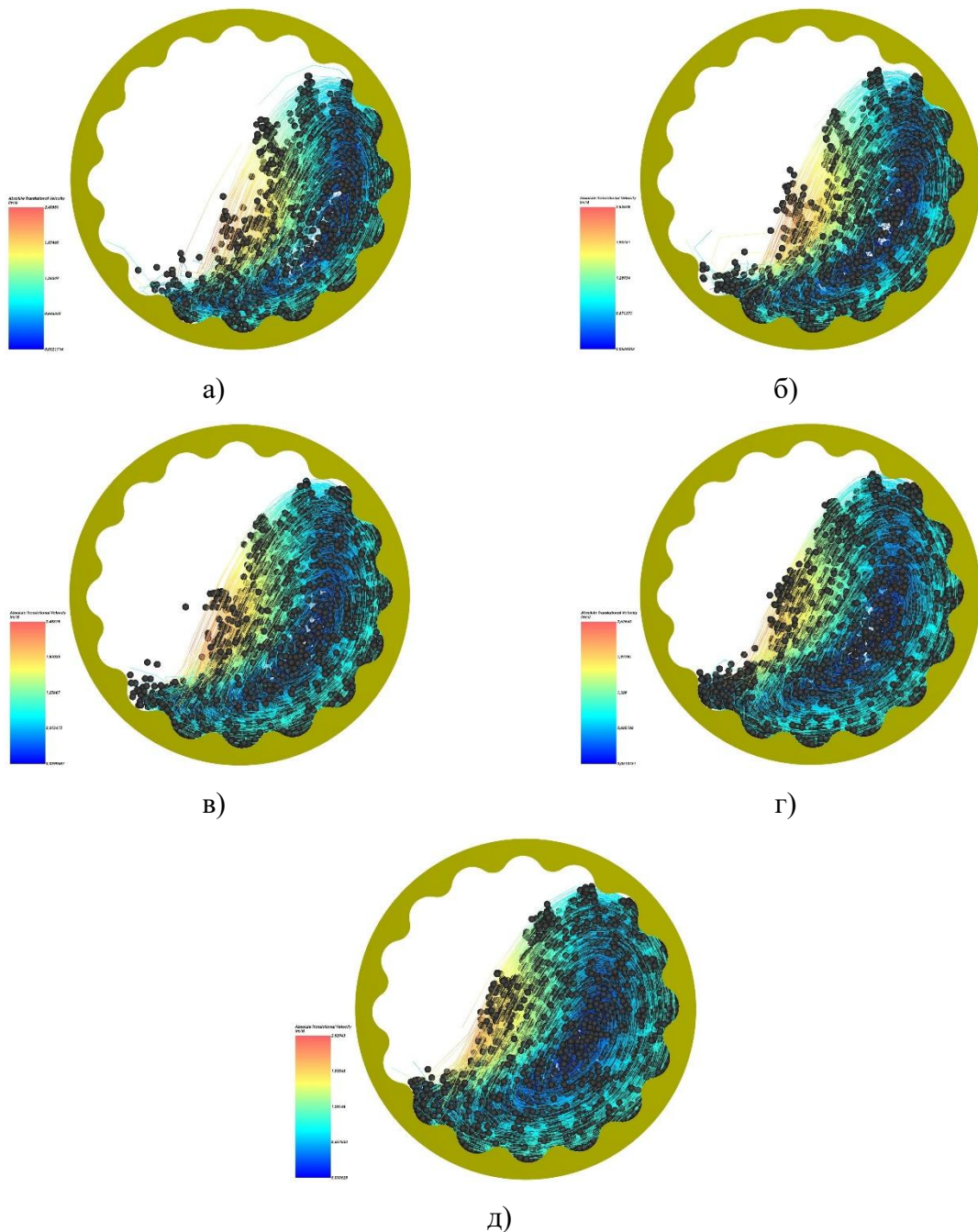


Рисунок 3.33 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=16$ ед., $h=20$ мм, $n=46,51$ об/мин:
 а – $\varphi=0,20$; б – $\varphi=0,25$; в – $\varphi=0,30$; г – $\varphi=0,35$; д – $\varphi=0,40$

В ходе цифрового моделирования волнистой футеровки определено, что при количестве выступов $t=16$ ед., высоте выступа $h=20$ мм, коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ и частоте вращения барабана мельницы 46,51 об/мин максимальная скорость движения мелющих тел составляет 2,94 м/с (рис. 3.33, а), что сравнимо со скоростью мелющих тел при использовании прокатной футеровки со сдвоенными выступами (рис. 3,30, а) с количеством выступов $t=12$ ед., высоте выступов

$h_1=20$ мм и $h_2=15$ мм. Однако видно, что при использовании волнистой футеровки мелющая загрузка работает в смешанном режиме, сохраняя падение мелющих тел по параболической траектории и снижая количество соударений мелющих тел с футеровкой. При этом увеличение коэффициента загрузки до 0,40 не приводит к изменению максимальной скорости движения мелющих тел (рис. 3.33, д).

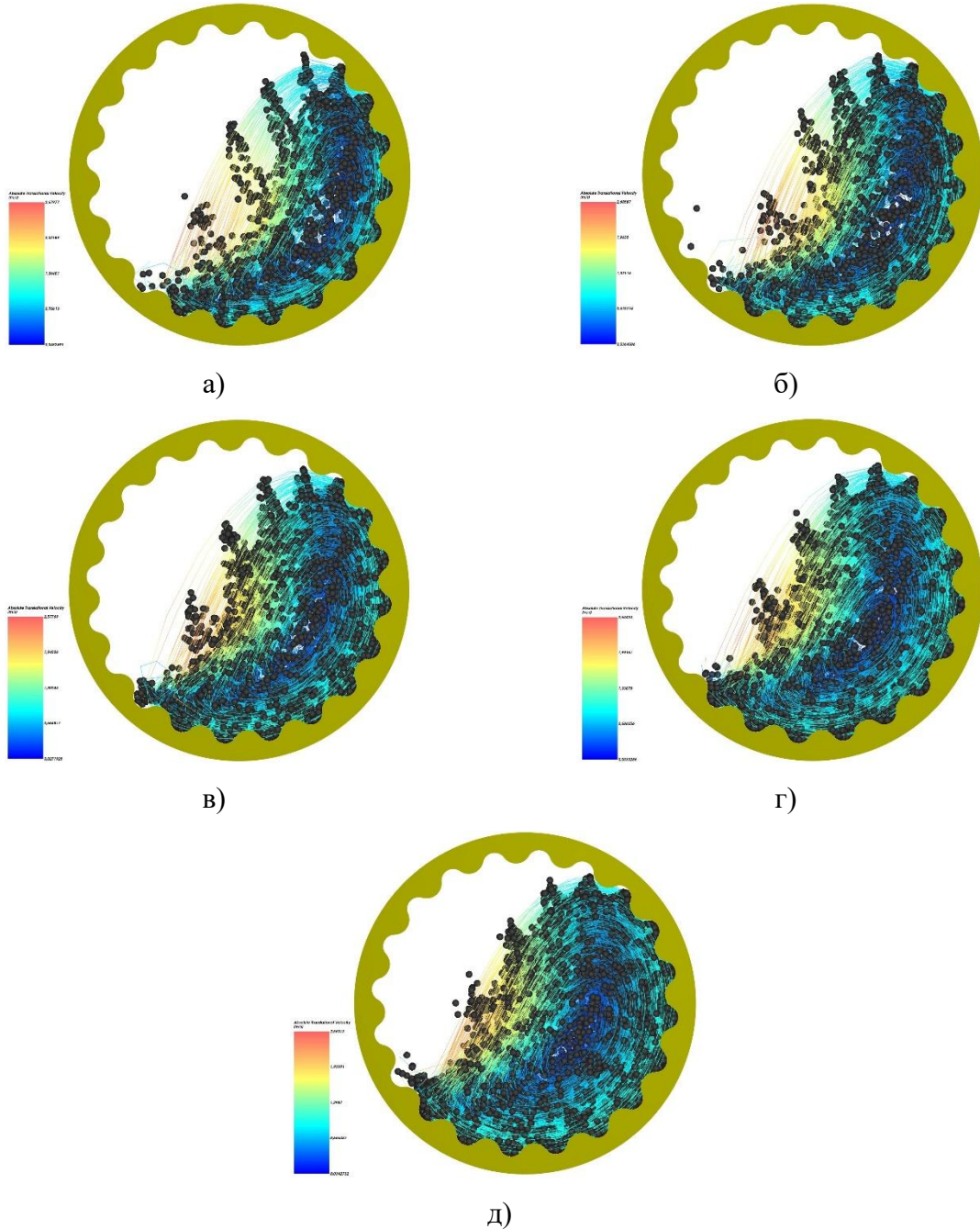


Рисунок 3.34 – Траектория движения мелющих тел и диаграмма распределения скорости мелющих тел при $t=20$ ед., $h=20$ мм, $n=46,51$ об/мин:
а – $\varphi=0,20$; б – $\varphi=0,25$; в – $\varphi=0,30$; г – $\varphi=0,35$; д – $\varphi=0,40$

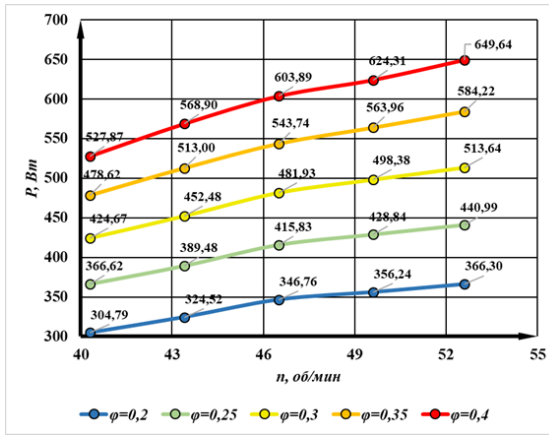
С увеличением количества выступов t до 20 ед. при высоте выступа $h=20$ мм, коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ и частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин максимальная скорость движения мелющих тел уменьшается до 2,84 м/с (рис. 3.34, а), то есть на 3,4%. При этом с увеличением коэффициента загрузки до 0,30 достигается максимальная скорость движения мелющих тел равная 3,09 м/с (рис. 3.34, д).

3.5.2 Анализ потребляемой мощности привода лабораторной барабанной шаровой мельницы.

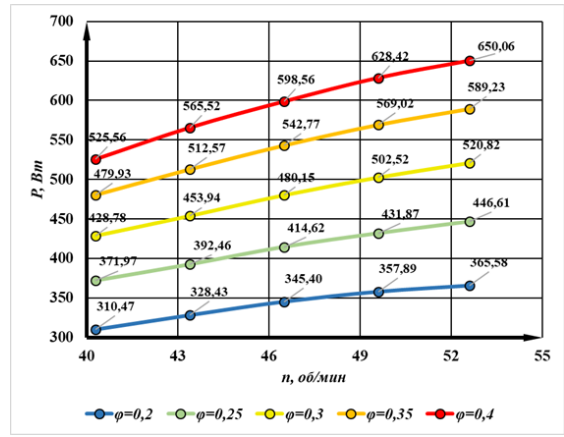
Одним из наиболее важных параметров работы лабораторной барабанной шаровой мельницы $\emptyset 0,5 \times 0,295$ м является потребляемая мощность привода мельницы, которая расходуется на приведение мелющей загрузки в движение, преодоление трения в клиноременной передаче и редукторе. Для облегчения анализа результатов цифрового моделирования, значения мощностей для каждого расчета были экспортированы в таблицу *Excel* и представлены в графическом виде.

На основе результатов цифрового моделирования произведен анализ зависимости потребляемой мощности привода P (рис. 3.35) от варьируемых параметров.

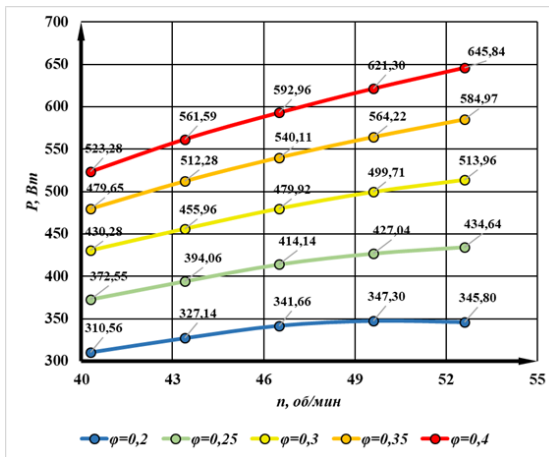
При количестве выступов $t=8$ ед. (рис. 3.35, а), коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$ и частоте оборотов барабана мельницы $n=40,51$ об/мин потребляемая мощность привода составляет 304,79 Вт. Увеличение частоты вращения барабана мельницы с 40,51 об/мин до 52,51 об/мин сопровождается ростом потребляемой мощности привода до 366,30 Вт, что соответствует приращению на 20,20% относительно исходного уровня (рис. 3.35, а). Данная закономерность, иллюстрируемая графическими зависимостями на рисунке 3.35, носит монотонный характер на всем рассматриваемом диапазоне частот вращения барабана мельницы. При этом, абсолютный максимум потребляемой мощности $P=649,51$ Вт достигается в режиме с минимальной частотой вращения $n=40,51$ об/мин и максимальным коэффициентом загрузки $\varphi=0,40$ (рис. 3.35, а).



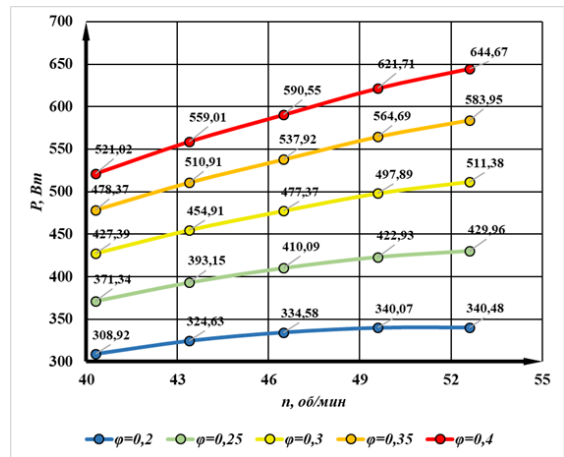
а)



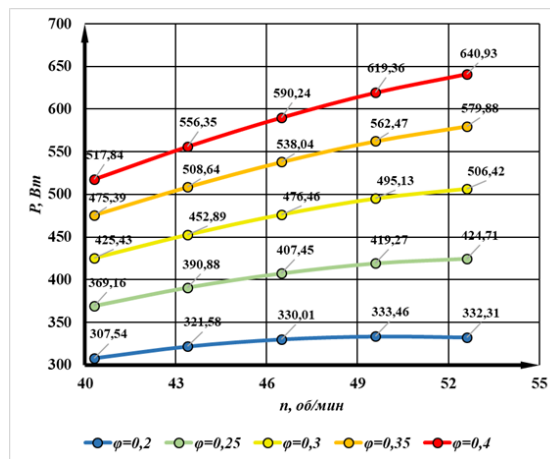
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.35 – График зависимости потребляемой мощности P от частоты вращения барабана мельницы n при различных коэффициентах загрузки φ , $h=10$ мм:

а – $t=8$ ед.; б – $t=12$ ед.; в – $t=16$ ед.; г – $t=20$ ед.; д – $t=24$ ед.

Из графика, представленного на рисунке 3.35б, видно с увеличением количества выступов t до 12 ед., при $\varphi=0,20$, $n=40,51$ об/мин потребляемая мощность привода растет до $P=310,47$ Вт. Последующее увеличение количества

выступов до 16 ед. приводит к увеличению потребляемой мощности привода до 310,56 Вт (рис. 3.35, в). С увеличением количества выступов футеровки до 24 ед. наблюдается снижение потребляемой мощности привода с 310,56 Вт до 307,54 Вт, то есть на 0,98% (рис. 3.35, д).

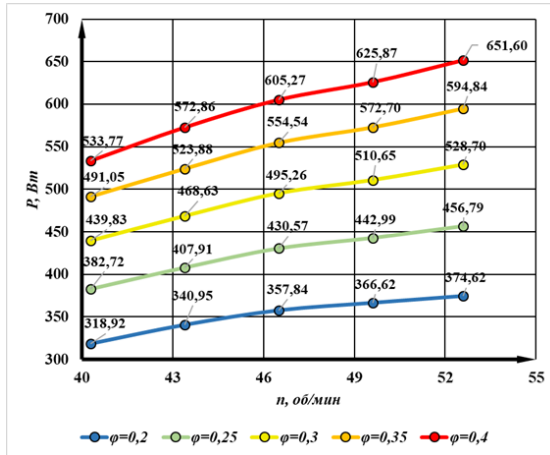
Установлено, что при фиксированных значениях частоты вращения барабана и количества выступов футеровки повышение коэффициента загрузки мельницы закономерно влечет за собой рост потребляемой мощности привода. Данная зависимость обусловлена возрастанием суммарной массы мелющей загрузки и измельчаемого материала, что требует приложения повышенного крутящего момента для обеспечения вращения барабана.

При фиксированных значениях количества выступов футеровки $t=8$ ед., частоты вращения барабана мельницы $n=40,51$ об/мин и коэффициента загрузки $\varphi=0,20$ увеличение высоты выступов h с 10 мм до 15 мм сопровождается ростом потребляемой мощности привода с 304,79 Вт (рис. 3.35, а) до 318,92 Вт (рис. 3.36, а).

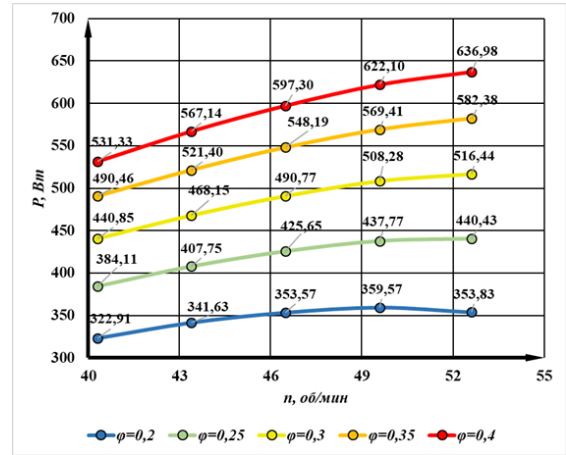
При количестве выступов $t=12$ ед., высоте выступов $h=15$ мм (рис. 3.36, б) и частоте вращения барабана мельницы $n=43,51$ об/мин потребляемая мощность привода варьируется от минимального значения $P=341,63$ Вт при $\varphi=0,20$ до максимального значения $P=567,14$ Вт при $\varphi=0,40$. Абсолютного максимума потребляемая мощность привода достигает при частоте вращения $n=52,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,40$. Вместе с тем, при увеличении количества выступов до $t=16$ ед. и частоте вращения $n=49,51$ об/мин значение потребляемой мощности начинает снижаться, и при частоте вращения барабана мельницы $n=52,51$ об/мин достигает 339,89 Вт (рис. 3.36, в). Снижение потребляемой мощности объясняется сегрегацией мелющих тел и тем, что шары большего диаметра не поднимаются на высоту отрыва шара от футеровки.

Минимальные значения потребляемой мощности привода мельницы составляют 318,92 Вт (рис. 3.36, а) при $t=8$ ед., 322,91 Вт (рис. 3.36, б) при $t=12$ ед., 319,21 Вт (рис. 3.36, в) при $t=16$ ед., 314,79 Вт (рис. 3.36, г) при $t=20$ ед., и

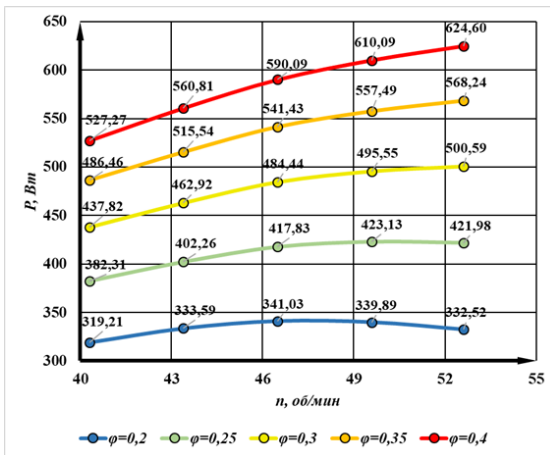
308,96 Вт (рис. 3.36, д) при $t=24$ ед., частоте вращения барабана $n=40,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$.



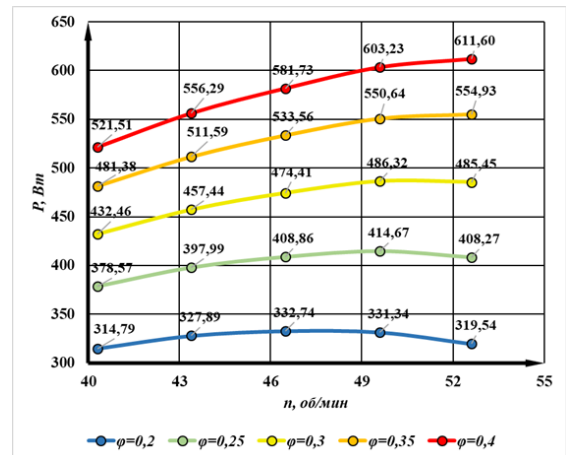
а)



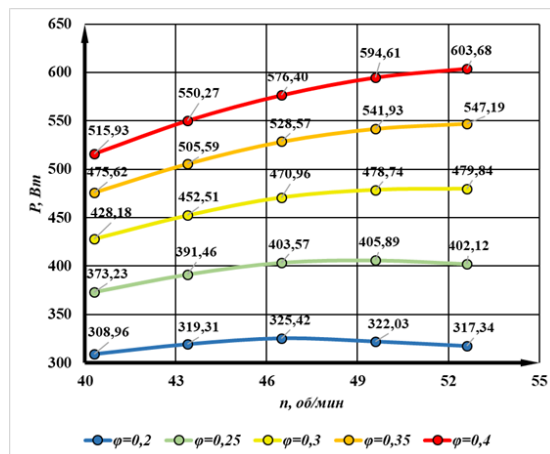
б)



в)



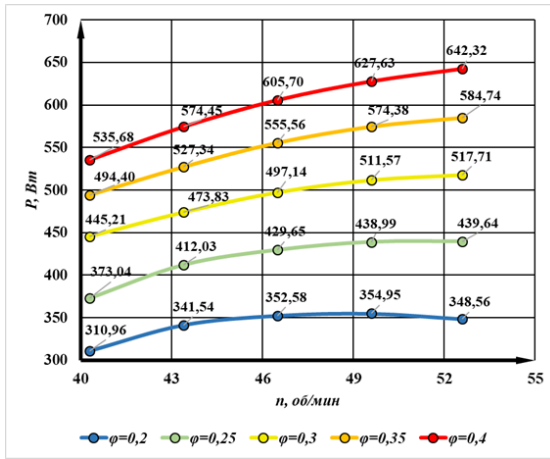
г)



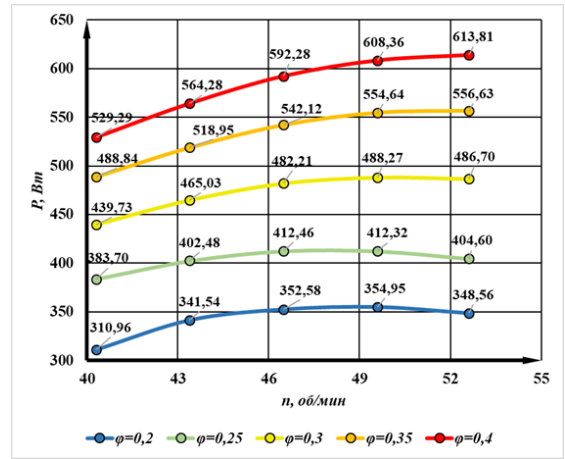
д)

Рисунок 3.36 – График зависимости потребляемой мощности P от частоты вращения барабана мельницы n при различных коэффициентах загрузки φ , $h=15$ мм:

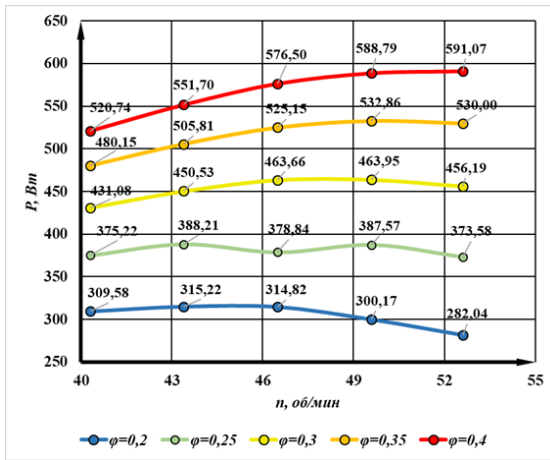
а – $t=8$ ед.; б – $t=12$ ед.; в – $t=16$ ед.; г – $t=20$ ед.; д – $t=24$ ед.



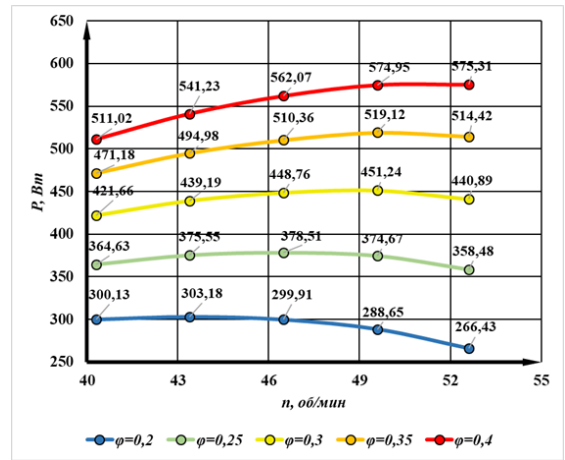
а)



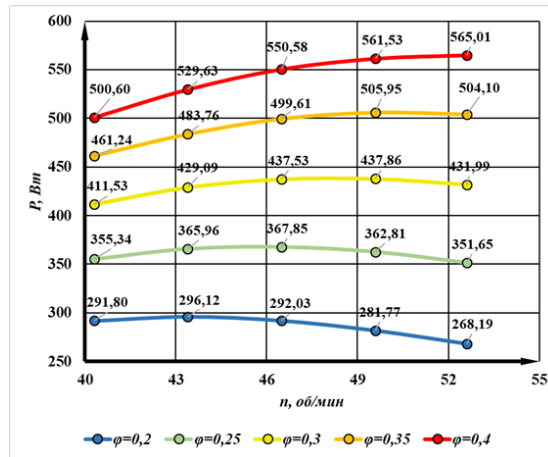
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.37 – График зависимости потребляемой мощности P от частоты вращения барабана мельницы n при различных коэффициентах загрузки φ , $h=20$ мм:

а – $t=8$ ед.; б – $t=12$ ед.; в – $t=16$ ед.; г – $t=20$ ед.; д – $t=24$ ед.

В случае увеличения высоты выступов футеровки h с 15 мм (рис. 3.36) до 20 мм (рис. 3.37) наблюдается уменьшение потребляемой мощности привода. При количестве выступов $t=16$ ед. (рис. 3.37, в) и частоте оборотов барабана мельницы

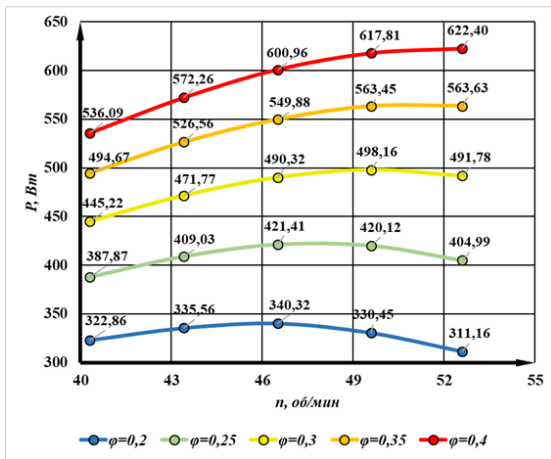
$n=46,5$ об/мин мощность достигает максимального значения 576,50 Вт при коэффициенте загрузки $\varphi=0,40$, а минимального значения 314,82 Вт при $\varphi=0,20$.

Изменение коэффициента загрузки от $\varphi=0,20$ до $\varphi=0,35$ приводит к увеличению мощности с 314,82 Вт до 525,15 Вт, то есть на 67%. При количестве выступов $t=24$ ед. (рис. 3.37, д) и коэффициенте загрузки $\varphi=0,25$ значение потребляемой мощности привода растет до частоты $n=46,5$ об/мин и составляет 367,85 Вт, однако при последующем повышении частоты до $n=49,51$ об/мин величина мощности снижается до 362,81 Вт, а для $n=52,51$ об/мин составляет 351,65 Вт. Таким образом, рациональным значением для $\varphi=0,25$, $t=24$ ед. и $h=20$ мм является частота вращения барабана мельницы $n=46,5$ об/мин.

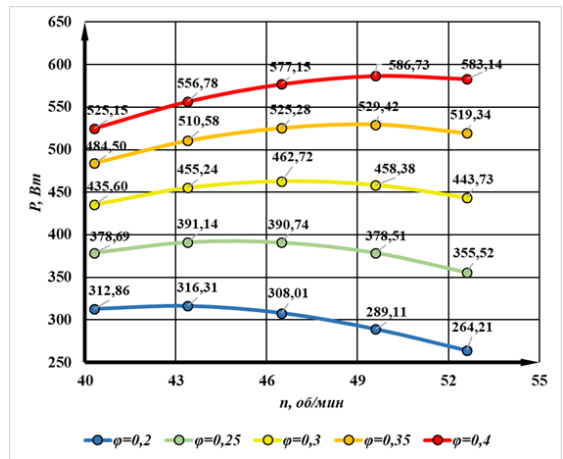
При увеличении высоты выступов h до 25 мм, количестве выступов $t=20$ ед. (рис. 3.38, г) и частоте оборотов барабана мельницы $n=49,51$ об/мин потребляемая мощность привода достигает максимального значения 541,63 Вт при коэффициенте загрузки $\varphi=0,40$, а минимального значения 245,52 Вт при $\varphi=0,20$.

При количестве выступов $t=16$ ед. (рис. 3.38, в) при коэффициенте загрузки $\varphi=0,30$ увеличение частоты вращения от $n=40,51$ об/мин до $n=46,5$ об/мин повышает потребляемую мощность с 422,19 Вт до 439,70 Вт, то есть на 4%, однако при следующем увеличении частоты вращения наблюдается снижение потребляемой мощности сначала до величины 429,73 Вт, а потом до 409,36 Вт. Таким образом, оптимальным значением для $\varphi=0,30$, $t=16$ ед. и $h=25$ мм является $n=46,5$ об/мин.

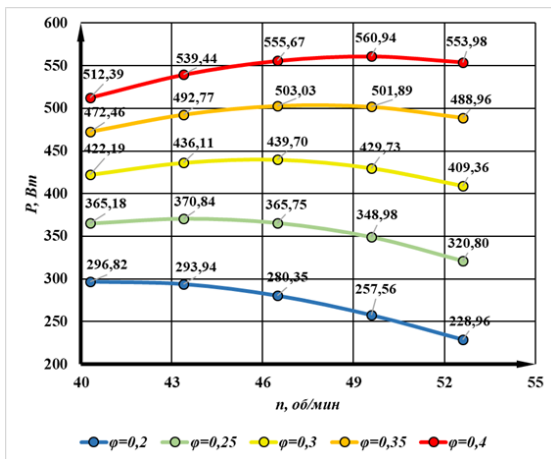
При высоте выступов футеровки $h=30$ мм и количестве выступов $t=8$ потребляемая мощность привода составляет 316,34 Вт. С увеличением частоты вращения до 43,51 об/мин потребляемая мощность увеличивается до 320,92 Вт (рис. 3.39, а). При частоте вращения 52,51 об/мин потребляемая мощность привода достигает минимального значения $P=274,57$ Вт (рис. 3.39, а).



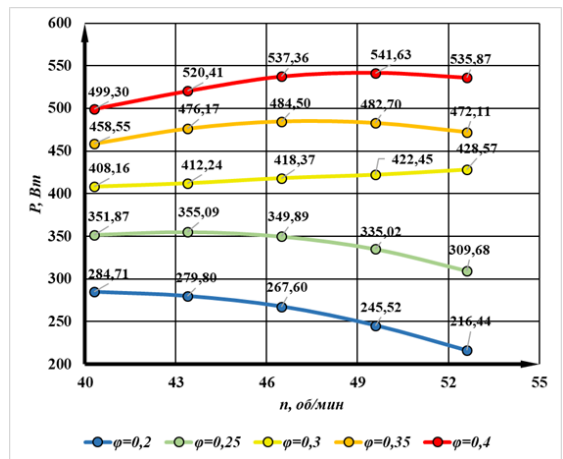
а)



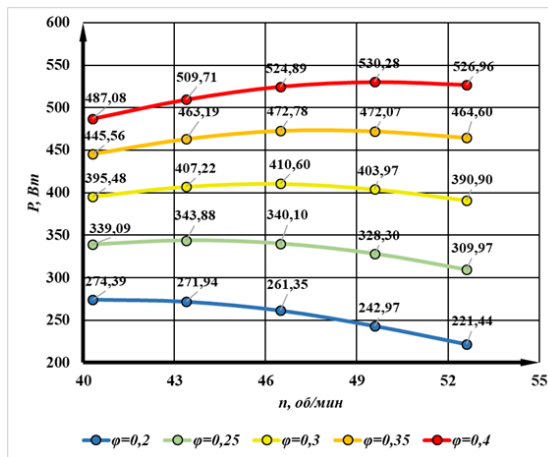
б)



в)



г)



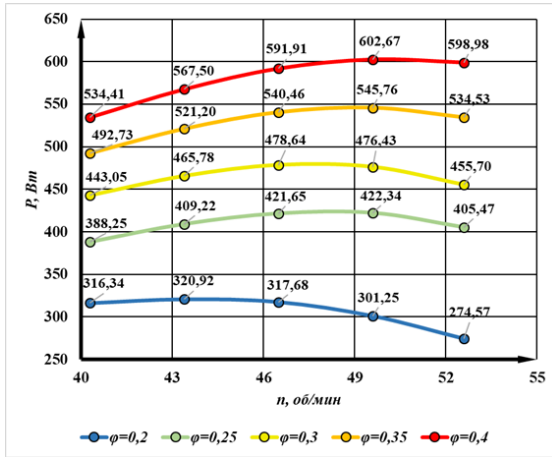
д)

Рисунок 3.38 – График зависимости потребляемой мощности P от частоты вращения барабана мельницы n при различных коэффициентах загрузки φ , $h=25$ мм:

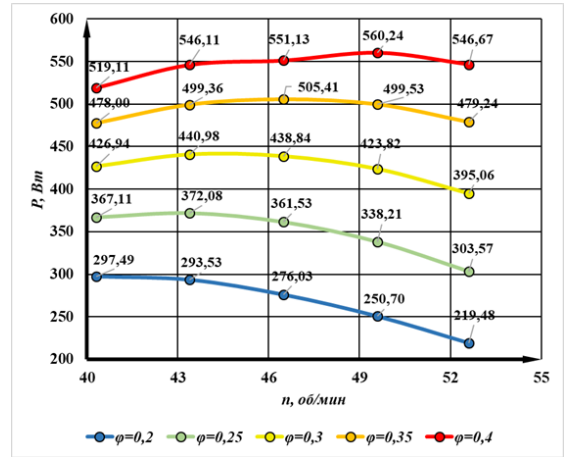
а – $t=8$ ед.; б – $t=12$ ед.; в – $t=16$ ед.; г – $t=20$ ед.; д – $t=24$ ед.

При снижении частоты вращения барабана мельницы с 49,51 об/мин до 52,51 об/мин потребляемая мощность привода снижается до $P=487,44$ при $t=24$ ед., $\varphi=0,40$ (рис. 3.39, д). Снижение потребляемой мощности привода в данном случае

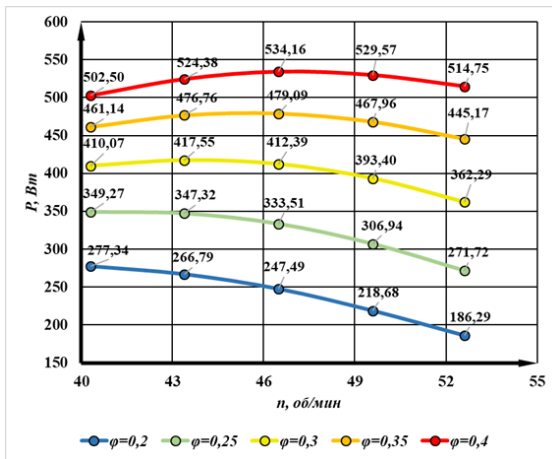
объясняется тем, что расстояние между выступами футеровки мало для того чтобы вовлечь в водопадный режим работы мелющие тела большего диаметра.



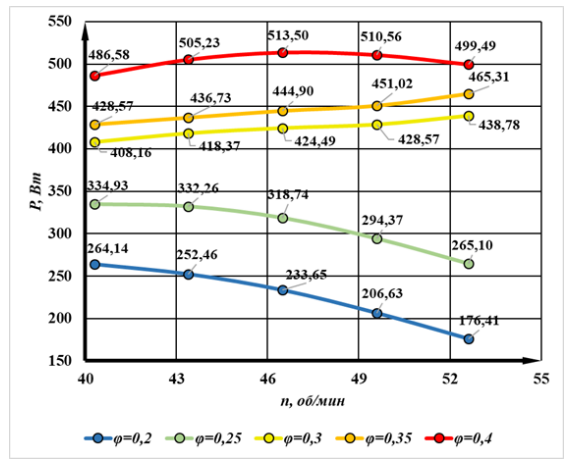
а)



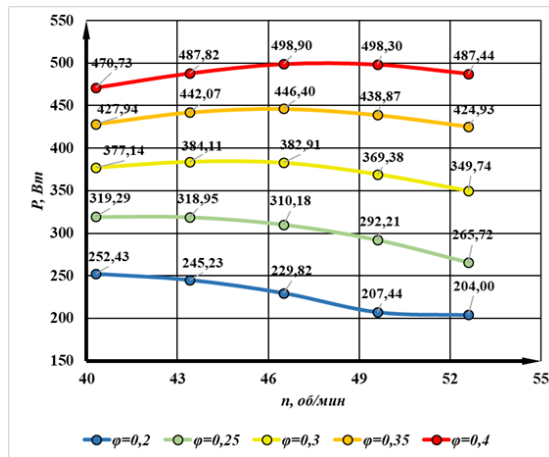
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.39 – График зависимости потребляемой мощности P от частоты вращения барабана мельницы n при различных коэффициентах загрузки φ , $h=30$ мм:

а – $t=8$ ед.; б – $t=12$ ед.; в – $t=16$ ед.; г – $t=20$ ед.; д – $t=24$ ед.

Таким образом, представленная методика позволяет проводить анализ множества расчетов, полученных в ходе цифрового моделирования. Установлено, что существенное влияние на величину потребляемой мощности привода мельницы оказывают частота вращения и коэффициент загрузки барабана мельницы мелющими телами и измельчаемым материалом [91-94]. Количество выступов и высоты выступов оказывает меньшее влияние на величину потребляемой мощности привода мельницы [91].

3.5.3 Анализ износа футеровки барабанной шаровой мельницы.

Цифровое моделирование износа футеровки мельницы основано на законе износа Арчарда Д.Ф. [95, 96]. Согласно данному закону потеря объема материала определяется как:

$$V = k \frac{W_{\tau}}{H}, \quad (3.1)$$

где V – общий объем материала, изношенного с поверхности;

W_{τ} – работа, выполненная силами трения на поверхности материала;

H – твердость материала, подверженного износу;

k – коэффициент износа поверхности.

В программном обеспечении для реализации износа закон Арчарда Д.Ф. рассматривается в следующем виде:

$$\Delta V = C \Delta W_{\tau}, \quad (3.2)$$

где ΔV – объем материала, изношенного за время моделирования;

ΔW_{τ} – тангенциальная или сдвиговая работа, совершаемая контактными силами на поверхности футеровки за временной шаг, в местах контакта частиц с футеровкой;

$C=k/H$ – константа, задаваемая пользователем. В Rocky каждая импортированная геометрия футеровки корпуса в задаче может иметь свое значение константы C , которое отображается в пользовательском интерфейсе как «Коэффициент отношения объема к сдвиговой работе».

Поскольку поверхности геометрии футеровки корпуса в Rocky представлены в виде триангулированных поверхностей (фасетов), эффект удаления объема ΔV достигается за счет смещения их вершин внутрь объема (рис. 3.40). Расстояние, на

которое смещается каждая вершина, рассчитывается таким образом, чтобы изменение объема соответствовало значению ΔV , рассчитанному по уравнению (3.1).

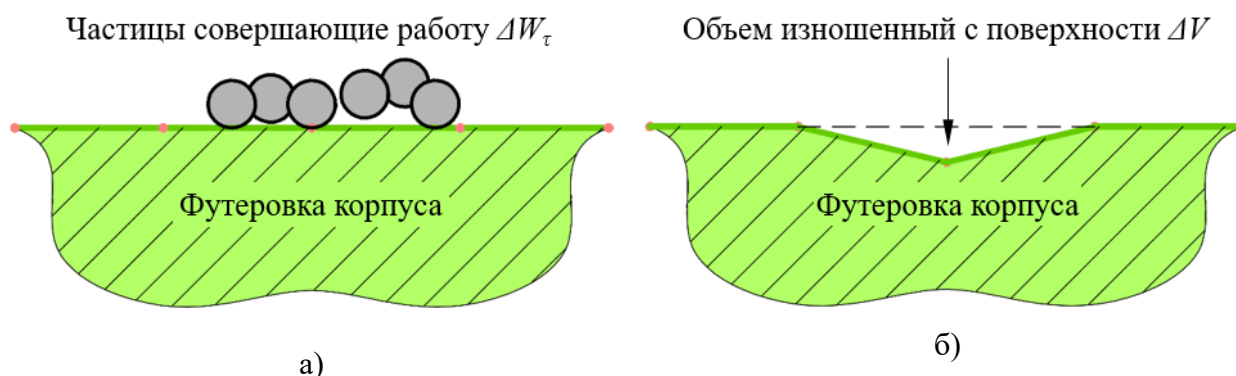


Рисунок 3.40 – Принципиальная схема износа поверхности:

а – частицы, совершающие работу ΔW_τ в момент времени t ;

б – износ поверхности за время моделирования $t+\Delta t$

Стоит отметить, что при этом топология триангуляции границы остается неизменной. Поэтому для адекватного отражения изменений геометрии футеровки корпуса желательно, чтобы в областях, подверженных износу, триангуляция была достаточно детализированной.

Тангенциальная работа, совершаемая частицами при столкновении с футеровкой корпуса, вычисляется для каждого треугольника в отдельности. Вершины, примыкающие к треугольникам, на которые приходится большая работа сдвига, смещаются сильнее, и, следовательно, в этих областях износ будет более выраженным. Тангенциальная работа, совершаемая на каждый треугольник, рассчитывается путем сложения вкладов в тангенциальную работу от всех столкновений, произошедших в треугольнике за время моделирования. Обычно считается, что работа, приводящая к износу при контакте частицы с геометрией футеровки корпуса, составляет половину от общей работы, совершаемой соответствующей тангенциальной контактной силой, то есть:

$$\Delta W_{\tau,c} = \frac{1}{2} |F_\tau| \Delta s_\tau, \quad (3.3)$$

где F_τ – тангенциальная составляющая контактной силы, рассчитанная с помощью одной из моделей тангенциальной силы *Rocky*;

Δs_τ – расстояние скольжения, рассчитанное за время моделирования Δt .
 Расстояние скольжения – это относительное смещение, параллельное тангенциальной плоскости, при контакте частицы с геометрией футеровки корпуса.

Как правило, реальный срок службы оборудования в промышленных процессах гораздо больше, чем тот, который обычно целесообразно моделировать с помощью метода дискретных элементов. Эту проблему можно решить, сократив время моделирования и увеличив коэффициент износа C на несколько порядков. Подходящее значение C можно определить, следуя двум эмпирическим правилам [96, 97]:

1. Коэффициент C должен удовлетворять условию пропорциональности, заданному в уравнении (3.1). Другими словами, увеличение C в k раз и уменьшение времени моделирования в k раз должны сохранять характеристики износа.
2. Время моделирования должно быть достаточно большим, чтобы статистическая дисперсия, связанная с дискретными событиями, была небольшой в выходных данных *DEM*.

Оба правила нарушаются при использовании чрезвычайно больших значений C , что приводит к быстрым изменениям геометрии, которые сильно влияют на движение частиц.

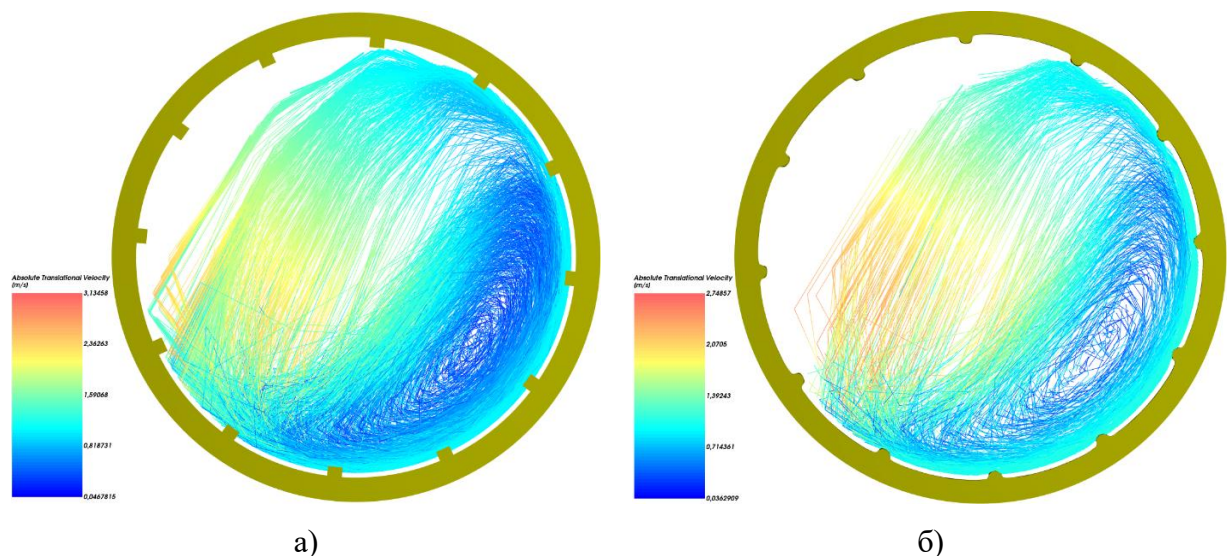


Рисунок 3.41 – Траектории и скорости движения мелющей загрузки в поперечном сечении барабана мельницы при прокатной футеровке с одинарными выступами при износе за время моделирования при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h=10$ мм:

а – $t=10$ с; б – $t=100$ с

В ходе цифрового моделирования износа прокатной футеровки с одинарными выступами при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h=10$ мм в момент времени 10 с, когда износ отсутствует, максимальная скорость движения мелющих тел составляет 3,13 м/с (рис. 3.41, а).

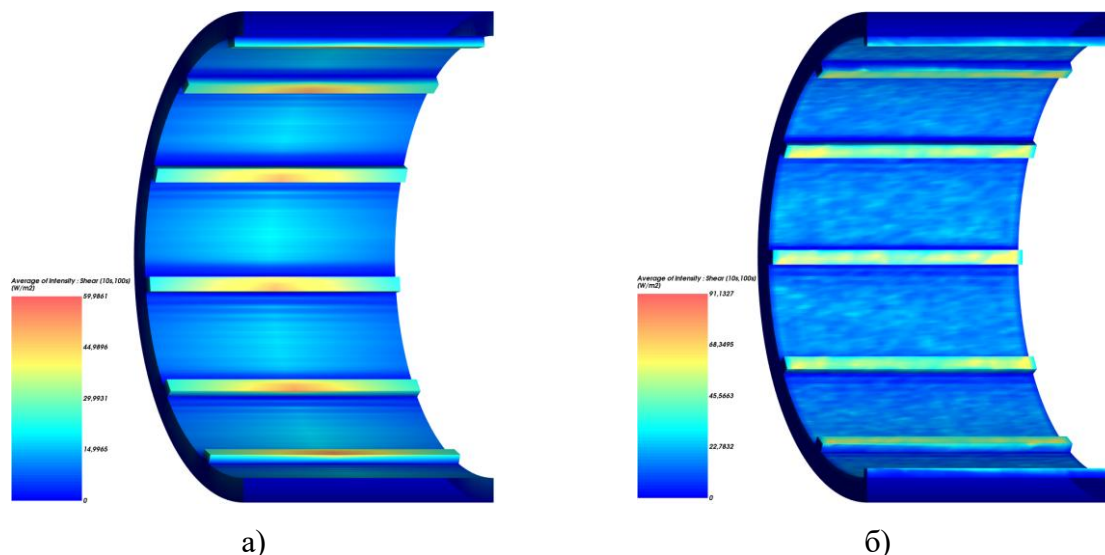


Рисунок 3.42 – Работа, затраченная на трение между шаровой загрузкой и прокатной футеровкой с одинарными выступами при износе за время моделирования при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h=10$ мм:
а – $t=10$ с; б – $t=100$ с

При износе футеровки в момент времени 100 с максимальная скорость движения мелющих тел снижается до 2,75 м/с (рис. 3.41, б), то есть на 12,14%. При этом видно, что при износе футеровки изменяется траектория движения мелющих тел, интенсивность соударения снижается. Потребляемая мощность мельницы до износа составляет 461,31 Вт, после износа потребляемая приводом мельницы мощность увеличивается до 464,55 Вт.

Рост потребляемой мощности обусловлен двумя взаимосвязанными факторами. Во-первых, изменением траектории движения мелющих тел, что требует преодоления возрастающих сил трения и, как следствие, увеличения крутящего момента, необходимого для вращения барабана мельницы. Во-вторых, повышением работы сил трения на поверхности футеровки. Анализ интенсивности работы на трение осуществляется путем применения инструмента «*Intensity Shear*» («Интенсивность сдвига») До износа работа, затрачиваемая на трение, составляет

59,98 Вт/м² (рис. 3.42, а), после износа в момент времени 100 с, работа на трение увеличивается до 91,13 Вт/м² (рис. 3.42, б).

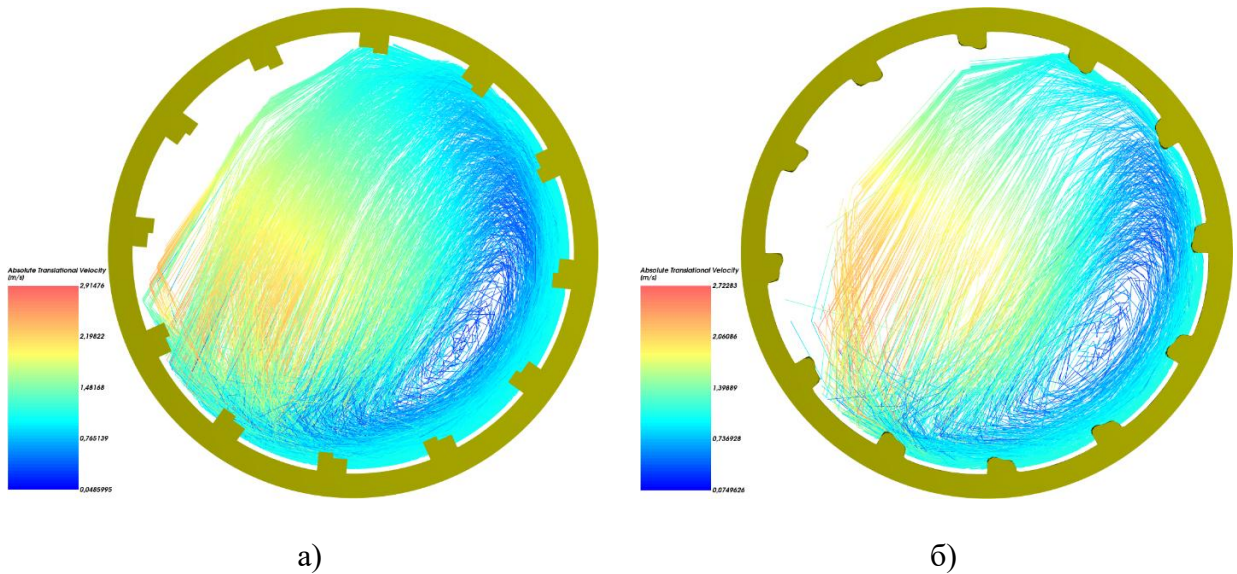


Рисунок 3.43 – Траектории и скорости движения мелющей загрузки в поперечном сечении барабана мельницы при прокатной футеровке со сдвоенными выступами при износе за время моделирования при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм:

а – $t=10$ с; б – $t=100$ с

В случае применения прокатной футеровки со сдвоенными выступами при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм, когда износ отсутствует максимальная скорость движения мелющих тел составляет 2,91 м/с (рис. 3.43, а). При износе футеровки в момент времени 100 с максимальная скорость движения мелющих тел снижается до 2,72 м/с (рис. 3.43, б), то есть на 6,52%. При этом видно, что при износе футеровки изменяется траектория движения мелющих тел, интенсивность соударения снижается.

Потребляемая мощность мельницы при использовании прокатной футеровки со сдвоенными выступами до износа составляет 235,64 Вт, после износа потребляемая мощность приводом мельницы увеличивается до 478,92 Вт, то есть на 3,65%. В данном случае работа, затрачиваемая на трение до износа, составляет 61,92 Вт/м² (рис. 3.44, а), после износа в момент времени 100 с, работа на трение увеличивается до 84,13 Вт/м² (рис. 3.44, б).

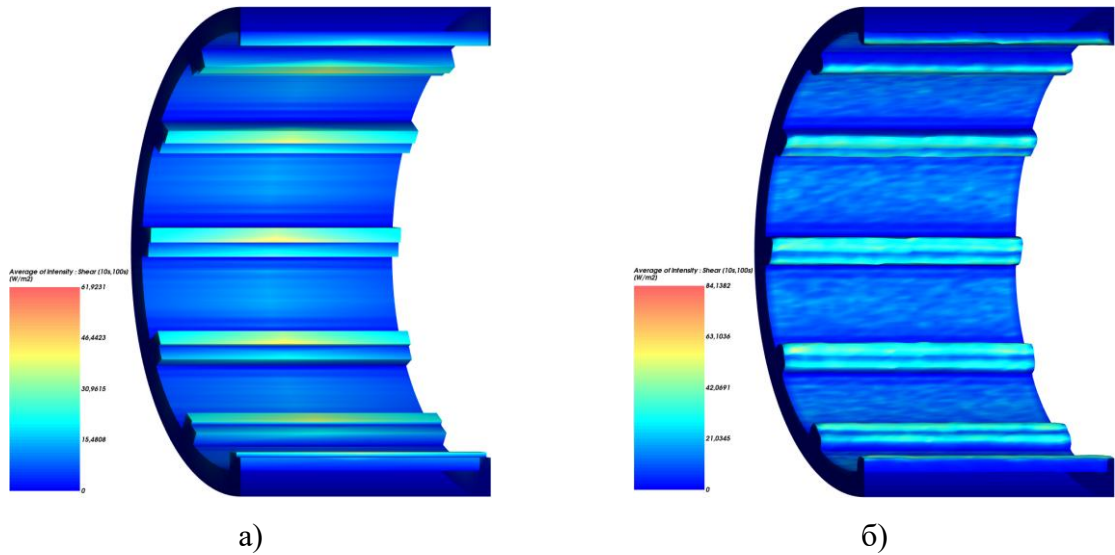


Рисунок 3.44 – Работа, затраченная на трение между шаровой загрузкой и прокатной футеровкой со сдвоенными выступами при износе за время моделирования при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм:
а – $t=10$ с; б – $t=100$ с

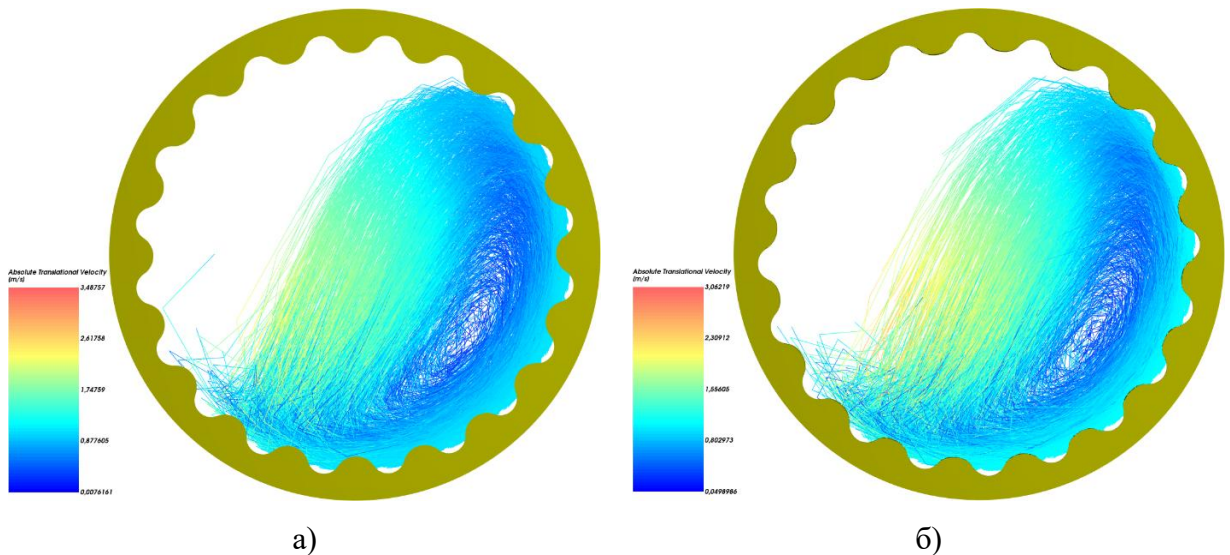


Рисунок 3.45 – Траектории и скорости движения мелющей загрузки в поперечном сечении барабана мельницы при волнистой футеровке при износе за время моделирования при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=20$ ед., $h=20$ мм:
а – $t=10$ с; б – $t=100$ с

При использовании волнистой футеровки при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=20$ ед., $h=20$ мм в момент отсутствия износа максимальная скорость движения мелющих тел составляет 3,49 м/с (рис. 3.45, а). В процессе износа в момент времени 100 с максимальная скорость движения мелющих тел снижается до 3,06 м/с, то есть на 12,32% (рис. 3.45, б). Траектории движения мелющих тел при этом остаются практически неизменными. До износа мощность, потребляемая мельницей,

составляет 482,41 Вт, при этом после износа в момент времени 100 с потребляемая мощность увеличивается незначительно до 484,82 Вт.

Работа, затрачиваемая на трение до износа, составляет 43,05 Вт/м² (рис. 3.46, а), после износа в момент времени 100 с, работа на трение увеличивается до 83,45 Вт/м² (рис. 3.46, б).

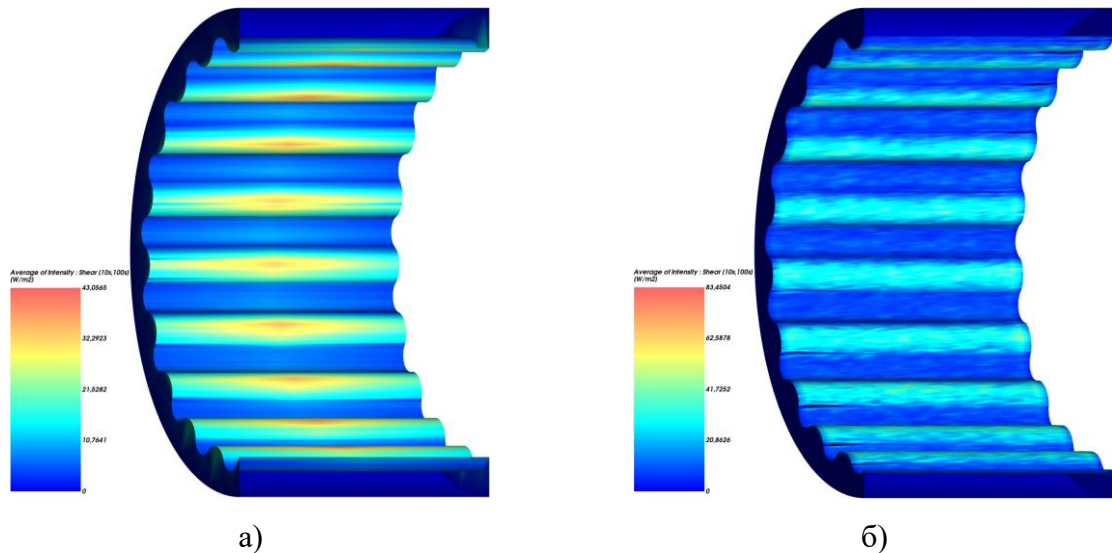


Рисунок 3.46 – Работа, затраченная на трение между шаровой загрузкой и волнистой футеровкой при износе за время моделирования при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=20$ ед., $h=20$ мм:
 а – $t=10$ с; б – $t=100$ с

Кроме этого, следует отметить, что в случае использования волнистой футеровки работа, затрачиваемая на трение, после износа достигает минимального значения 83,45 Вт/м², в сравнении с другими типами футеровок.

На основе цифрового моделирования износа футеровки барабанной шаровой мельницы было определено, что с увеличением частоты вращения увеличивается максимальная скорость движения мелющих тел, благодаря чему обеспечивается необходимая энергия удара мелющих тел о материал [98, 99]. При низких частотах вращения барабана мельницы наблюдаются высокие величины абразивного и ударного износа футеровки [98]. Определен оптимальный режим работы мелющих тел мелющей загрузки при частоте вращения барабана мельницы равной 0,76 от критической частоты вращения [98].

3.5.4 Анализ эффективности измельчения в барабанной шаровой мельнице.

В ходе цифрового моделирования футеровки и режимов работы мелющей загрузки было определено, что рациональный режим работы обеспечивается при $\varphi=0,30$ и $n=46,51$ об/мин (рис. 3.47).

Это объясняется тем что при данных режимах работы обеспечивается среднее значение мощности достаточное для измельчения материала. При использовании прокатной футеровки с одинарными выступами с $t=12$ ед., $h=10$ мм максимальная скорость движения мелющих тел составляет 2,97 м/с (рис. 3.47, а), потребляемая мощность, затрачиваемая на приведение барабана мельницы в работу, составляет 499,41 Вт (рис. 3.47, а). В случае использования прокатной футеровки со сдвоенными выступами с $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм максимальная скорость движения мелющих тел увеличивается незначительно до 3,09 м/с (рис. 3.47, б), то есть на 4%. Потребляемая мощность, затрачиваемая на приведение барабана мельницы в работу, снижается до 482,67 Вт (рис. 3.47, б), то есть на 3,35%.

В случае применения волнистой футеровки с $t=20$ ед., $h=20$ мм максимальная скорость движения мелющих тел уменьшается до 2,55 м/с (рис. 3.47, в), то есть на 17,5% в сравнении с применением прокатной футеровки со сдвоенными выступами. Однако, следует отметить, что в случае применения волнистой футеровки большая часть мелющих тел обладает максимальной скоростью (красные линии на рисунке 3.47, в). Потребляемая мощность, затрачиваемая на приведение барабана мельницы в работу, снижается незначительно до 481,05 Вт (рис. 3.47, в), то есть на 0,33%.

Согласно графику статистики соударений мелющих тел о частицы клинкера (рис. 3.48) видно, что при применении прокатной футеровки с одинарными выступами с $t=12$ ед., $h=10$ мм наблюдается наименьшее количество соударений мелющих частиц о частицы клинкера. При этом, наибольшее количество соударений обладает энергией меньше 0,006 Дж, количество соударений с энергией 0,10 Дж равно 0 (рис. 3.48). В случае применения прокатной футеровки

со двоянными выступами с $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм количество соударений увеличивается на 28,6% (рис. 3.48). Наибольшее количество соударений мелющих тел о частицы материала наблюдается при использовании волнистой футеровки с $t=20$ ед., $h=20$ мм. В этом случае количество соударений увеличивается на 32,34% в сравнении с применением прокатной футеровки с одинарными выступами.

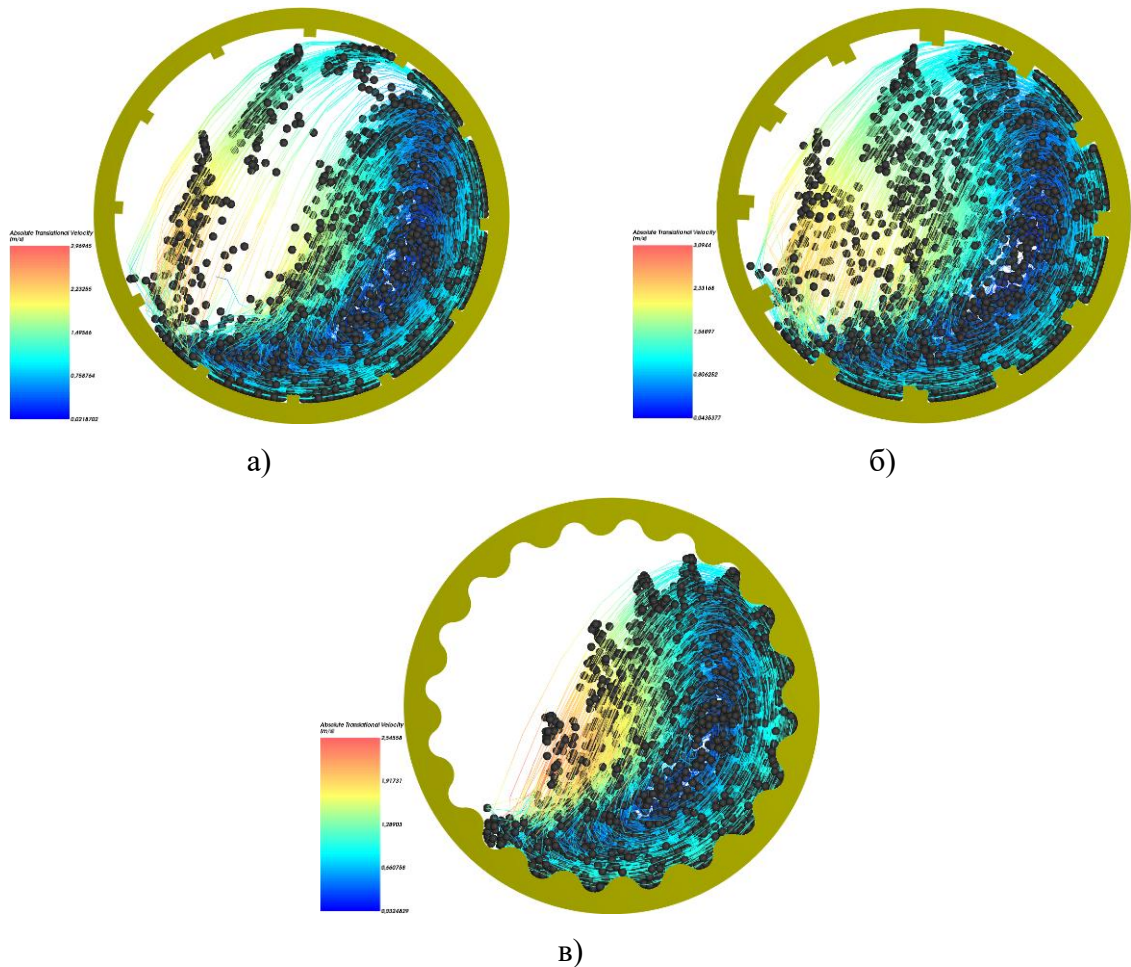


Рисунок 3.47 – Траектории и скорости движения загрузки в поперечном сечении барабанной шаровой мельницы при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин:

а – прокатная футеровка с одинарными выступами с $t=12$ ед., $h=10$ мм;

б – прокатная футеровка со двоянными выступами с $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм;

в – волнистая футеровка с $t=20$ ед., $h=20$ мм

Существующие методы не позволяют в точной мере интерпретировать результаты численного моделирования для определения эффективности процесса измельчения [100].

Наиболее перспективным методом решения данной задачи является использование инструмента энергетических спектров. В отличие от моделирования дробления, которое требует дополнительных вычислительных затрат для расчета и

визуализации каждого отдельного фрагмента, инструмент энергетических спектров использует энергетическую статистику столкновений частиц для прогнозирования скорости дробления и истирания в графическом формате.

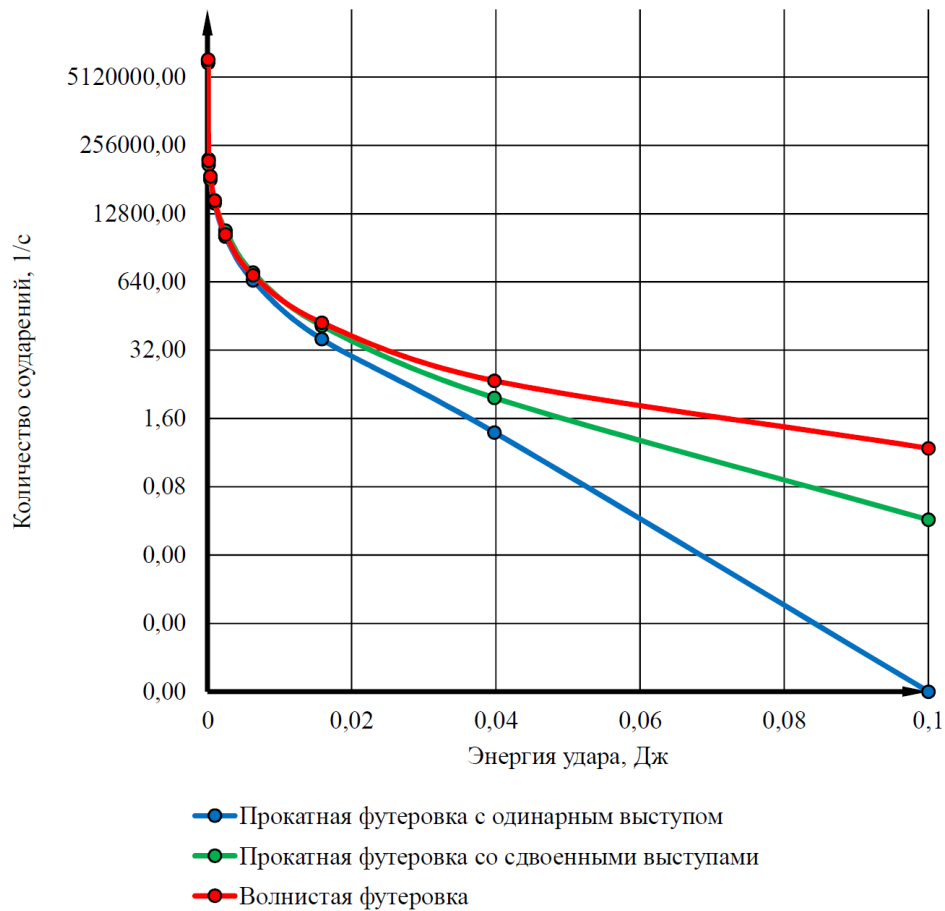


Рисунок 3.48 – График статистики соударений мелющих тел о частицы клинкера

На графике, представленном на рисунке 3.49 приведены энергетические спектры соударений с частицами клинкера. Энергетический спектр – это распределение величины полной удельной мощности (Вт/кг), приходящейся на удары различной удельной энергии (Дж/кг или кВт·ч/т) по узким классам крупности частиц [91, 100]. В ходе анализа результатов численного моделирования осуществляется анализ энергетических уровней отдельных столкновений и выполняется оценка трех типов энергии столкновений:

1. Рассеиваемая энергия, являющаяся долей механической энергии частицы, необратимо преобразованной в другие формы энергии во время столкновения.

2. Энергия удара, являющаяся максимальной энергией столкновения, переданной в фазе нормальной нагрузки. Этот вид энергии учитывается в моделях мгновенного разрушения для оценки разрушения.

3. Энергия сдвига, являющаяся работой, совершаемой касательными силами при столкновении. Этот вид энергии используется в моделях абразивного износа.

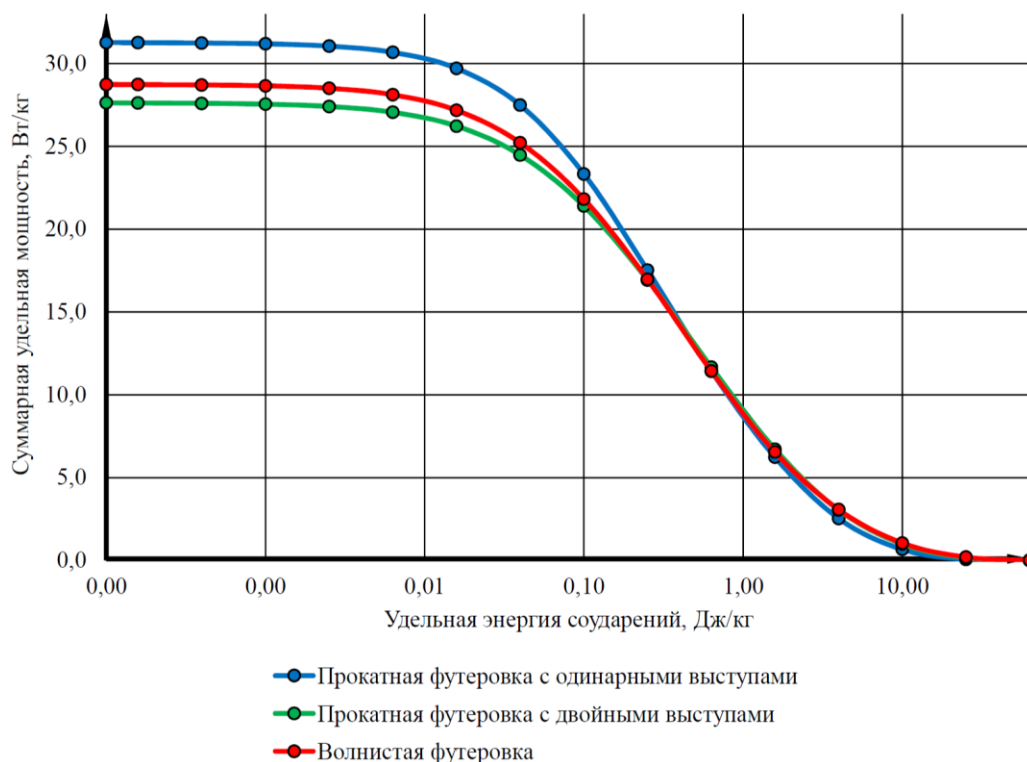


Рисунок 3.49 – График энергетических спектров

Учитывая, что минимальная удельная энергия соударений, приводящая к разрешению частиц клинкера, составляет 7 Дж/кг, можно сказать, что удельный расход энергии на разрушение частиц составляет 0,7 Вт/кг, из затрачиваемых 31,3 Вт/кг, то есть 2,24% (рис. 3.49). При использовании прокатной футеровки со сдвоенными выступами удельный расход энергии соударений мелющих тел о частицы материалы, приводящие к разрушению частиц, составляют 0,98 Вт/кг из затрачиваемых на обеспечение режимов работы мелющей загрузки 27,63 Вт/кг, то есть 3,55% (рис. 3.49).

В случае использования волнистой футеровки затрачиваемая мощность составляет 1,05 Вт/кг из затрачиваемых 28,74 Вт/кг, то есть 3,65% (рис. 3.49).

Учитывая выше сказанное можно сделать вывод, что рациональным профилем футеровки является волнистая футеровка с $t=20$ ед., $h=20$ мм, ввиду обеспечения максимальной эффективности процесса измельчения.

3.5.5 Исследование влияния продольного профиля футеровки на режимы работы мелющей загрузки.

Следует отметить, что в процессе работы промышленных мельниц возникают эффекты поперечной и продольной сегрегации мелющей загрузки. Поперечная сегрегация возникает при малых частотах вращения барабана мельницы, и наблюдается скопление мелких шаров в периферийной части его поперечного сечения.

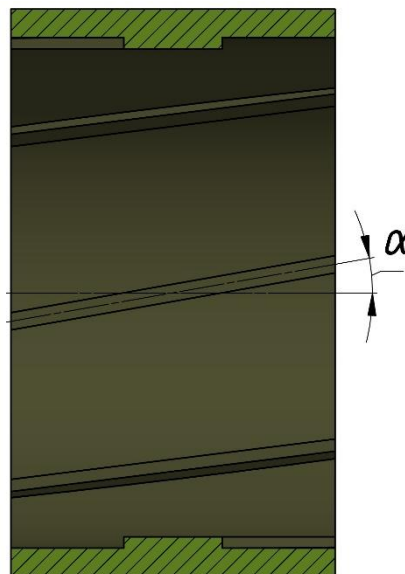


Рисунок 3.50 – Схема продольного профиля футеровки

При продольной сегрегации крупные шары скапливаются у разгрузочного конца барабана мельницы, это объясняется тем, что у загрузочного конца барабана загрузка находится на более высокой отметке, чем у разгрузочного. Ввиду возникновения продольной сегрегации наблюдается снижение эффективности процесса измельчения, что связано с необходимостью наличия крупных шаров в загрузочном конце для измельчения крупных частиц.

Именно поэтому при проектировании футеровки барабанных шаровых мельниц актуальной является задача разработки рационального продольного профиля футеровки. В настоящей работе предлагается расположение профиля футеровки под углом к горизонтальной оси барабана мельницы (рис. 3.50).

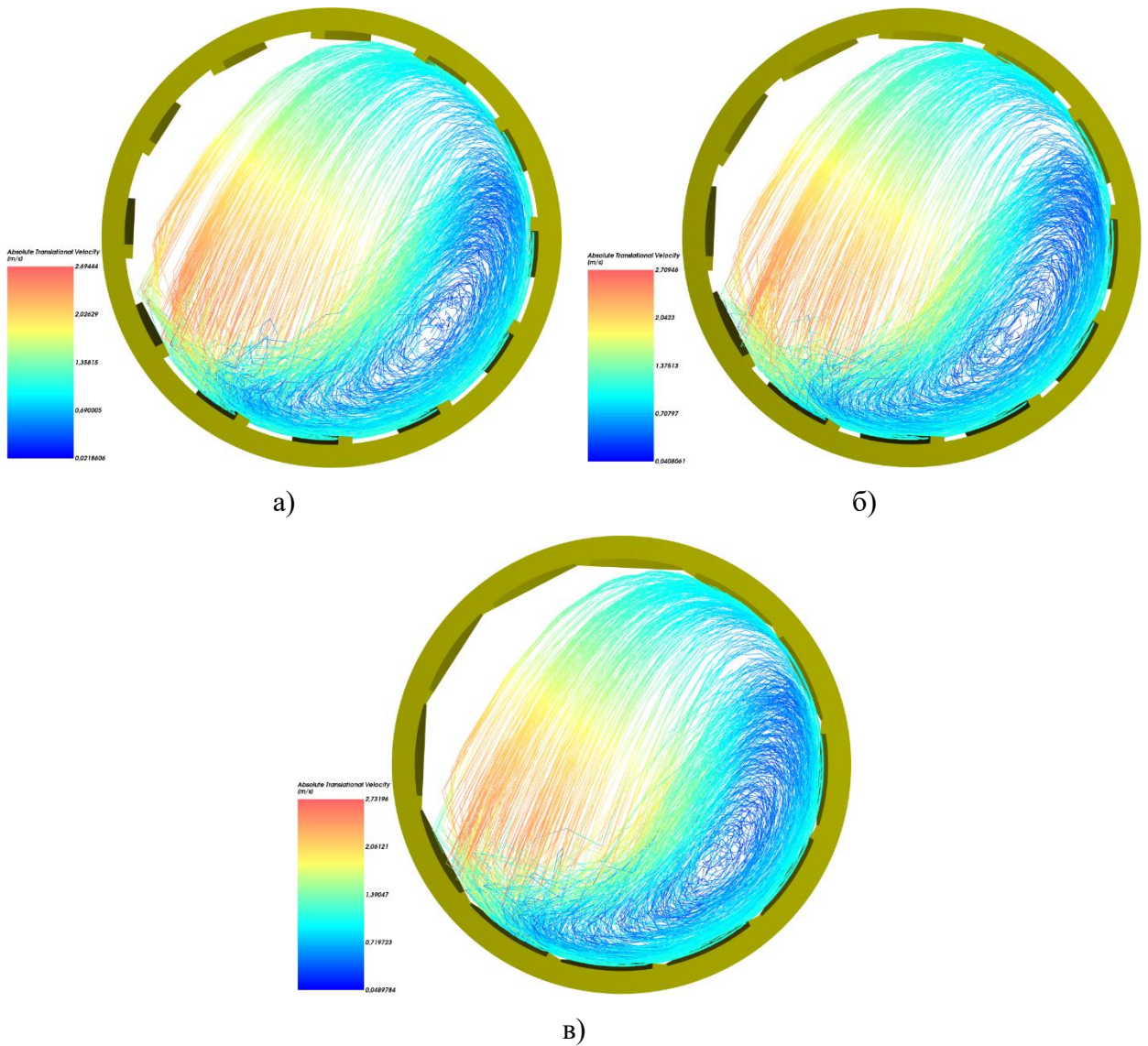


Рисунок 3.51 – Траектория и скорости движения мелющих тел при футеровке с одинарными выступами при $t=12$ ед., $h=10$ мм, $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин:

$$а - \alpha=10^\circ; \text{б} - \alpha=15^\circ, \text{в} - \alpha=20^\circ$$

В ходе цифрового моделирования футеровки с одинарными выступами при количестве выступов $t=12$ ед., высоте выступа $h=10$ мм, угле наклона футеровки $\alpha=10^\circ$, коэффициенте загрузки $\varphi=0,30$ и частоте вращения барабана $n=46,51$ об/мин максимальная скорость движения мелющих тел составляет 2,69 м/с, потребляемая мощность составляет 462,55 Вт (рис. 3.51, а). С увеличением угла наклона футеровки α до 15° максимальная скорость увеличивается до 2,71 м/с (рис. 3.51, б), потребляемая мощность при этом составляет 463,49 Вт (рис. 3.51, б). При последующем увеличении угла наклона футеровки α до 20° максимальная скорость увеличивается до 2,71 м/с (рис. 3.51, в), полезная потребляемая мощность при этом составляет 463,49 Вт (рис. 3.51, в).

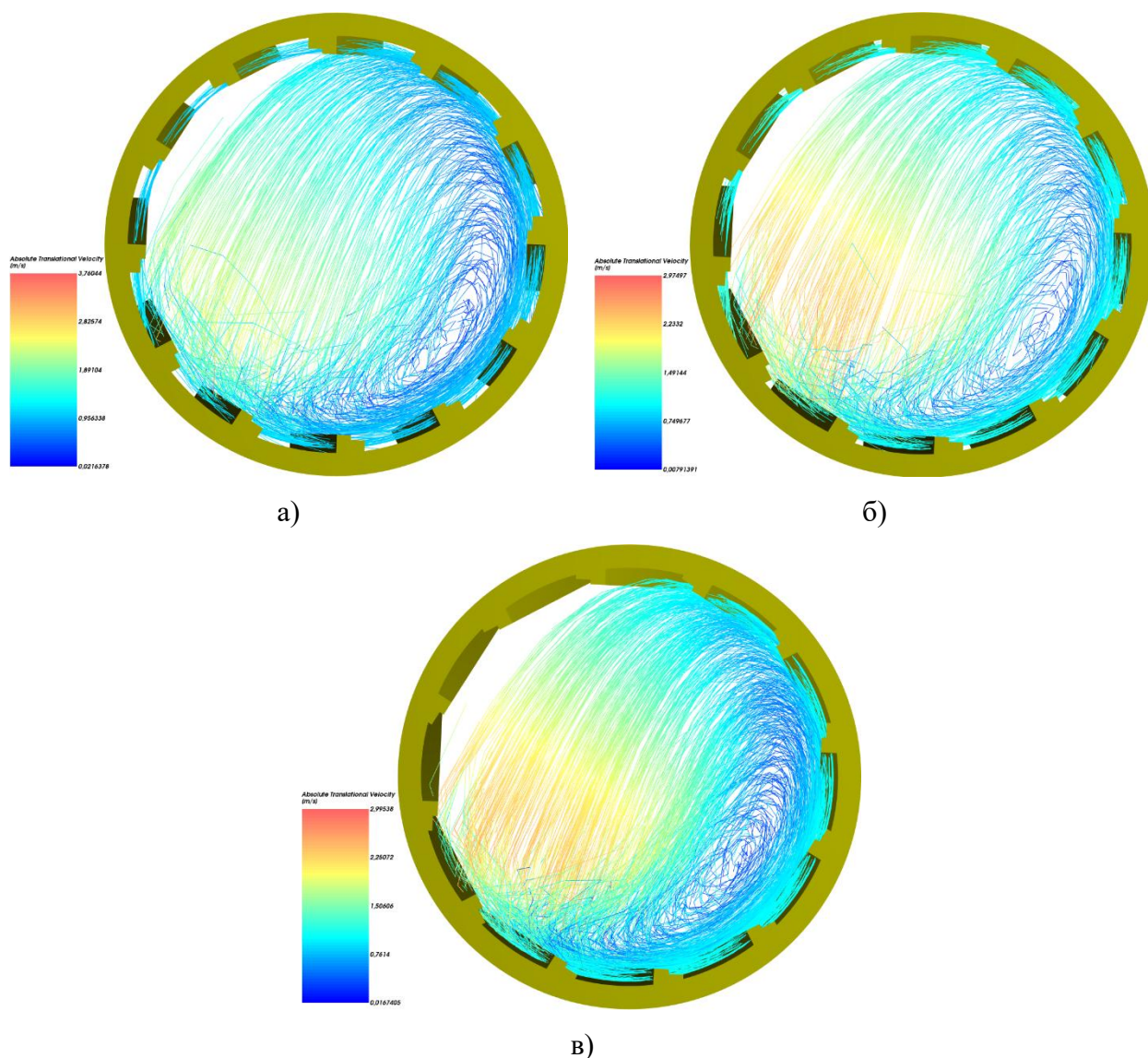


Рисунок 3.52 – Траектория и скорости движения мелющих тел при футеровке со двойными выступами при $t=12$ ед., $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм, $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин:

а – $\alpha=10^\circ$; б – $\alpha=15^\circ$, в – $\alpha=20^\circ$

Следует отметить, что увеличение угла наклона футеровки с одинарными выступами не влияет на изменение траектории движения мелющих тел в поперечном сечении барабана мельницы.

При использовании футеровки со двойными выступами при количестве выступов $t=12$ ед., высоте выступа $h_1=20$ мм, $h_2=15$ мм, угле наклона футеровки $\alpha=10^\circ$, коэффициенте загрузки $\varphi=0,30$ и частоте вращения барабана $n=46,51$ об/мин максимальная скорость движения мелющих тел составляет 3,76 м/с, потребляемая мощность составляет 515,51 Вт (рис. 3.52, а). При этом ряд мелющих тел работают в критическом режиме, что снижает эффективность измельчения (рис. 3.52, а). С

увеличением угла наклона футеровки α до 15° максимальная скорость увеличивается до 2,97 м/с (рис. 3.52, б), потребляемая мощность при этом составляет 517,82 Вт (рис. 3.52, б). Траектория движения мелющих тел не изменяется. При последующем увеличении угла наклона футеровки α до 20° максимальная скорость увеличивается до 2,99 м/с (рис. 3.52, в), потребляемая мощность при этом составляет 440,515 Вт (рис. 3.52, в). При угле наклона $\alpha=20^\circ$ обеспечивается водопадный режим работы, который является рациональным.

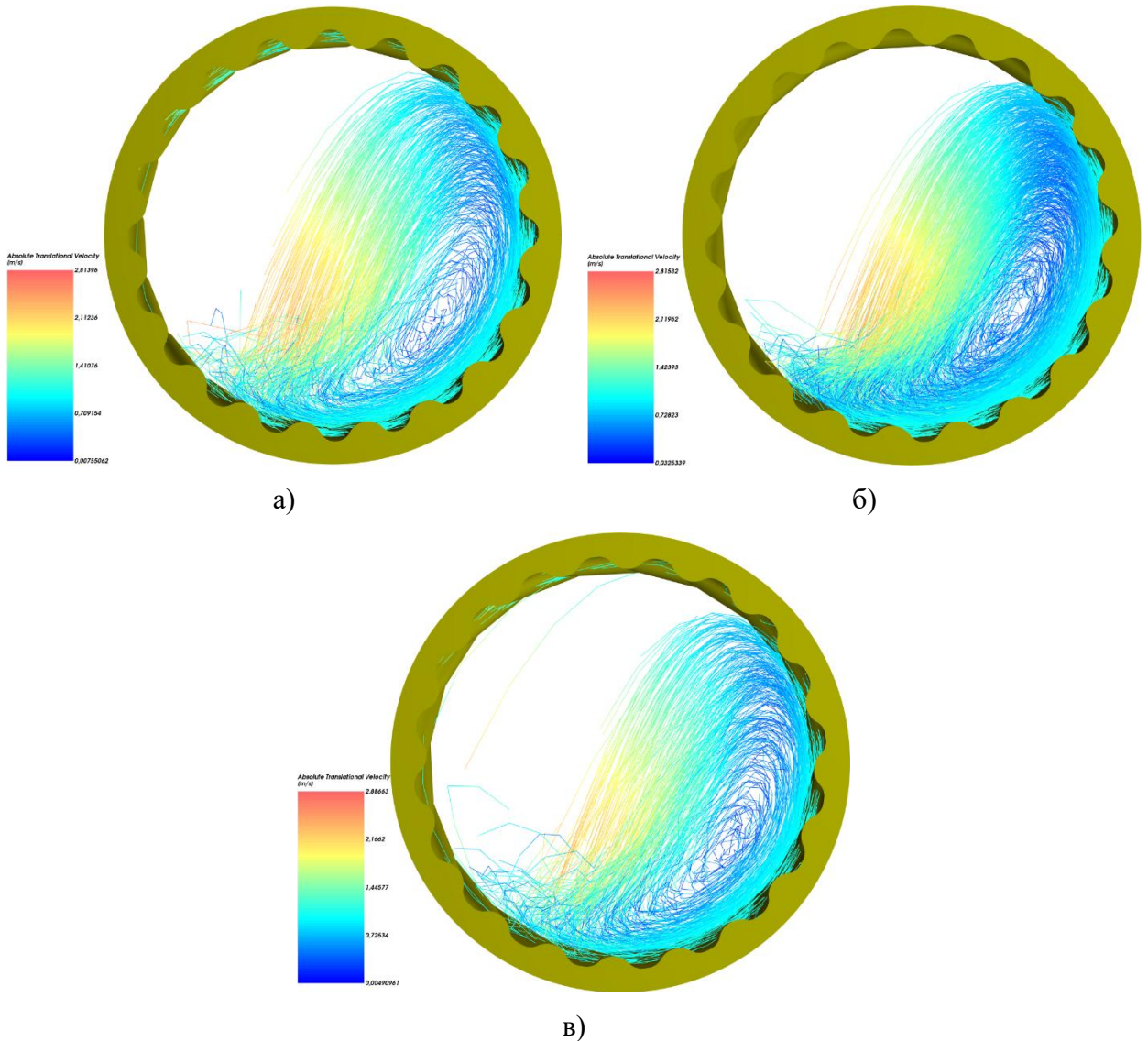


Рисунок 3.53 – Траектория и скорости движения мелющих тел при волнистой футеровке при $t=20$ ед., $h=20$ мм, $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин:
 а – $\alpha=10^\circ$; б – $\alpha=15^\circ$, в – $\alpha=20^\circ$

При использовании волнистой футеровки при количестве выступов $t=20$ ед., высоте выступа $h=20$ мм, угле наклона футеровки $\alpha=10^\circ$, коэффициенте загрузки $\varphi=0,30$ и частоте вращения барабана $n=46,51$ об/мин максимальная скорость

движения мелющих тел составляет 2,81 м/с, потребляемая мощность составляет 527,31 Вт (рис. 3.53, а). При этом ряд мелющих тел работают в критическом режиме, что снижает эффективность измельчения (рис. 3.53, а, в). С увеличением угла наклона футеровки α до 15° максимальная скорость увеличивается до 2,81 м/с (рис. 3.53, б), потребляемая мощность при этом составляет 484,67 Вт (рис. 3.53, б). Мелющие тела в этом случае работают в смешанном режиме. При последующем увеличении угла наклона футеровки α до 20° максимальная скорость увеличивается до 2,89 м/с (рис. 3.53, в), потребляемая мощность при этом составляет 536,04 Вт (рис. 3.53, в).

При угле наклона $\alpha=20^\circ$ ряд мелющих тел работает в критическом режиме, поэтому данная конфигурация продольного профиля футеровки не является рациональной.

Таким образом, метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы на основе цифрового моделирования поперечного и продольного профиля футеровки позволяет на стадии проектирования задавать любой профиль футеровки с выступами любой высоты, с волнообразной, ступенчатой, конической формой, рассчитывать для этого профиля траектории движения мелющих тел, скорости движения и удара, кинетическую, потенциальную и суммарную энергию шара, число шаров, ударяющих о «пята». При этом учитывается коэффициент загрузки мелющих тел, их состав по диаметрам и число шаров каждого диаметра, средневзвешенный диаметр мелющих тел, частота вращения, количество измельчаемого материала и размер его частиц.

Представленный метод применяется для проектирования профиля футеровки на каждом характерном участке барабана мельницы вдоль его продольной оси от загрузки до выгрузки. Она целесообразна при проектировании футеровки для первых камер мельницы, поскольку вторые камеры как правило футеруются цилиндрическими ребристыми плитами, а мелющие тела во вторых камерах работают в каскадном режиме измельчения.

3.6 Выводы.

1. Определены физико-механические свойства для каждой пары

контактов измельчаемого материала, мелющей загрузки и футеровки.

2. Разработаны подходы к созданию моделей симуляции режимов работы мелющей загрузки с помощью цифрового моделирования на основе метода дискретных элементов.

3. Создан цифровой двойник барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением профиля футеровки, применяемый для проведения моделирования, учитывающего конструктивные особенности футеровки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026614550 от 16.02.2026 г., позволяющей автоматизировать операции по разработке множества цифровых двойников барабанной мельницы.

4. Разработан метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением поперечного и продольного профиля футеровки на основе цифрового моделирования, позволяющий выполнить анализ траекторий движения мелющих тел, определить скоростные и энергетические параметры мелющей загрузки, определить потребляемую мощность привода, осуществить оценку характера и величины износа футеровки, провести оценку эффективности процесса измельчения.

5. По результатам цифрового моделирования различных исполнений футеровок и исследования режимов работы мелющей загрузки определены рациональные режимы работы мелющих загрузки, достигаемые при частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин, определено максимальное значение потребляемой мощности $P=652$ Вт, что подтверждается сходимостью с расчетными данными, расхождение с которыми не превышает 9%.

6. Установлено влияние варьируемых параметров цифрового моделирования на степень износа рабочей поверхности футеровки, и определено что на степень износа рабочей поверхности футеровки оказывают существенное влияние частота вращения барабана мельницы и коэффициент загрузки. При этом, минимальной степенью износа, равной 15,1% обладает волнистая футеровка, при износе которой режим работы мелющей загрузки изменяется незначительно.

7. Установлено, что максимальная эффективность режимов работы

мельшей загрузки достигается при использовании двух конфигураций футеровки: футеровки с одинарными выступами при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., $h=10$ мм и волнистой футеровки при $\varphi=0,30$, $n=46,51$ об/мин, $t=20$ ед., $h=20$ мм.

4 ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

4.1 Цель и задачи экспериментальных исследований.

С целью определения и обоснования рациональных параметров режимов работы лабораторной барабанной шаровой мельницы, а также верификации разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки на основе цифрового моделирования требуется провести лабораторные эксперименты. В ходе экспериментальных исследований надлежит установить зависимости влияния основных конструктивных и технологических факторов на потребляемую мощность привода, тонкость готового продукта и удельный расход энергии.

Целью экспериментальных исследований выступает определение влияния конструктивных параметров футеровки и технологических параметров на процесс измельчения.

Для достижения поставленной цели разработаны следующие этапы проведения экспериментальных исследований:

- изготовление комплектов футеровки и выступов различной высоты с применением многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий;
- определение конструктивных и технологических параметров лабораторной барабанной шаровой мельницы, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность процесса измельчения;
- определение параметров, характеризующих эффективность процесса измельчения в лабораторной барабанной шаровой мельнице;
- разработка и применение плана проведения многофакторного эксперимента;
- выбор контрольно-измерительного оборудования, методики, а также средств контроля процесса измельчения;
- проведение экспериментальных исследований, наблюдение за процессом, и регистрация параметров, характеризующих процесс измельчения;

- сравнительный анализ траекторий движения мелющих тел, показателей потребляемой мощности привода и износа футеровки, полученных в ходе цифрового моделирования и экспериментальных исследований;
- сравнение полученных результатов экспериментальных исследований с теоретическими;
- обработка полученных результатов и анализ влияния конструктивных и технологических параметров лабораторной барабанной шаровой мельницы на параметры, характеризующие эффективность процесса измельчения.

Алгоритм реализации программы экспериментальных исследований процесса измельчения в лабораторной барабанной шаровой мельнице, отражающий логическую последовательность этапов исследования, схематически представлены на рисунке 4.1.

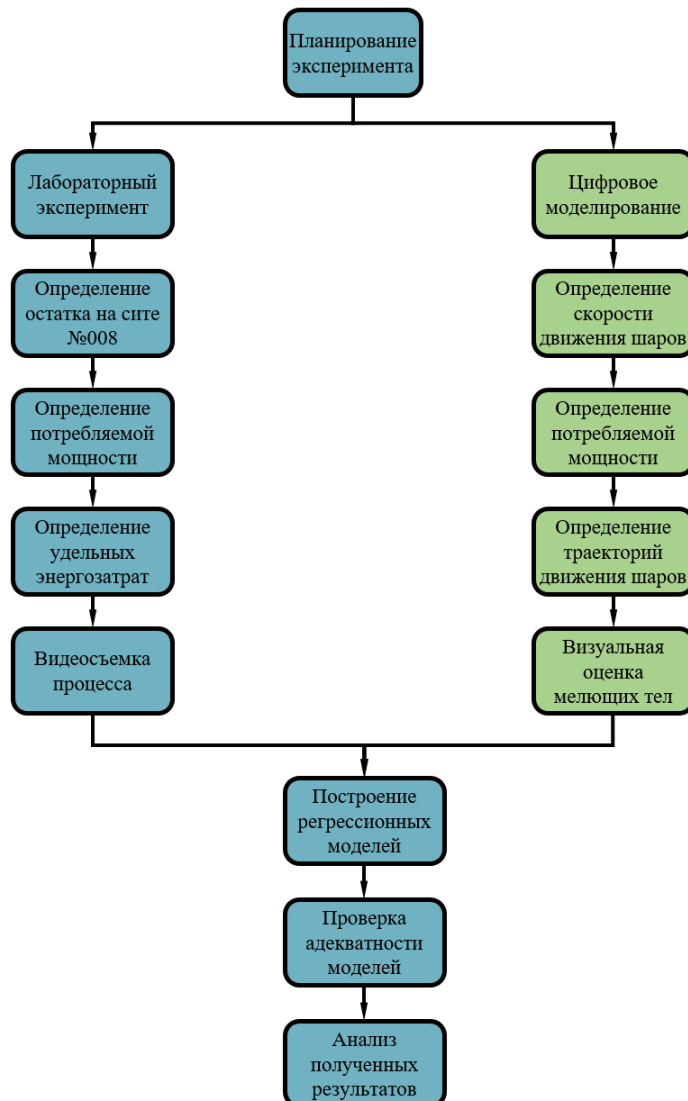


Рисунок 4.1 – Алгоритм проведения экспериментальных исследований процесса измельчения

4.2 Описание лабораторной установки барабанной шаровой мельницы и контрольно-измерительного оборудования.

Для проведения экспериментальных исследований применяется лабораторная барабанная шаровая мельница $\varnothing 0,5 \times 0,295$ м, оснащенная прозрачным окном на одном из торцов, установленным на фланцевом соединении. Модель оснащена автоматизированной системой управления, позволяющей осуществлять регулировку частоты вращения барабана в широком диапазоне.

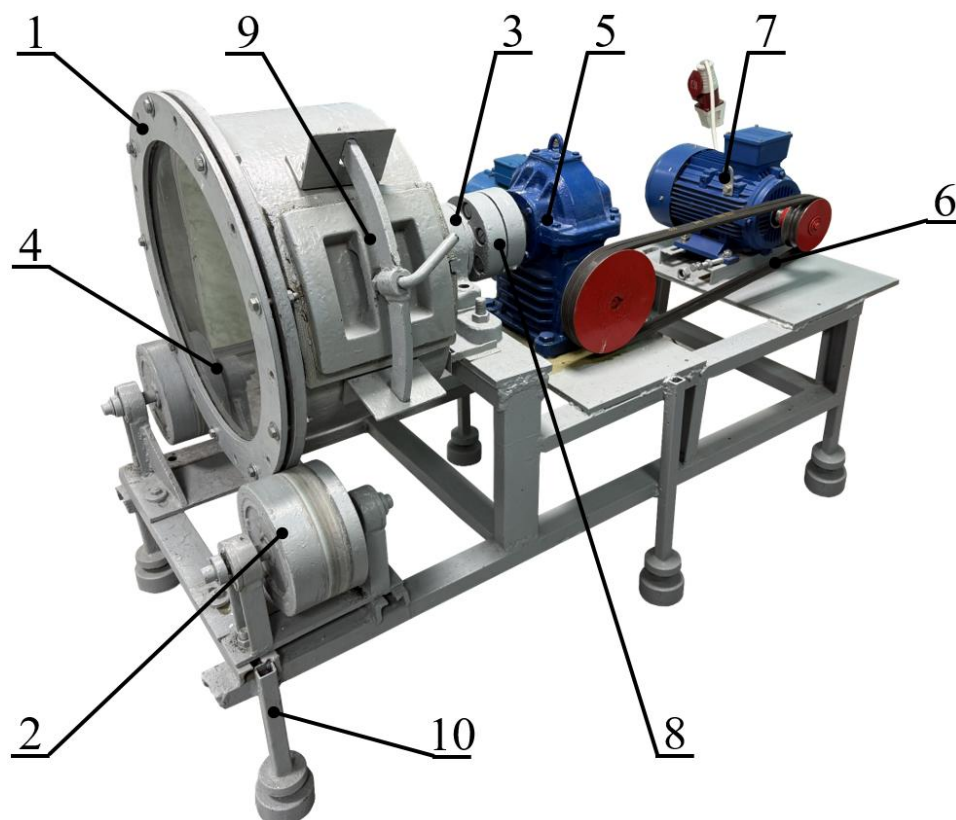


Рисунок 4.2 – Общий вид лабораторной барабанной шаровой мельницы:

- 1 – корпус; 2 – ролики; 3 – подшипник; 4 – прозрачное окно; 5 – червячный редуктор;
6 – клиноременная передача; 7 – электродвигатель; 8 – втулочно-пальцевая муфта; 9 – люк;
10 – рама

Лабораторная барабанная шаровая мельница (рис. 4.2) представляет собой корпус 1 в виде полого барабана цилиндрической формы, опирающегося на ролики 2 и подшипник 3. На одном из торцов барабанной шаровой мельницы установлено прозрачное окно 4 для визуального сравнительного анализа траекторий движения мелющих тел. Во вращение барабанная шаровая мельница приводится от электродвигателя 7 модели АИР90L4 ($P=2,2$ кВт, $n=1440$ об/мин). Электродвигатель передает вращение через клиноременную передачу 6 ($i=1,55$) на

входной вал редуктора 5 червячного типа РПЧ-120 ($i=19,5$), который соединен с корпусом мельницы втулочно-пальцевой муфтой 8. Загрузка МТ и материала в корпус БШМ осуществляется через люк 9. Лабораторная БШМ монтируется на раму 10.

Во внутренней поверхности корпуса лабораторной барабанной шаровой мельницы устанавливается футеровка (рис. 4.3), изготовленная из композитного материала с применением многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий.



Рисунок 4.3 – Футеровка, установленная в корпусе лабораторной барабанной шаровой мельницы

Многономенклатурное гибридное производство является одним из приоритетных направлений развития промышленности с целью перехода к цифровым, интеллектуальным и гибким производственным системам. В этих условиях особую актуальность приобретают технологии, позволяющие осуществлять быстрое и экономически эффективное производство сложной и мелкосерийной продукции. Многономенклатурное гибридное производство объединяет в единый технологический процесс аддитивные технологии и традиционную механическую обработку. Данный подход позволяет создавать детали со сложной внутренней геометрией, которые невозможно получить классическими методами. Многономенклатурное производство в свою очередь ориентировано на изготовление и выпуск нескольких видов изделий. Оно

характеризуется широкой номенклатурой, высокой гибкостью и непрерывным потоком продукции.

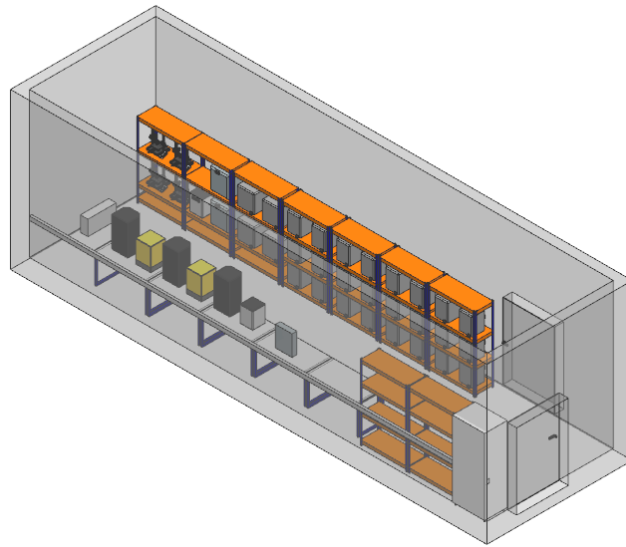


Рисунок 4.4 – Цифровой двойник технологического отдела аддитивного производства

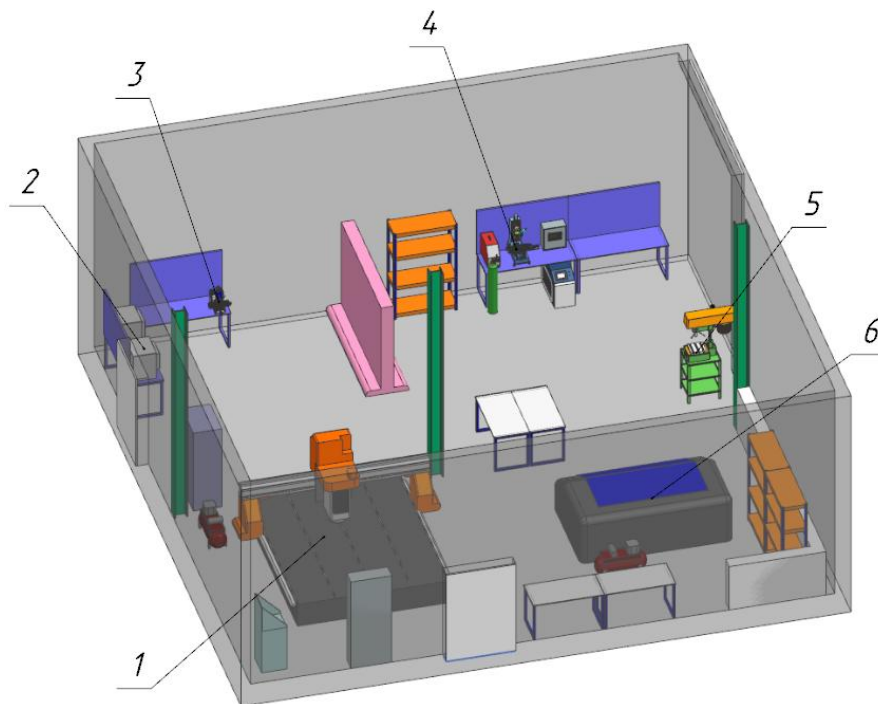


Рисунок 4.5 – Цифровой двойник технологического отдела механической обработки:

1 – фрезерный станок с ЧПУ; 2 – муфельная печь; 3 – настольный сверлильный станок;

4 – лабораторный гибридный станок; 5 – сверлильный станок; 6 – лазерный станок

В рамках реализации государственного задания №FZWN-2024-0006 «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников» разработаны цифровые двойники технологических

перделов аддитивного производства (рис. 4.4) и механической обработки (рис. 4.5).

Технологический передел аддитивного производства (рис. 4.4) состоит из 3D-принтеров, работающих по аддитивной технологии *FDM* и 3D-принтеров, работающих по аддитивной технологии *MSLA*.

Технологический передел механической обработки многономенклатурного гибридного производства включает в себя фрезерный станок с ЧПУ 1, муфельную печь 2, настольный сверлильный станок 3, лабораторный гибридный станок с ЧПУ 4, сверлильный станок 5 и лазерный станок 6.

Изготовление комплектов футеровки и выступов различной высоты осуществлялось с применением оборудования (рис. 4.6) технологического передела аддитивного производства многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий.



Рисунок 4.6 – Оборудование технологического передела аддитивного производства

В качестве технологии изготовления комплектов футеровки и выступов была выбрана аддитивная технология послойного наплавления *FDM* (*Fused Deposition Modeling*). Данная технология основана на экструзии материала, при которой пластиковая нить подается в экструдер с нагревательным элементом. Нагревательный элемент экструдера плавит нить до вязкотекучего состояния.

Далее расплавленный пластик под давлением экструдируется через сопло по траектории заданной управляющей программой и осаждается на рабочем поле.

Применение многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий позволяет расширить возможности предприятий цементной промышленности ввиду обеспечения возможности изготовления футеровок барабанных шаровых мельниц с различными геометрическими параметрами, материалами и функциональными характеристиками. Данный способ производства футеровок барабанных шаровых мельниц позволяет минимизировать отходы материала благодаря послойному созданию детали, а исключение поддерживающих структур и сложной постобработки снижает общую стоимость производства. Гибридные станки, позволяющие выполнять все технологические операции, в частности, аддитивные и субтрактивные, на одном столе без перемещения детали, обеспечивают сокращение непроизводительного времени и логистических затрат. Кроме этого, снижается потребность в дополнительной технологической оснастке ввиду чего сокращается время на переналадку оборудования.

С целью апробации возможностей применения многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий выполнено изготовление футеровок из композитных материалов. В качестве материала для изготовления футеровок выбран пластик *PETG* с содержанием 15% углеродного волокна, обладающий повышенной жесткостью и прочностью, стабильностью геометрии. Комплекты изготовленных выступов футеровки различной высоты h , представлены на рисунке 4.7.

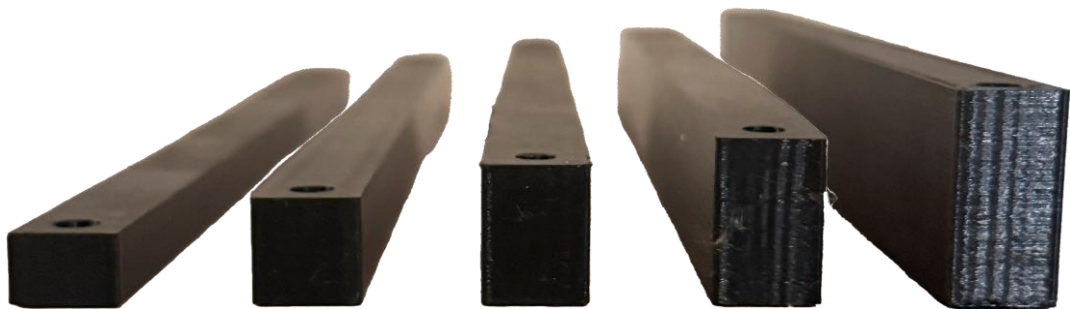


Рисунок 4.7 – Комплект выступов футеровки различной высоты h



Рисунок 4.8 – Автоматизированная система управления приводом лабораторной барабанной шаровой мельницы

Управление частотой вращения барабана мельницы и регистрация показателей потребляемой мощности привода осуществлялось с помощью автоматизированной системы управления приводом лабораторной барабанной шаровой мельницы (рис. 4.8), которая состоит из частотного преобразователя 1 модели *Schneider Electric ATV71HU55N4*, работающего в диапазоне частот от 0 до 50 Гц с точностью регулировки 0,001 Гц. Преобразователь частоты соединен с магнитным пускателем 2 и сетевым дросселем 3. Для подключения персонального компьютера к частотному преобразователю применяется конвертер 4. Запуск частотного преобразователя осуществляется через автоматический выключатель 5.

Лабораторная барабанная шаровая мельница представляет собой установку периодического действия. Мелющие тела и измельчаемый материал, масса которых предварительно взвешена на весах, загружаются в корпус 1 мельницы через люк 9. Затем, запускается автоматизированная система управления приводом и на частотном преобразователе устанавливается частота тока, необходимая для задания требуемой частоты вращения корпуса мельницы. Вращающий момент от электродвигателя 7 посредством клиноременной передачи 6 подводится к быстроходному валу редуктора 5. Тихоходный вал редуктора соединен с корпусом 1 мельницы втулочно-пальцевой муфтой 8.

Регистрация траекторий движения тел мелющей загрузки в барабане мельницы осуществлялась через прозрачное окно с помощью высокоскоростной съемки.

4.3 Характеристика измельчаемого материала.

В рамках экспериментальных исследований процесса измельчения на лабораторной установке барабанной шаровой мельницы в качестве измельчаемого материала выбран кварцевый песок фракции -1.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства кварцевого песка

Наименование параметра	Ед. из-я	Значение
Плотность	кг/м ³	2400
Насыпная плотность	кг/м ³	1400
Твердость (по шкале Мооса)	-	7

4.4 План и программа проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования процесса измельчения сыпучих материалов в лабораторной барабанной шаровой мельнице направлено на выявление рациональных условий его протекания. Указанный процесс рассматривается в рамках экспериментальных исследований в качестве объекта исследования [101], предназначенного для апробации разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки на основе цифрового моделирования поперечного и продольного профиля футеровки.

Определение рационального плана лабораторного эксперимента напрямую зависит от цели исследования и решаемых задач. Лабораторный эксперимент выполняется в несколько этапов, результаты, полученные на каждом этапе, задают направление дальнейшей работы. Получение результатов и последующий анализ эффекта от каждого фактора и их парного взаимодействия возможно за счет варьирования всех основных факторов благодаря планированию эксперимента [102, 103].

Для проведения экспериментальных исследований выбран центральный композиционный ротатабельный план полного факторного эксперимента (ПФЭ ЦКРП-2⁴) [104, 105]. В случае использования ротатабельных планов второго порядка отпадает необходимость в постановке дополнительных параллельных

опытов для оценки дисперсии воспроизводимости [102, 104]. На основании результатов, определенных в ходе экспериментальных исследований в соответствии с ПФЭ ЦКРП-2⁴, осуществляется построение уравнения регрессии второго порядка (4.1):

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_0 \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k b_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} \cdot x_j^2, \quad (4.1)$$

где y – функция отклика;

b_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии;

b_j – коэффициент при линейном эффекте взаимодействия;

b_{uj} – коэффициент при парном эффекте взаимодействия;

b_{jj} – коэффициент при квадратичном эффекте взаимодействия;

x_u, x_j – уровни варьирования факторов.

При этом, значимость каждого коэффициента в уравнении регрессии оценивается проверкой по критерию Стьюдента:

$$t = \frac{|b_j|}{s_{\{b_j\}}}, \quad (4.2)$$

где b_j – коэффициент при факторах варьирования в уравнении регрессии;

$s_{\{b_j\}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Экспериментальные исследования выполняются отдельными сериями, что позволяет минимизировать влияние систематических ошибок, случайных погрешностей, а также инструментальных погрешностей, обусловленных характеристиками контрольно-измерительного оборудования. Каждая экспериментальная серия состоит из n повторных опытов, что обеспечивает репрезентативность выборки и повышает достоверность получаемых данных. Суммарная погрешность при измерении функций отклика рассчитывается в соответствии с формулой 4.3):

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{случ}})^2 + (\sigma_{\text{приб}})^2}, \quad (4.3)$$

где $\Delta x_{\text{случ}}$ – случайная погрешность измерений;

$\sigma_{\text{приб}}$ – приборная погрешность.

Снижение влияния случайной погрешности на результаты измерений достигается посредством увеличения объема экспериментальных данных – то есть за счет многократного повторения измерительных процедур. Количество повторных опытов определяется следующим образом:

$$N = 4 \cdot n_1 \cdot \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{\text{приб}}^2}, \quad (4.4)$$

где n_1 – количество проведенных измерений;

σ_n – значение полученной погрешности измерений;

$\sigma_{\text{приб}}$ – значение приборной погрешности.

Количество повторных опытов в рамках экспериментальных исследований равно 3. Оценка адекватности построенной регрессионной модели выполнена с использованием критерия Фишера [106].

Для проведения экспериментальных исследований факторами эксперимента по измельчению материала в лабораторной барабанной шаровой мельнице неизменными приняты следующие параметры:

- количество камер измельчения – 1;
- внутренний диаметр футеровки барабана мельницы $D=0,45$ м;
- длина камеры измельчения $L=0,285$ м;
- диаметр мелющих тел $d_{30} = 30$ мм (35%), $d_{20} = 20$ мм (30%), $d_{15} = 15$ мм (15%), $d_{10} = 10$ мм (20%);
- время работы мельницы $t_{\text{раб}}=30$ мин.

Исследуемыми факторами эксперимента по измельчению в барабанной шаровой мельнице были выбраны:

- частота вращения барабана мельницы $n (x_1)$, об/мин;
- коэффициент загрузки мельницы мелющими телами и материалом $\varphi (x_2)$, доли ед.;
- высота выступов футеровки $h (x_3)$, мм;
- количество выступов футеровки $t (x_4)$, ед.

В качестве функций отклика, определяющих характер процесса измельчения, были выбраны:

- потребляемая мощность привода мельницы P , кВт;
- производительность Q , кг/ч;
- удельный расход энергии q , кВт·ч/кг;
- остаток на сите №008, характеризующий тонкость помола готового продукта, $\sum R_{008}$, %.

Количество материала (кварцевого песка) загружаемого в барабанную шаровую мельницу для измельчения в ходе проведения лабораторных экспериментов составляет 13% от массы мелющих тел [2, 52, 107].

В соответствии с принятым центральным композиционным ротатбельным планом полного 4-х факторного эксперимента принято пять уровней варьирования факторов (табл. 4.2): -1 – минимальный; 0 – средний; +1 – максимальный; -2, +2 – звездные точки.

Таблица 4.2 – Исследуемые факторы и уровни их варьирования ПФЭ ЦКРП-2⁴

Параметр	Обозначение	Ед. из-я	Значение				
			-2	-1	0	+1	+2
Частота вращения барабана мельницы	$x_1 (n)$	об/мин	40,51	43,51	46,51	49,51	52,51
Коэффициент загрузки мельницы мелющими телами и материалом	$x_2 (\varphi)$	доли ед.	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Высота выступов	$x_3 (h)$	мм	10	15	20	25	30
Количество выступов	$x_4 (t)$	ед.	8	12	16	20	24

Производительность лабораторной барабанной шаровой мельницы и остаток готового продукта на сите №008 определялись следующим образом. В процессе измельчения лабораторная барабанная шаровая мельница останавливается каждые

10 мин и через порошок рассеиватель *RP-5* [108, 109] просеивается проба материала. Рассеивание проб осуществляется в течение 30 мин.

Регистрация мощности потребляемой приводом лабораторной барабанной шаровой мельницы осуществляется путем вывода информации в программном обеспечении *SoMove Lite*, подключенном к частотному преобразователю.

Матрица планирования ПФЭ ЦКРП-2⁴ представлена в таблица 4.3.

Таблица 4.3 – Матрица планирования ПФЭ ЦКРП-2⁴

Номер опыта	Факторы			
	x_1	x_2	x_3	x_4
1	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
2	-1,0	+1,0	+1,0	+1,0
3	+1,0	-1,0	+1,0	+1,0
4	-1,0	-1,0	+1,0	+1,0
5	+1,0	+1,0	-1,0	+1,0
6	+1,0	-1,0	-1,0	+1,0
7	+1,0	-1,0	-1,0	+1,0
8	-1,0	-1,0	-1,0	+1,0
9	+1,0	+1,0	+1,0	-1,0
10	-1,0	+1,0	+1,0	-1,0
11	+1,0	-1,0	+1,0	-1,0
12	-1,0	-1,0	+1,0	-1,0
13	+1,0	+1,0	-1,0	-1,0
14	-1,0	+1,0	-1,0	-1,0
15	1,0	-1,0	-1,0	-1,0
16	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
17	+2	0,0	0,0	0,0
18	-2	0,0	0,0	0,0
19	0,0	+2	0,0	0,0
20	0,0	-2	0,0	0,0
21	0,0	0,0	+2	0,0
22	0,0	0,0	-2	0,0
23	0,0	0,0	0,0	+2
24	0,0	0,0	0,0	-2
25	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,0	0,0	0,0	0,0

4.5 Обоснование выбора функций отклика и основных факторов экспериментальных исследований.

Эффективность процесса измельчения в барабанной шаровой мельнице оценивается производительностью, зависящей от времени измельчения материала, времени загрузки материала и времени разгрузки, потребляемой мощностью привода, удельным расходом энергии, остатком на сите №008, характеризующим тонкость помола готового продукта.

В рамках проведения экспериментальных исследований в качестве функций отклика выбраны следующие показатели: потребляемая мощность привода, удельный расход энергии и остаток на сите, характеризующий тонкость помола готового продукта. Указанные параметры находятся под влиянием ряда управляемых факторов, в том числе:

На функции отклика, выбранные в рамках экспериментальных исследований, а именно потребляемую мощность привода, удельный расход энергии, остаток на сите, влияют следующие факторы:

$$P, \Sigma R_{008}, q = f(n, \varphi, h, t, D, L, t_{\text{изм}}, \rho), \quad (4.5)$$

где n – частота вращения барабана мельницы, об/мин;

φ – коэффициент загрузки мельницы, доли ед.;

h – высота выступов футеровки, мм;

t – количество выступов футеровки, ед.;

D – внутренний диаметр барабана мельницы в свету, мм;

L – длина камеры измельчения, мм;

$t_{\text{изм}}$ – время измельчения, мин;

ρ – плотность загрузки, кг/м³.

Проанализировав результаты цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы и режимов работы мелющей загрузки, было принято минимальное значение частоты вращения барабана мельницы, равное 40,51 об/мин, при котором режим работы мелющей загрузки переходит из каскадного в водопадный, необходимый для измельчения материала в первой камере мельницы. Максимальное значение частоты вращения барабана принято

$n=52,51$ об/мин, ввиду того что при более высоких частотах вращения наблюдается переход мелющей загрузки в критический режим работы.

Коэффициент загрузки φ барабана мельницы мелющими телами и материалом также оказывает сильное влияние на производительность барабанной шаровой мельницы. Максимальное значение коэффициента загрузки мельницы принимаем равным 0,40. Более высокие значения коэффициента загрузки применять нецелесообразно ввиду уменьшения свободного пространства для движения мелющих тел и циркуляции материала, в этом случае, мелющие тела не поднимаются на достаточную высоту для создания ударного воздействия о материал. Кроме этого, растет мощность, потребляемая приводом барабанной шаровой мельницы без роста производительности. Минимальное значение коэффициента загрузки принято равным 0,20, так как при значении коэффициента, ниже указанного уменьшается количество соударений мелющих тел о материал, увеличивается время, необходимое для достижения требуемой тонкости помола и снижается производительность мельницы.

Количество выступов футеровки барабанной шаровой мельницы подобрано таким образом, чтобы обеспечивался водопадный режим работы мелющей загрузки, необходимый для измельчения материала в первой камере мельницы. Минимальное значение количества выступов принято равным 8 ед., при меньших значениях количества выступа мелющие тела не вовлекаются в водопадный режим. В ходе цифрового моделирования установлено, что максимально необходимое количество выступов футеровки равно 24 ед. Это обусловлено тем, что большее количество выступов футеровки применять нецелесообразно из-за снижения эффективности измельчения при чрезмерном соударении мелющих тел о футеровку ввиду их подъема на большую величину, из-за чего мелющие тела не оказывают ударного воздействия на материал. При достаточно большом количестве выступов футеровки изменяется режим работы мелющих тел, переходя из водопадного в каскадный. Это связано с тем, что расстояния между соседними выступами малы, и мелющие тела не попадают в данные пространства и не захватываются выступами.

Установлено, что минимальная высота выступов футеровки, достаточная для обеспечения водопадного режима работы мелющих тел, составляет $h=10$ мм. Увеличение высоты выступов h больше 30 мм является нецелесообразным, ввиду снижения эффективности процесса измельчения, при этом мелющие тела соударяются с футеровкой.

4.6 Выводы.

1. Разработан алгоритм проведения экспериментальных исследований процесса измельчения для решения поставленных задач.
2. Приведено описание экспериментальной установки лабораторной барабанной шаровой мельницы и контрольно-измерительного оборудования, применяемого в ходе экспериментальных исследований.
3. Изготовлен комплект футеровки и выступов различной высоты из композитных материалов с применением многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий для проведения экспериментальных исследований.
4. Приведена методология проведения экспериментальных исследований в соответствии с центральным композиционным ротатбельным планом полного факторного эксперимента, определена значимость коэффициентов по критерию Стьюдента и адекватность регрессионной модели по критерию Фишера, определены исследуемые факторы и функции отклика.
5. Обоснован выбор функций отклика и основных факторов для проведения экспериментальных исследований процесса измельчения.

5 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

С целью подтверждения адекватности аналитических выражений и метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования проведены экспериментальные исследования. С помощью полученных данных осуществляется оценка варьируемых параметров и их влияние на параметры оптимизации.

В ходе проведения экспериментальных исследований процесса измельчения в барабанной шаровой мельнице определялась производительность Q мельницы периодического действия, которая находилась в диапазоне от 8,23 кг/ч до 16,11 кг/ч.

Таблица 5.1 – Результаты экспериментальных исследований

Номер опыта	Варьируемые факторы				Исследуемые факторы			
	x_1	x_2	x_3	x_4	P , Вт	$\sum R_{008}$, %	Q , кг/ч	q , Вт·ч/кг
1	-1	-1	-1	-1	374,24	11,23	10,54	35,51
2	1	-1	-1	-1	420,60	12,56	10,38	40,51
3	-1	1	-1	-1	500,95	13,10	14,44	34,68
4	1	1	-1	-1	547,08	13,50	14,38	38,05
5	-1	-1	1	-1	375,80	11,70	10,48	35,84
6	1	-1	1	-1	363,66	14,20	10,18	35,70
7	-1	1	1	-1	437,38	13,10	14,44	30,28
8	1	1	1	-1	508,66	12,60	14,52	35,01
9	-1	-1	-1	1	382,39	14,20	10,19	37,54
10	1	-1	-1	1	398,40	14,30	10,17	39,15
11	-1	1	-1	1	491,53	13,70	14,34	34,26
12	1	1	-1	1	529,05	13,80	14,33	36,92
13	-1	-1	1	1	341,17	13,50	10,27	33,22
14	1	-1	1	1	321,89	13,40	10,28	31,30
15	-1	1	1	1	457,49	13,75	14,34	31,91
16	1	1	1	1	463,77	13,10	14,44	32,10
17	-2	0	0	0	431,16	11,40	12,62	34,15
18	2	0	0	0	431,15	14,20	12,22	35,26
19	0	2	0	0	431,18	15,20	16,11	26,76
20	0	-2	0	0	430,99	13,40	8,23	52,38
21	0	0	2	0	431,00	15,20	12,08	35,67
22	0	0	-2	0	430,48	13,71	12,29	35,01
23	0	0	0	2	414,17	11,43	12,62	32,82

24	0	0	0	-2	431,07	13,60	12,31	35,01
25	0	0	0	0	431,16	9,57	12,88	33,46
26	0	0	0	0	431,15	9,60	12,88	33,47
27	0	0	0	0	430,99	9,62	12,87	33,46
28	0	0	0	0	431,18	9,82	12,84	33,55
29	0	0	0	0	430,48	9,73	12,86	33,47
30	0	0	0	0	431,00	9,45	12,90	33,40
31	0	0	0	0	431,07	9,36	12,91	33,37

5.1 Сравнительный анализ режимов работы мелющей загрузки.

С целью определения адекватности результатов цифрового моделирования режимов работы мелющей загрузки при использовании различных типов футеровки барабанной шаровой мельницы проведен сравнительный анализ траекторий движения мелющих тел (рис. 5.1), полученных в ходе цифрового моделирования режимов работы мелющей загрузки с эмпирическими данными, полученными в рамках экспериментальных исследований.

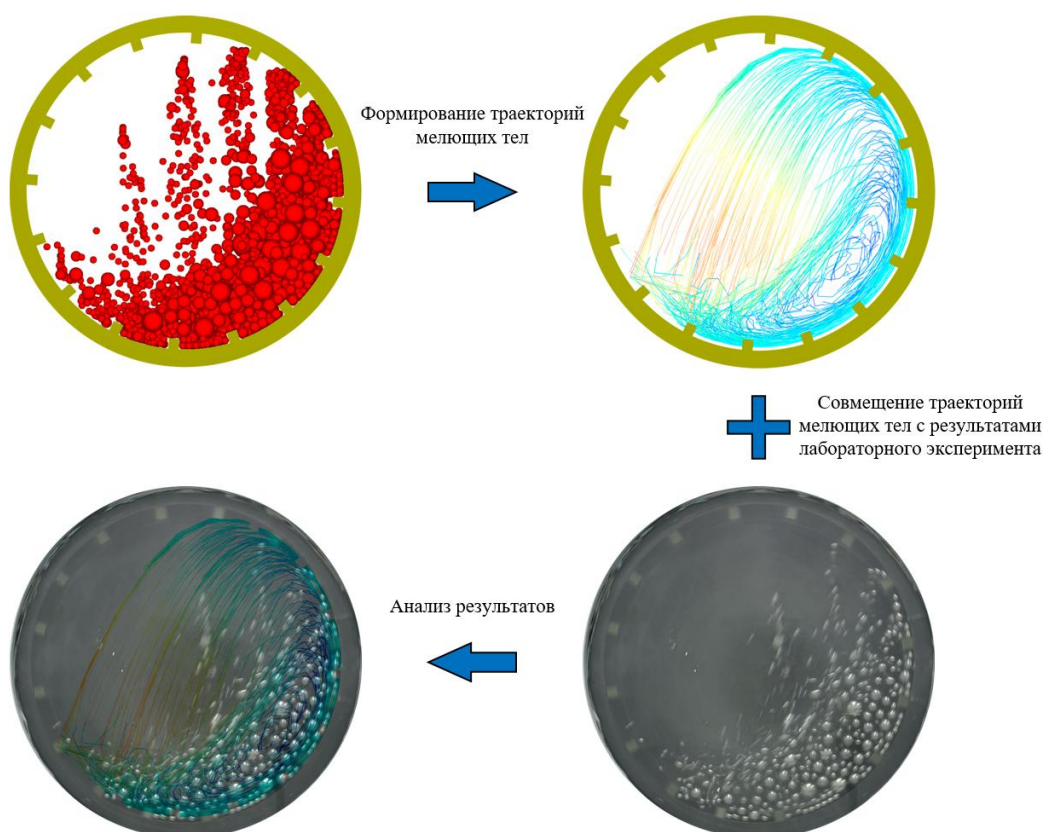


Рисунок 5.1 – Процесс анализа траекторий движения мелющих тел мелющей загрузки

Анализ траекторий движения мелющих тел (рис. 5.1), полученных в результате цифрового моделирования режимов работы мелющей загрузки, а также экспериментальных исследований, включает три последовательных этапа:

В рамках сравнительного анализа траекторий движения мелющих тел, спрогнозированных при цифровом моделировании режимов работы мелющей загрузки и эмпирических данных, полученных при экспериментальных исследованиях, выявлены области, на которых видна полная идентичность результатов цифрового моделирования и экспериментальных исследований (рис. 5.2, 5.3).

На рисунке 5.2, а представлен сравнительный анализ траекторий движения мелющих тел, из которого можно сделать вывод, что при коэффициенте загрузки барабана мельницы $\varphi=0,20$, высоте выступов $h=15$ мм, количестве выступов $t=16$ ед. и частоте вращения барабана мельницы $n=40,4$ об/мин наблюдается идентичность траекторий движения мелющих тел, полученных в ходе цифрового моделирования и экспериментальных исследований.

Высокая степень идентичности траекторий движения мелющих тел (рис. 5.2, б), полученных в ходе цифрового моделирования и экспериментальных исследований, наблюдается так при частоте вращения 43,51 об/мин. Аналогичная идентичность траекторий движения мелющих тел наблюдается при частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин (рис. 5.2, в). С увеличением частоты вращения барабана мельницы до $n=49,51$ об/мин (рис. 5.2, г) заметна интенсификация движения мелющих тел, большее количество мелющих тел большего диаметра вовлекается в водопадный режим работы, мелющие тела падают на пятку материала. При этом, наблюдается падение мелющих тел не только на пятку материала, но и на футеровку, ввиду чего возрастает ее износ. Кроме этого, уменьшается малоподвижное ядро, из-за чего мелющие тела меньше перекатываются друг по другу.

При частоте вращения барабана мельницы $n=52,51$ об/мин (рис. 5.2, д) большое количество мелющих тел работает в водопадном режиме, также увеличивается количество соударений мелющих тел о футеровку, что приводит к увеличению степени износа.

С увеличением коэффициента загрузки до 0,30 наблюдается высокая идентичность траекторий движения мелющих тел при цифровом моделировании и

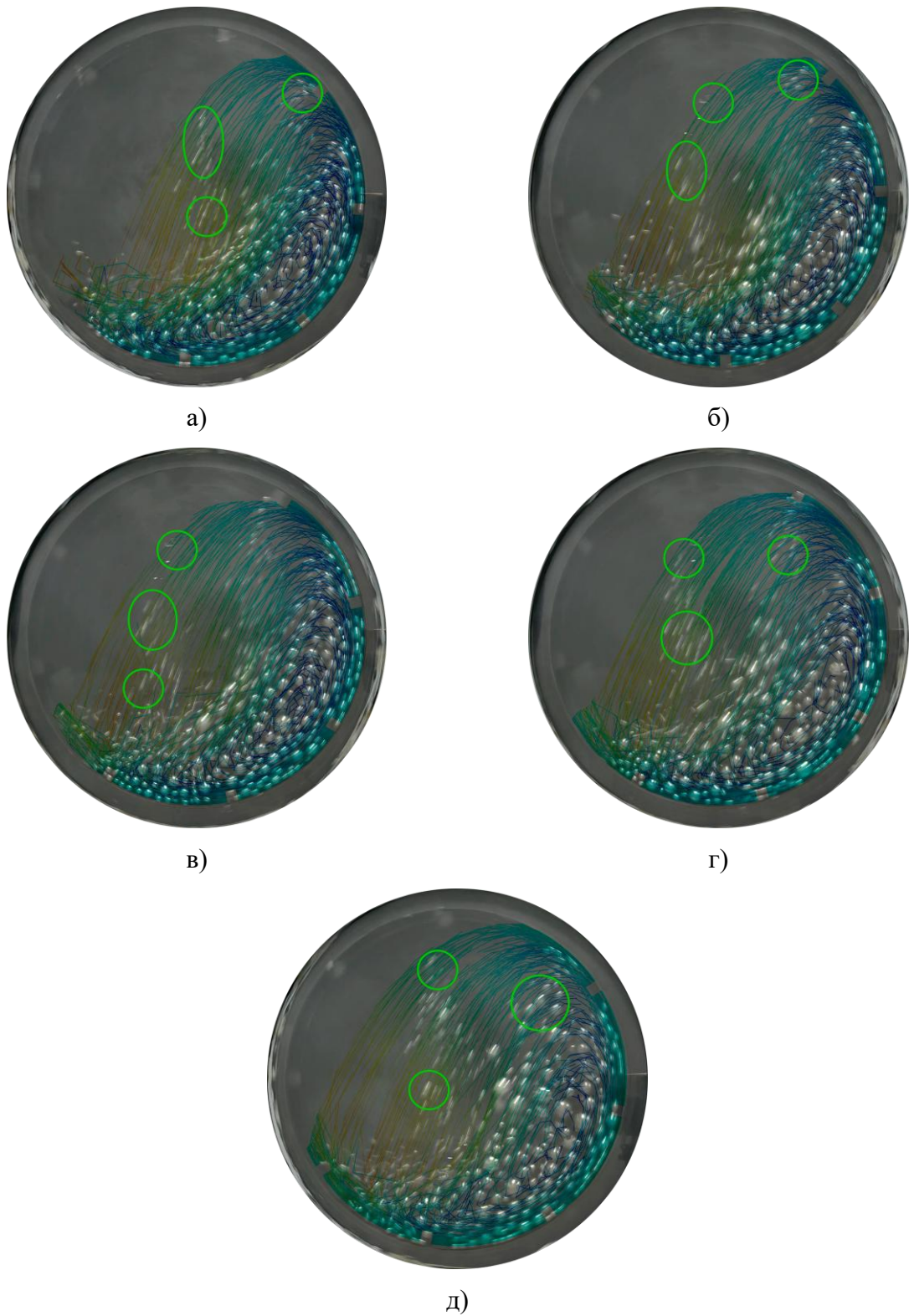


Рисунок 5.4 – Траектории движения мелющих тел при $\varphi=0,25$, $h=20$ мм, $t=8$ ед.:
 а – $n=40,51$ об/мин; б – $n=43,51$ об/мин; в – $n=46,51$ об/мин; г – $n=49,51$ об/мин;
 д – $n=52,51$ об/мин

При этом, на рисунке 5.3, а видно, что при частоте вращения барабана мельницы $n=40,51$ об/мин в средней части загрузки образуется застойная зона, состоящая из мелющих тел диаметрами 10 мм, 15 мм и 20 мм. Мелющие тела

диаметром 30 мм не застаиваются в «мертвой зоне» и работают в смешанном режиме. С последующим увеличением частоты вращения барабана мельницы размер застойной зоны изменяется незначительно.

Однако, при увеличении частоты вращения барабана мельницы до $n=52,51$ об/мин (рис. 5.3, д) застойная зона в большей степени состоит из мелющих тел диаметрами 30 мм и 20 мм. Это объясняется тем, что при больших частотах вращения мелющие тела большего диаметра не успевают вовлечься в движение выступами футеровки и работают в каскадном режиме.

В диапазоне частот вращения барабана мельницы n от 40,51 об/мин до 52,51 об/мин (рис. 5.4, а-д) при высоте выступов $h=20$ мм, количестве выступов $t=8$ ед., коэффициенте загрузки $\varphi=0,25$ также наблюдается высокая идентичность траекторий движения мелющих тел. Из рисунка 5.2а видно, что при частоте вращения барабана мельницы $n=40,51$ об/мин наблюдается идентичность траекторий движения мелющих тел полученных в ходе экспериментальных исследований и цифрового моделирования. С увеличением частоты вращения барабана мельницы до 43,51 об/мин (рис. 5.4, б) наблюдается увеличение количества мелющих тел, вовлекающихся в водопадный режим работ. При последующем увеличении частоты вращения в диапазоне от 46,51 об/мин (рис. 5.4, в) до 52,51 об/мин (рис. 5.4, д) также увеличивается количество мелющих тел, вовлекающихся в водопадный режим работы, что в свою очередь, говорит об увеличении интенсивности соударений мелющих тел в зоне пяты материала.

В ходе сравнительного анализа траекторий движения мелющих тел при высоте выступов $h=10$ мм, количестве выступов $t=12$ ед., коэффициенте загрузки $\varphi=0,30$ и частоте вращения барабана мельницы $n=40,51$ об/мин (рис. 5.5) наблюдается высокая идентичность траекторий движения мелющих тел с результатами цифрового моделирования. При увеличении частоты вращения барабана мельницы также наблюдается высокая идентичность траекторий движения тел, полученных в ходе экспериментальных исследований и цифрового моделирования (рис. 5.5, б-д).

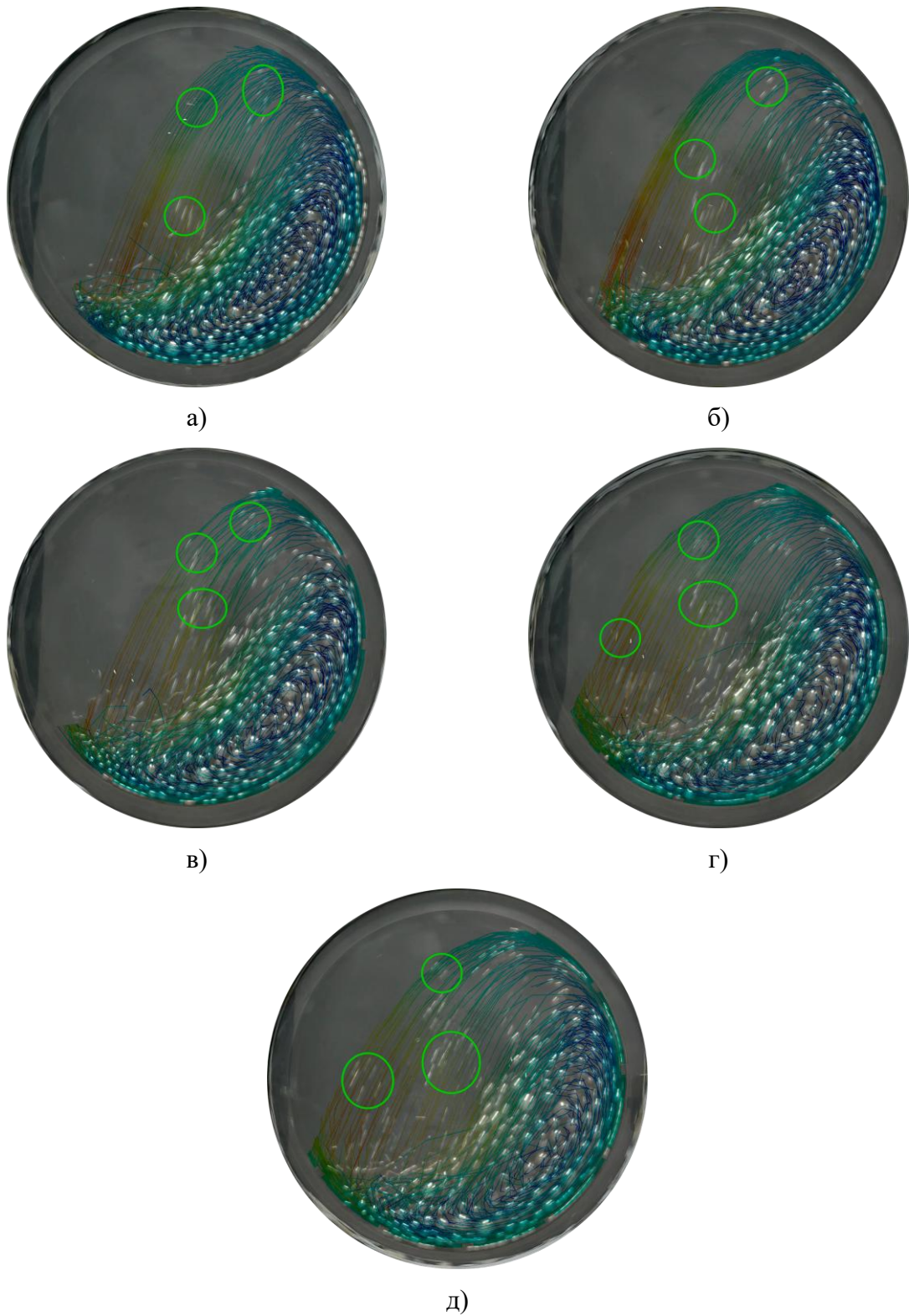


Рисунок 5.5 – Траектории движения мелющих тел при $\varphi=0,30$, $h=10$ мм, $t=12$ ед.:
 а – $n=40,51$ об/мин; б – $n=43,51$ об/мин; в – $n=46,51$ об/мин; г – $n=49,51$ об/мин;
 д – $n=52,51$ об/мин

Таким образом, можно сказать, что полученные с помощью разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы цифровые модели обладают высокой степенью адекватности и могут

применяться для цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы и режимов работы мелющей загрузки.

5.2 Анализ характера износа футеровки барабанной шаровой мельницы.

В ходе экспериментальных исследований характера износа футеровки барабанной шаровой мельницы были изготовлены комплекты футеровок из пластика с низкими физико-механическими свойствами с целью ускорения процесса изнашивания футеровки по времени.

Были получены образцы изношенных футеровок барабанных шаровых мельниц (рис. 5.6). С помощью измерительного инструмента были определены геометрические размеры футеровок для сравнительного анализа износа, полученного в ходе экспериментальных исследований и цифрового моделирования.



Рисунок 5.6 – Образцы изношенных футеровок барабанной шаровой мельницы

Было выявлено, что износу подвергаются все поверхности футеровок, однако, максимальному износу подвержены поверхности, контактирующие с мелющими телами по направлению вращения барабана барабанной шаровой мельницы (рис. 5.7).

Без износа масса футеровки барабанной шаровой мельницы составляет 44,7 гр., после 8 ч эксплуатации масса футеровки снижается до 30,4 гр., то есть на 31,2%. За время эксплуатации футеровки в течении 24 ч масса футеровки снижается до 27,4 гр., то есть на 9,87%. После 72 часов эксплуатации футеровки барабанной шаровой мельницы масса футеровки снижается до 24,5 гр., то есть на 10,58%. Снижение интенсивности износа объясняется тем, что при износе поперечного профиля футеровки снижается проскальзывание мелющих тел по футеровке.

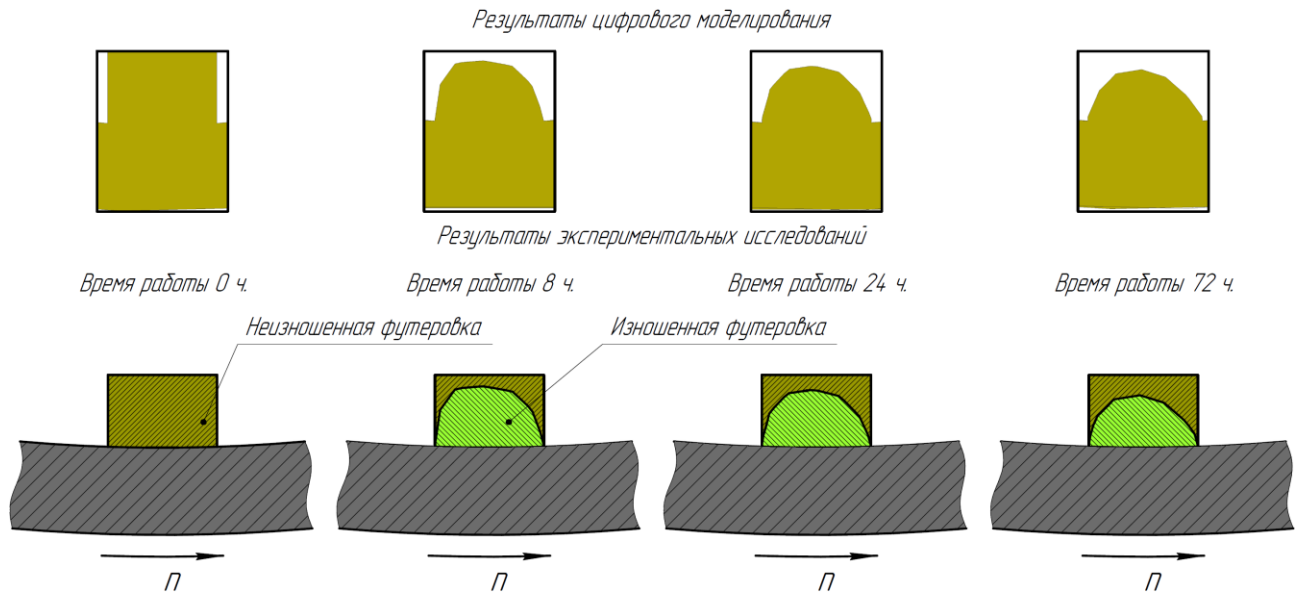


Рисунок 5.7 – Результаты анализа характера износа футеровки

В ходе анализ характера износа футеровки определено, что разница массы изношенной футеровки, полученной в ходе экспериментальных исследований и в ходе цифрового моделирования составляет менее 10%.

Кроме этого, на основе анализа износа футеровки лабораторной барабанной шаровой мельницы установлена целесообразность применения многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий.

5.3 Исследование влияния основных факторов на потребляемую мощность привода.

Анализ мощности, потребляемой приводом лабораторной барабанной шаровой мельницы был проведен на основании статистической обработки результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований. В настоящей работе получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$\begin{aligned}
 P = & 431,00 + 8,01x_1 + 39,92x_2 - 15,56x_3 - 7,35x_4 + 8,14x_1x_2 - \\
 & - 6,24x_1x_3 - 6,94x_1x_4 - 1,76x_2x_3 + 2,39x_2x_4 - 3,73x_3x_4 + \\
 & + 0,58x_1^2 + 0,56x_2^2 + 0,47x_3^2 - 1,56x_4^2.
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Анализ уравнения (5.1) позволяет установить, что наиболее значимое влияние на изменение потребляемой мощности привода лабораторной барабанной шаровой мельницы оказывают два фактора: частота вращения барабана и коэффициент загрузки. Положительное значение соответствующих

коэффициентов регрессии свидетельствует о прямой зависимости между ростом данных факторов и увеличением энергопотребления привода. Исключение составляют факторы высоты и количества выступов футеровки – их коэффициенты в уравнении имеют отрицательные значения, что указывает об обратной зависимости.

Для детального анализа и его интерпретации в графический вид необходимо преобразовать кодированную форму этого уравнения в натуральный вид.

$$x_k = \frac{x_n - x_{cp}}{\Delta}, \quad (5.2)$$

где x_k – обозначение фактора варьирования в кодированном виде;

x_n – обозначение фактора варьирования в натуральном виде;

x_{cp} – значение нулевого уровня варьирования фактора;

Δ – шаг варьирования фактора.

Использованием формулы 5.2, определяется значение каждого фактора варьирования в натуральном виде.

Для x_1 :

$$x_1 = \frac{n-46,51}{3}. \quad (5.3)$$

Для x_2 :

$$x_2 = \frac{\varphi-0,3}{0,05}. \quad (5.4)$$

Для x_3 :

$$x_3 = \frac{h-20}{5}. \quad (5.5)$$

Для x_4 :

$$x_4 = \frac{t-16}{4}. \quad (5.6)$$

Путем преобразования в натуральный вид получено уравнение:

$$\begin{aligned} P = & 194,77 - 1,97n - 1909,79\varphi + 20,59h + 28,34t + 54,27n\varphi - \\ & - 0,42nh - 0,58nt - 7,05\varphi h + 11,94\varphi t - 0,19ht + \\ & + 0,06n^2 + 223,20\varphi^2 + 0,02h^2 - 0,10t^2. \end{aligned} \quad (5.7)$$

На рисунке 5.8 видно, что зависимость $P=f(n, t)$ при неизменных значениях высоты выступов и коэффициента загрузки мельницы имеет нарастающий характер (рис. 5.8). Это объясняется тем, что увеличение частоты вращения

барабана мельницы приводит к увеличению потребляемой мощности привода. При этом, увеличение количества выступов футеровки приводит к увеличению потребляемой мощности привода. Это объясняется тем, что с увеличением количества выступов возрастает суммарная площадь контакта выступов с загрузкой, и повышается эффективность передачи крутящего момента от барабана к мелющим телам. Кроме этого, изменяется режим работы мелющей загрузки. Наибольшее значение потребляемой мощности привода $P=529,73$ Вт достигается при максимальном значении частоты вращения барабана мельницы $n=52,51$ об/мин и минимальном значении количества выступов футеровки $t=8$ ед.

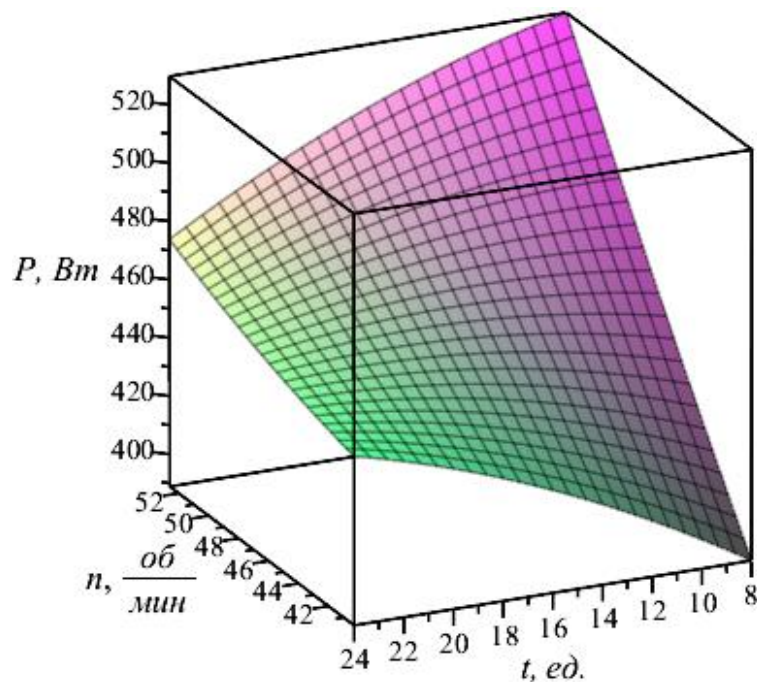


Рисунок 5.8 – График зависимости потребляемой мощности $P=f(n, t)$ при $h=10$ мм, $\varphi=0,30$

Анализируя график зависимости $P=f(n, \varphi)$ можно сказать, что он имеет монотонно возрастающий характер при неизменных значениях высоты выступов футеровки $h=10$ мм и количества выступов $t=12$ ед. (рис. 5.9). С увеличением частоты вращения барабана мельницы и коэффициента загрузки происходит рост потребляемой мощности привода ввиду квадратичного роста кинетической энергии и центробежных сил, перехода к более энергетически затратным режимам работы, увеличению трения, количеству столкновений и рассеивание энергии. Наибольшее значение потребляемой мощности привода мельницы $P=637,81$ Вт достигается при частоте вращения барабана мельницы $n=52,511$ об/мин и

коэффициенте загрузки $\varphi=0,40$. Наименьшее значение потребляемой мощности привода мельницы $P=361,83$ Вт достигается при частоте вращения барабана мельницы $n=40,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$.

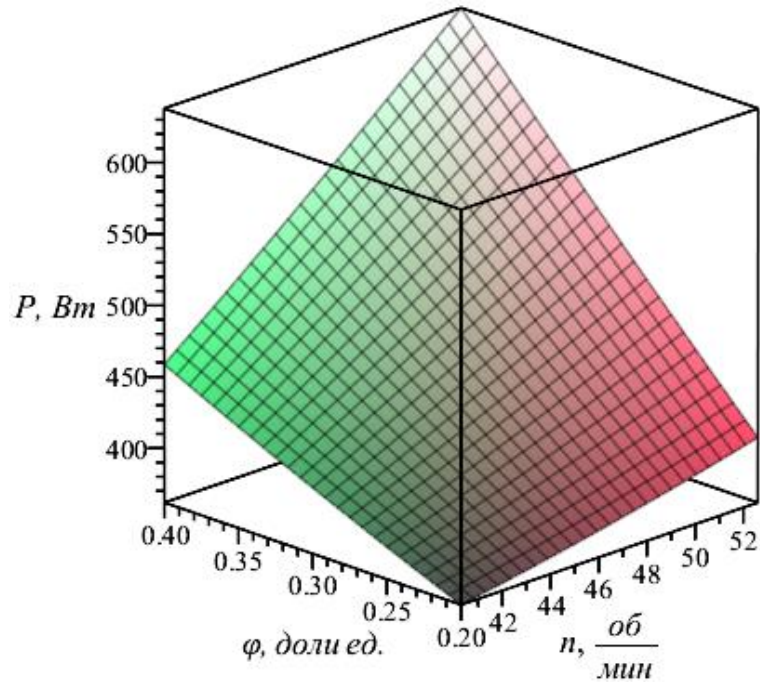


Рисунок 5.9 – График зависимости потребляемой мощности $P=f(n, \varphi)$ при $h=10$ мм, $t=12$ ед.

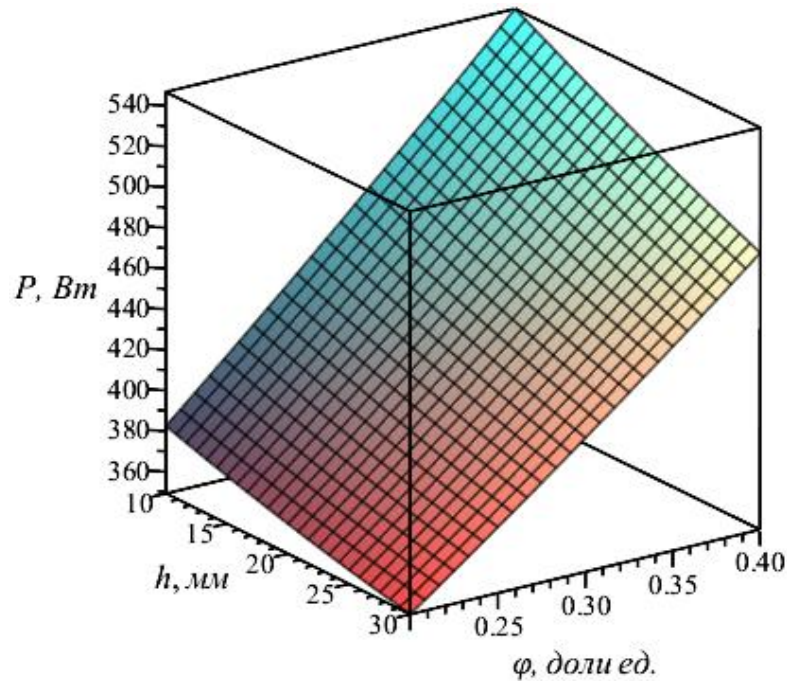


Рисунок 5.10 – График зависимости потребляемой мощности $P=f(\varphi, h)$ при $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед.

Таким образом, можно сделать вывод, что при минимальном коэффициенте загрузки лабораторная барабанная шаровая мельница работает неэффективно.

Из графика, представленного на рисунке 5.10 зависимость потребляемой мощности привода от высоты выступов футеровки и коэффициента загрузки, носит обратно пропорциональный характер. Потребляемая мощность достигает максимального значения $P=546,70$ Вт при коэффициенте загрузки $\varphi=0,4$, высоте выступов $h=10$ мм. Увеличение потребляемой мощности привода при меньших значениях высоты выступов футеровки объясняется тем, что при минимальном значении высоты выступа обеспечивается подъем мелющей загрузки на большую высоту.

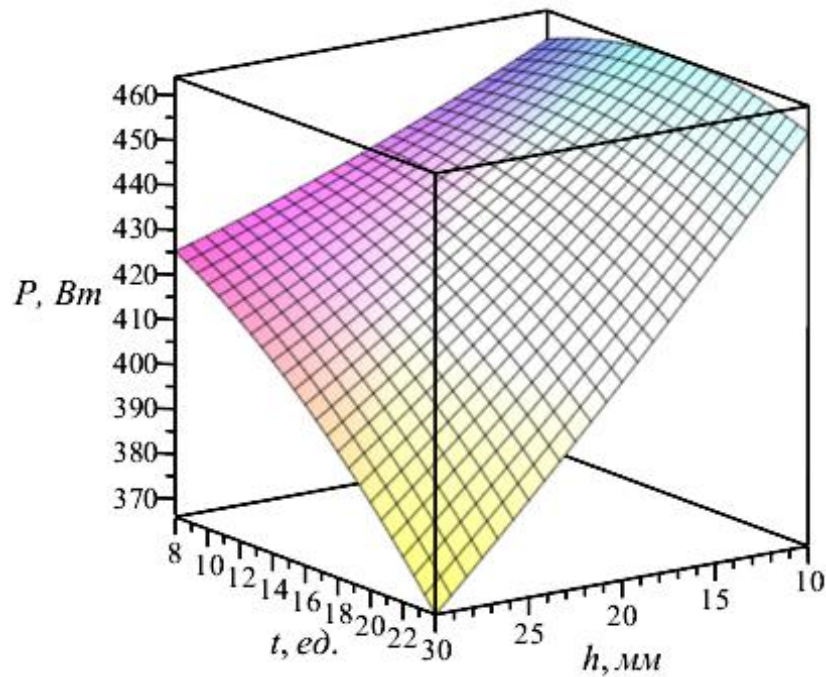


Рисунок 5.11 – График зависимости потребляемой мощности $P=f(h, t)$ при $n=46,51$ об/мин, $\varphi=0,30$

Из графика, представленного на рисунке 5.11 видно, что зависимость $P=f(h, t)$ носит нарастающий характер. Наибольшего значения потребляемая мощность привода $P=464,01$ Вт достигает при высоте выступов $h=10$ мм и количестве выступов $t=16$ ед. Наименьшего значения потребляемая мощность привода $P=464,01$ Вт достигает при высоте выступов $h=30$ мм и количестве выступов $t=24$ ед. Данный эффект связан с уменьшением расстояния между соседними выступами футеровки, ввиду чего меньшее количество мелющих тел вовлекается в водопадный режим, а также мелющие тела меньшего диаметра не успевают сойти с выступа футеровки.

5.4 Исследование влияния основных факторов на остаток на сите №008.

Основываясь на статистической обработке результатов экспериментальных исследований, получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$\begin{aligned} \sum R_{008} = & 9,59 + 0,37x_1 + 0,22x_2 + 0,08x_3 + 0,14x_4 - 0,28x_1x_2 - \\ & - 0,04x_1x_3 - 0,27x_1x_4 - 0,23x_2x_3 - 0,23x_2x_4 - 0,22x_3x_4 + \\ & + 0,75x_1^2 + 1,13x_2^2 + 1,17x_3^2 - 0,68x_4^2. \end{aligned} \quad (5.8)$$

На основании анализа уравнения регрессии (5.6) установлено, что на остаток на сите №008, а, следовательно, и на тонкость помола готового продукта, наибольшее влияние оказывают частота вращения барабана мельницы, коэффициент загрузки. Коэффициент при факторе количества выступов имеет положительный знак, что говорит об увеличении остатка на сите №008, следовательно, тонкость помола готового продукта уменьшается, то есть помол «загрубляется».

Выполнено преобразование уравнения в натуральный вид:

$$\begin{aligned} \sum R_{008} = & 173,98 - 6,70n - 151,20\varphi - 1,39h + 3,00t - 1,87n\varphi - \\ & - 0,003nh - 0,02nt - 0,52\varphi h - 1,15\varphi t - 0,01ht + \\ & + 0,08n^2 + 451,60\varphi^2 + + 0,05h^2 - 0,04t^2. \end{aligned} \quad (5.9)$$

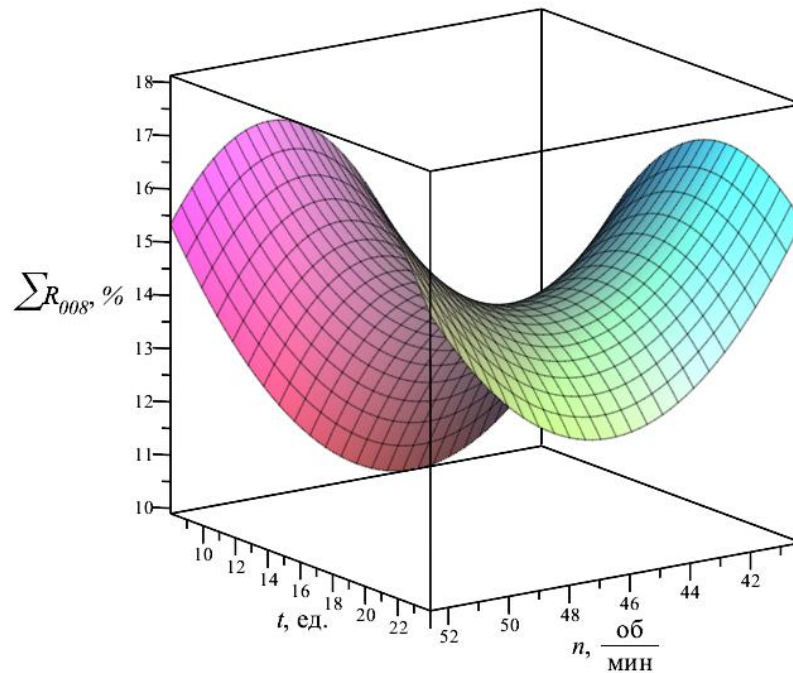


Рисунок 5.12 – График зависимости остатка на сите $\sum R_{008}=f(n, t)$ при $h=10$ мм, $\varphi=0,30$

Из графика на рисунке 5.12 следует что зависимость $\sum R_{008}=f(n, t)$ при $h=10$ мм, $\varphi=0,30$ имеет экстремальный характер. При изменении частоты вращения

барабана мельницы от 40,51 об/мин до 47,0 об/мин происходит уменьшение остатка на сите №008, то есть тонкость помола готового продукта увеличивается, а при дальнейшем увеличении частоты вращения с 47 об/мин до 52,51 об/мин остаток на сите №008 увеличивается. Такой характер зависимости объясняется тем, что при небольших частотах вращения количество соударений между мелющими телами и частицами материала увеличивается и в водопадный режим работы мелющей загрузки вовлекается большее количество мелющих тел большего диаметра. С увеличением частоты вращения количество соударений уменьшается ввиду того, что меньшее количество мелющих тел большего диаметра вовлекается в водопадный режим работы.

Из графика (рис. 5.12) видно, что максимальное значение остатка на сите №008 $\sum R_{008}=18,13\%$ достигается при $n=52,51$ об/мин и $t=16$ ед. При этом, минимальное значение остатка на сите №008 $\sum R_{008}=9,89\%$ достигается при $n=52,51$ об/мин и $t=8$ ед.

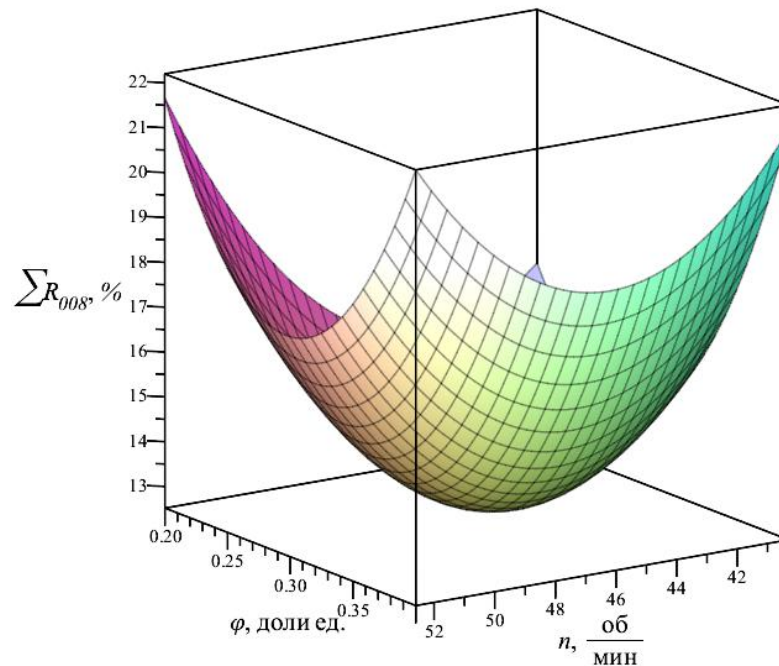


Рисунок 5.13 – График зависимости остатка на сите $\sum R_{008}=f(n, \varphi)$ при $h=10$ мм, $t=12$ ед.

На рисунке 5.13 представлен график зависимости остатка на сите $\sum R_{008}=f(n, \varphi)$ при $h=10$ мм, $t=12$. При этом следует отметить, что минимальное значение остатка на сите $\sum R_{008}=12,51\%$ достигается при $n=44,87$ об/мин и $\varphi=0,28$. Это объясняется тем, что при данных параметрах мелющие тела оказывают

максимальное ударное воздействие на частицы измельчаемого материала, ввиду чего за одно и тоже время достигается большее количество готового продукта.

Из графика на рисунке 5.14 следует, что изменение высоты выступов также оказывает влияние на зависимость $\sum R_{008}=f(h, \varphi)$. Так с увеличением высоты выступов до $h=20$ мм значение остатка на сите $\sum R_{008}$ уменьшается до 8,7%. Такой эффект объясняется увеличением количества соударений мелющих тел с частицами материала, ввиду чего большая энергия, потребляемая мельницей, расходуется на процесс измельчения.

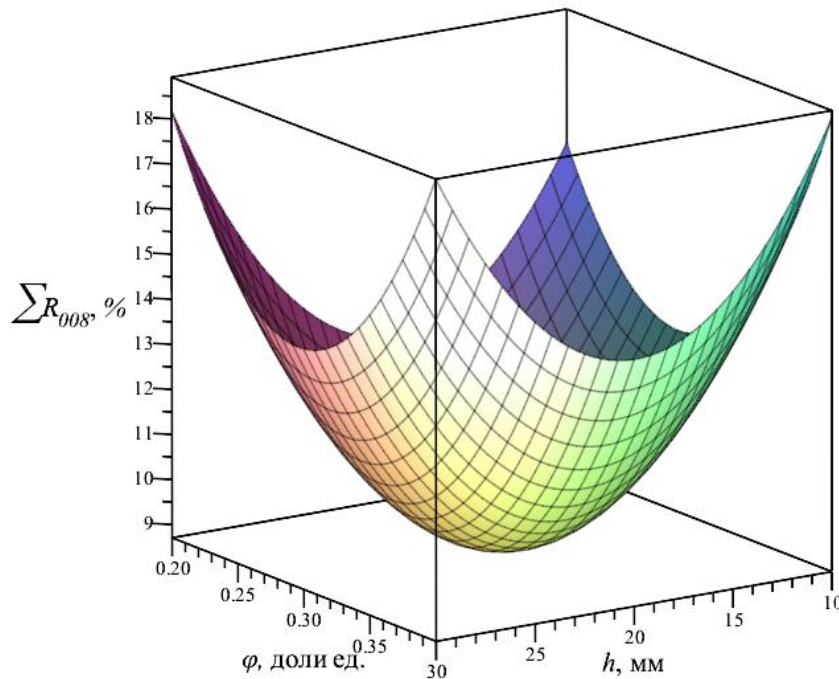


Рисунок 5.14 – График зависимости остатка на сите $\sum R_{008}=f(h, \varphi)$
при $t=12$ ед., $n=46,51$ об/мин

Анализируя график на рисунке 5.15 видно, что при частоте вращения $n=46,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,30$, с увеличением количества выступов с 8 ед. до 15 ед. остаток на сите $\sum R_{008}$ возрастает. Затем с увеличением количества выступов до 24 ед. остаток на сите $\sum R_{008}$ снижается. С увеличением высоты выступов с 10 мм до 18,9 мм при количестве выступов $t=8$ ед. остаток на сите снижается и достигает минимального значения $\sum R_{008}=6,52\%$. Максимальное значение остатка на сите $\sum R_{008}=14,46\%$ достигается при высоте выступов $h=30$ мм и количестве выступов $t=15$ ед. Такая зависимость объясняется тем, что при увеличении количества выступов футеровки до больших значений приводит к

снижению эффективности процесса измельчения, ввиду перехода мелющей загрузки в каскадный режим работы, из-за чего ударное воздействие мелющих тел на частицы материала снижается. При этом, возникает сегрегация мелющих тел в поперечном сечении барабана мельницы.

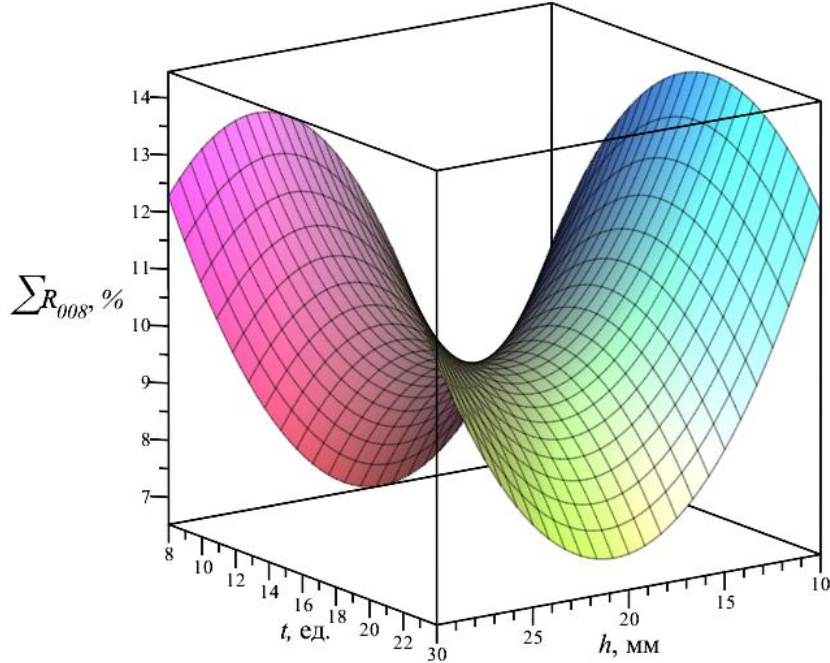


Рисунок 5.15 – График зависимости остатка на сите $\sum R_{008}=f(h, t)$ при $n=46,51$ об/мин, $\varphi=0,30$

5.5 Исследование влияния основных факторов на удельный расход энергии на измельчение.

Основываясь на статистической обработке результатов экспериментальных исследований, получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$q = 33,46 + 0,74x_1 - 2,78x_2 - 1,25x_3 - 0,57x_4 + 0,40x_1x_2 - 0,61x_1x_3 - 0,65x_1x_4 + 0,13x_2x_3 + 0,22x_2x_4 - 0,46x_3x_4 + 0,19x_1^2 + 1,40x_2^2 + 0,34x_3^2 - 0,01x_4^2. \quad (5.10)$$

Анализ данного выражения (5.9) показывает, что наибольшее влияние на удельный расход энергии оказывают частота вращения барабана мельницы и коэффициент загрузки.

Выполнен перевод уравнения в натуральный вид:

$$q = 106,36 - 0,79n - 544,27\varphi + 1,32h + 2,53t + 2,67n\varphi - 0,04nh - 0,05nt - 0,51\varphi h + 1,11\varphi t - 0,02ht + 0,02n^2 + 561,20\varphi^2 + 0,01h^2 - 0,001t^2. \quad (5.11)$$

Из графика на рисунке 5.16 видно, что удельный расход энергии увеличивается с увеличением частоты вращения барабана мельницы с 40,51 об/мин до 52,51 об/мин. При этом, увеличение количества выступов футеровки приводит к обратному эффекту, и удельный расход энергии снижается при увеличении количества выступов с 8 ед. до 24 ед. при постоянной частоте вращения барабана мельницы. Это объясняется тем, что происходит рост потерь на трение и проскальзывание мелющих тел.

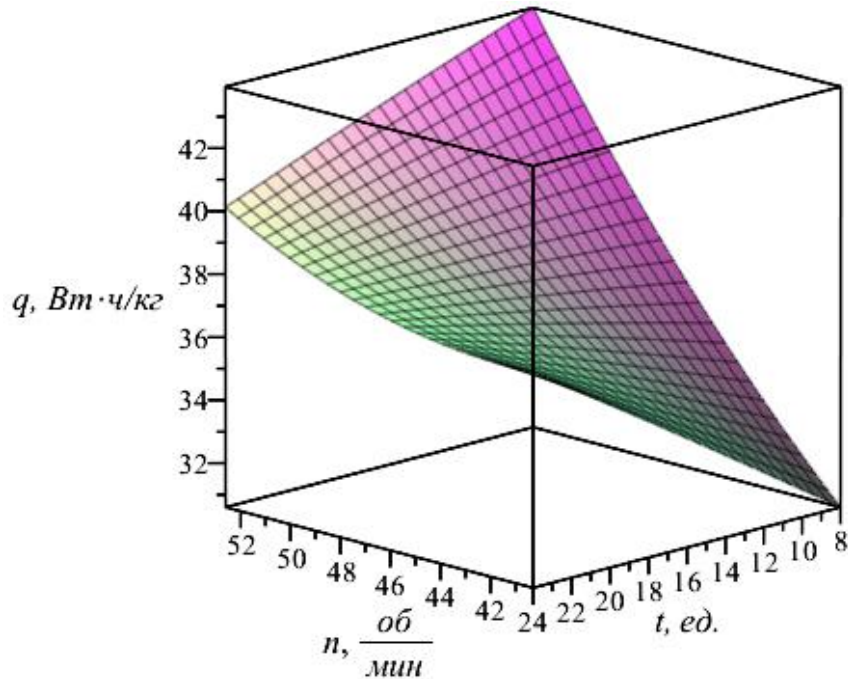


Рисунок 5.16 – График зависимости удельного расхода энергии $q=f(n, t)$ при $h=10$ мм, $\varphi=0,3$

График зависимости (рис. 5.17) $q=f(n, \varphi)$ при $h=10$ мм, $t=12$ ед. показывает, что увеличение частоты вращения барабана мельницы и уменьшение коэффициента загрузки приводит к возрастанию удельного расхода энергии. Это объясняется тем, что при увеличении частоты вращения и уменьшении коэффициента загрузки увеличивается кинетическая энергия шаров, но при этом снижается их эффективное взаимодействие с материалом из-за недостатка загрузки, увеличивается доля энергии, расходуемой на бесполезные процессы (трение, вибрация), нарушается рациональный режим движения мелющих тел, что еще больше снижает эффективность измельчения. Максимальное значение $q=53,53$ Вт·ч/кг достигается при частоте вращения $n=52,51$ об/мин и коэффициенте

загрузки $\varphi=0,20$. Минимальное значение $q=29,37$ Вт·ч/кг достигается при частоте вращения $n=40,51$ об/мин и коэффициенте загрузки $\varphi=0,40$.

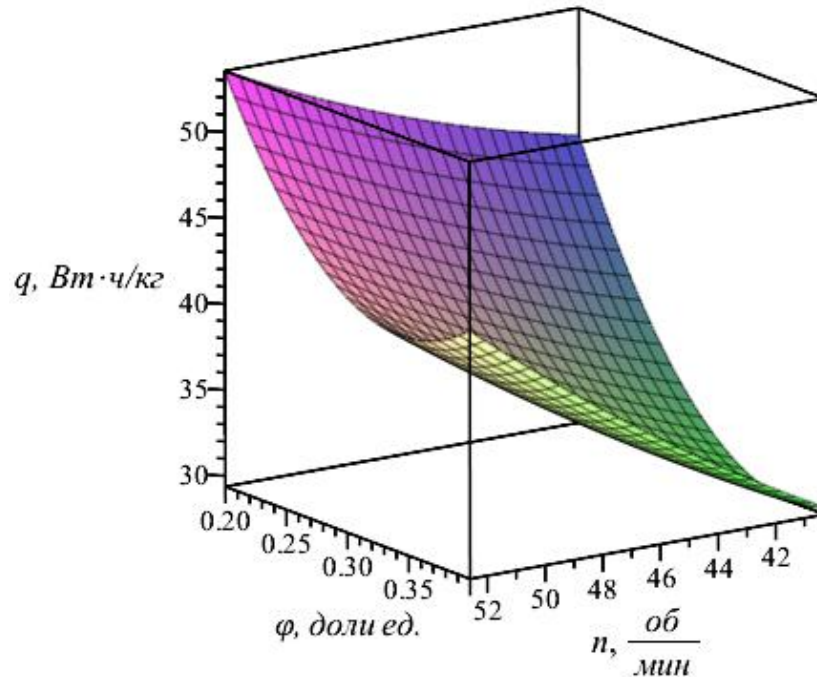


Рисунок 5.17 – График зависимости удельного расхода энергии $q=f(n, \varphi)$ при $h=10$ мм, $t=12$ ед.

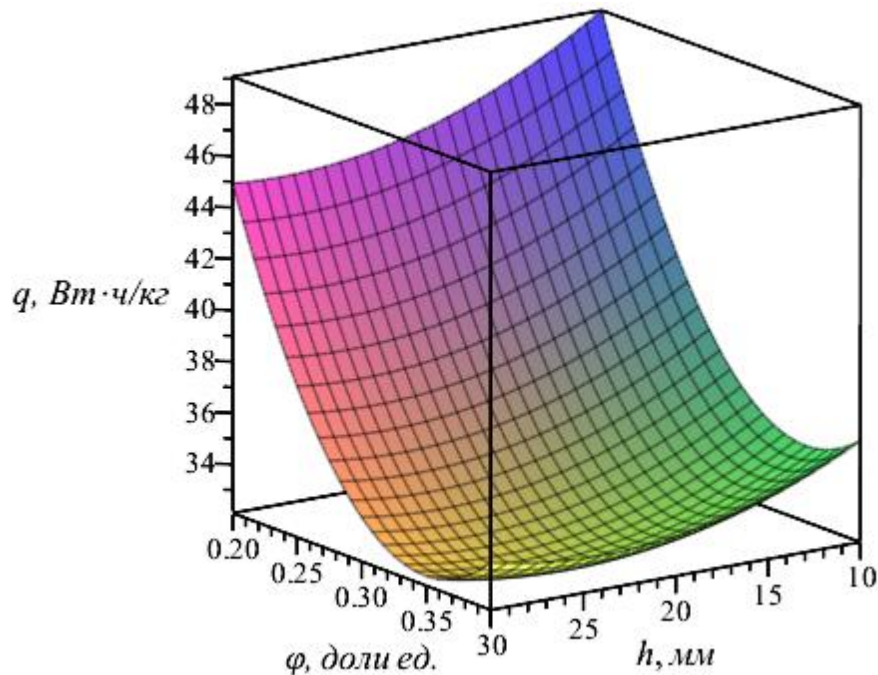


Рисунок 5.18 – График зависимости удельного расхода энергии $q=f(h, \varphi)$ при $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед.

Из графика зависимости $q=f(h, \varphi)$ при $n=46,51$ об/мин, $t=12$ ед., представленного на рисунке 5.18 видно, что максимального значения удельный расход энергии $q=49,08$ Вт·ч/кг достигают при $h=10$ мм и коэффициенте загрузки $\varphi=0,20$. С увеличением количества загрузки до $\varphi=0,40$ удельный расход энергии

снижается до 36,45 Вт·ч/кг. Это объясняется тем, что при увеличении коэффициента загрузки силы трения между футеровкой и шарами возрастают, и энергия вращения барабана эффективнее передается шаровой загрузке, увеличивается количество рабочих контактов между мелющими телами и футеровкой, и снижается процент малоподвижного ядра. Минимального значения удельный расход энергии $q=49,08$ Вт·ч/кг достигает при $h=25$ мм и коэффициенте загрузки $\varphi=0,35$.

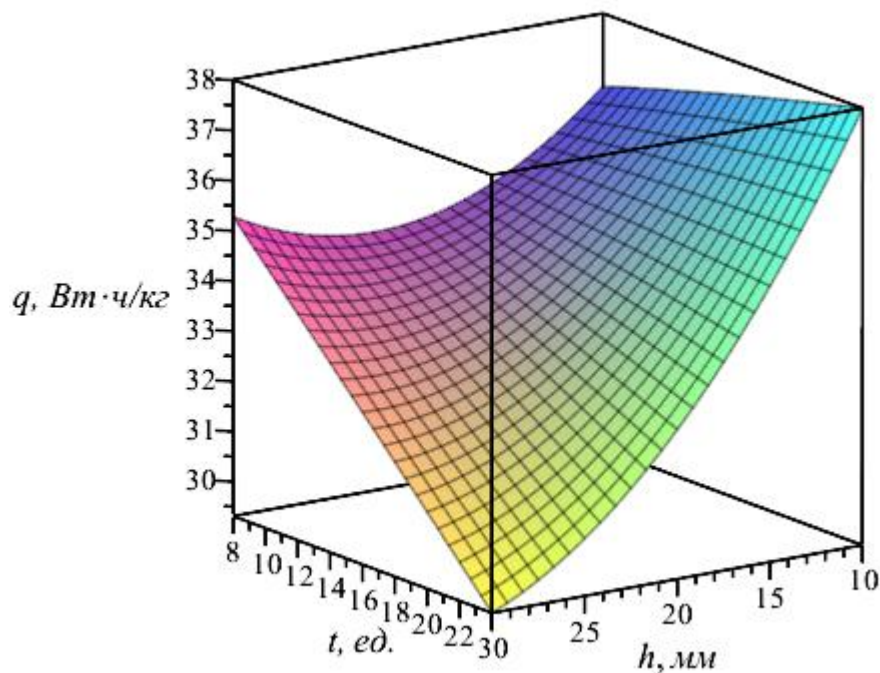


Рисунок 5.19 – График зависимости удельного расхода энергии $q=f(h, t)$ при $n=46,51$ об/мин, $\varphi=0,30$

Из графика зависимости удельного расхода энергии $q=f(h, t)$, представленного на рисунке 5.19, видно, что с увеличением количества выступов t и высоты выступов h футеровки удельный расход энергии на измельчение снижается. Максимального значения удельный расход энергии $q=38$ Вт·ч/кг достигает при высоте выступов $h=10$ мм и количестве выступов $t=24$ ед.

5.6 Определение рациональных режимов работы лабораторной барабанной шаровой мельницы.

В ходе анализа результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, были получены уравнения регрессии, позволяющие определить рациональные режима работы лабораторной барабанной шаровой мельницы,

обеспечивающие эффективное измельчение материала. Начальными данными для определения рациональных режимов работы лабораторной барабанной шаровой мельницы являются уравнения регрессии функций отклика $P=f(n, \varphi, h, t)$, $\sum R_{008}=f(n, \varphi, h, t)$, $q=f(n, \varphi, h, t)$, зависящие от четырех переменных.

Изучение полученных зависимостей функций отклика от варьируемых факторов экспериментальных исследований должно производиться в их совокупности, поскольку лишь комплексное взаимодействие указанных факторов позволяет сформировать целостное представление об эффективности процесса измельчения. Для определения рациональных режимов работы лабораторной барабанной шаровой мельницы и условий реализации самого процесса измельчения выполняется совместный анализ трех функций отклика по каждому из варьируемых факторов:

$$P, \sum R_{008}, q = f(n), \quad (5.12)$$

$$P, \sum R_{008}, q = f(\varphi), \quad (5.13)$$

$$P, \sum R_{008}, q = f(h), \quad (5.14)$$

$$P, \sum R_{008}, q = f(t). \quad (5.15)$$

Критерием определения рациональных режимов работы лабораторной барабанной шаровой мельницы и параметров процесса измельчения является минимизация значений функций отклика:

$$P \rightarrow \min, \quad (5.16)$$

$$\sum R_{008} \rightarrow \min, \quad (5.17)$$

$$q \rightarrow \min. \quad (5.18)$$

На рисунках 5.20-5.23 приведены графические зависимости функций отклика от варьируемых факторов экспериментальных исследований, а именно: частоты вращения барабана мельницы, коэффициента загрузки, высоты и количества выступов футеровки.

Анализ графика, представленного на рисунке 5.20 и отражающего зависимости функций отклика $P, \sum R_{008}, q=f(n)$, показывает, что при увеличении частоты вращения n в интервале 40,5-44,45 об/мин величина остатка на сите $\sum R_{008}$ снижается от 7,53% до 6,00%, что свидетельствует о повышении качественных характеристик продукта так как тонкость помола готового продукта растет. Вместе

с тем в указанном диапазоне частот вращения наблюдается рост как потребляемой приводом мощности, так и удельного расхода энергии. При дальнейшем увеличении частоты вращения барабана мельницы до 46,5 об/мин остаток на сите $\sum R_{008}$ незначительно увеличивается до 6,42%. При последующем увеличении частоты вращения барабана мельницы происходит рост потребляемой мощности привода и удельного расхода энергии, который является неоправданным, ввиду увеличения остатка на сите, а, следовательно, ухудшения качественного показателя. Таким образом, рациональным диапазоном частоты вращения лабораторной барабанной шаровой мельницы с позиций обеспечения качества помола является интервал 43,5-46,5 об/мин.

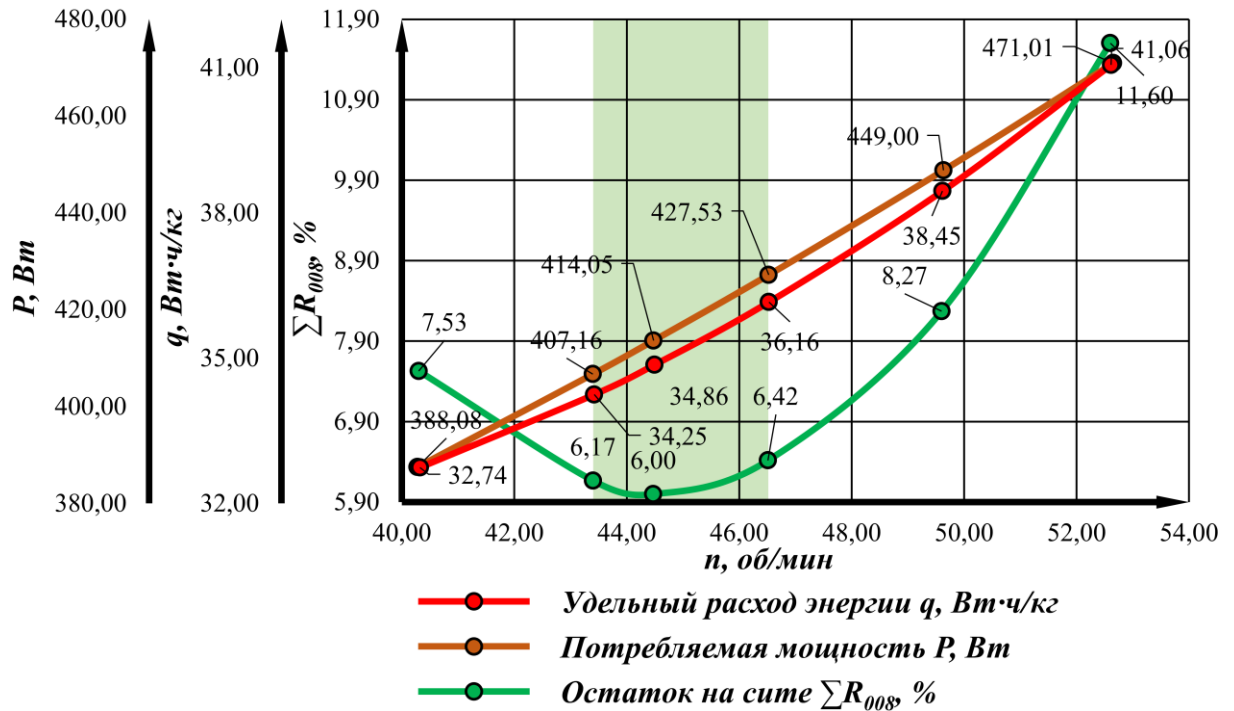


Рисунок 5.20 – График зависимости P , $\sum R_{008}$, $q=f(n)$

Анализ графических зависимостей функций отклика P , $\sum R_{008}$, $q=f(\varphi)$ (рис. 5.21) позволяет заключить, что рациональный диапазон коэффициента загрузки лабораторной барабанной шаровой мельницы при измельчении материала составляет 0,28-0,33. В указанном интервале обеспечивается остаток на сите $\sum R_{008}$ меньше 15% при умеренных значениях удельного расхода энергии. Дальнейшее повышение φ выше 0,33 является нецелесообразным, поскольку сопровождается ростом остатка на сите №008, то есть снижением тонкости помола готового продукта.

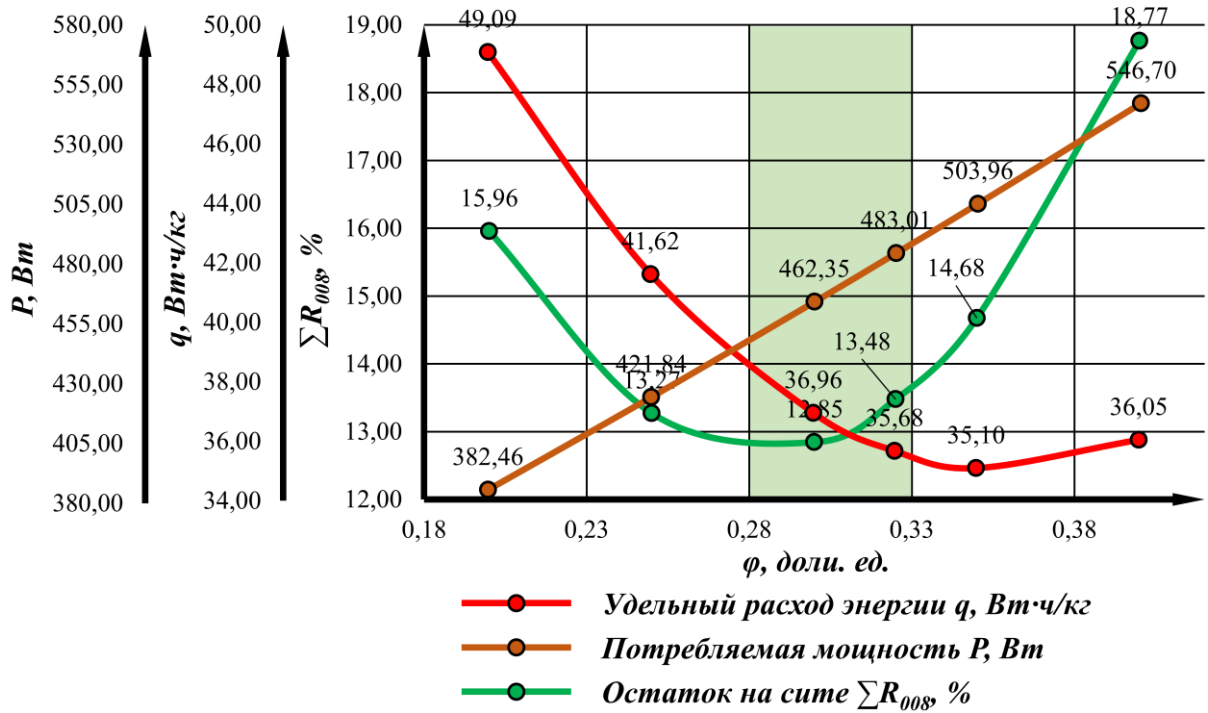


Рисунок 5.21 – График зависимости $P, \Sigma R_{008}, q=f(\phi)$

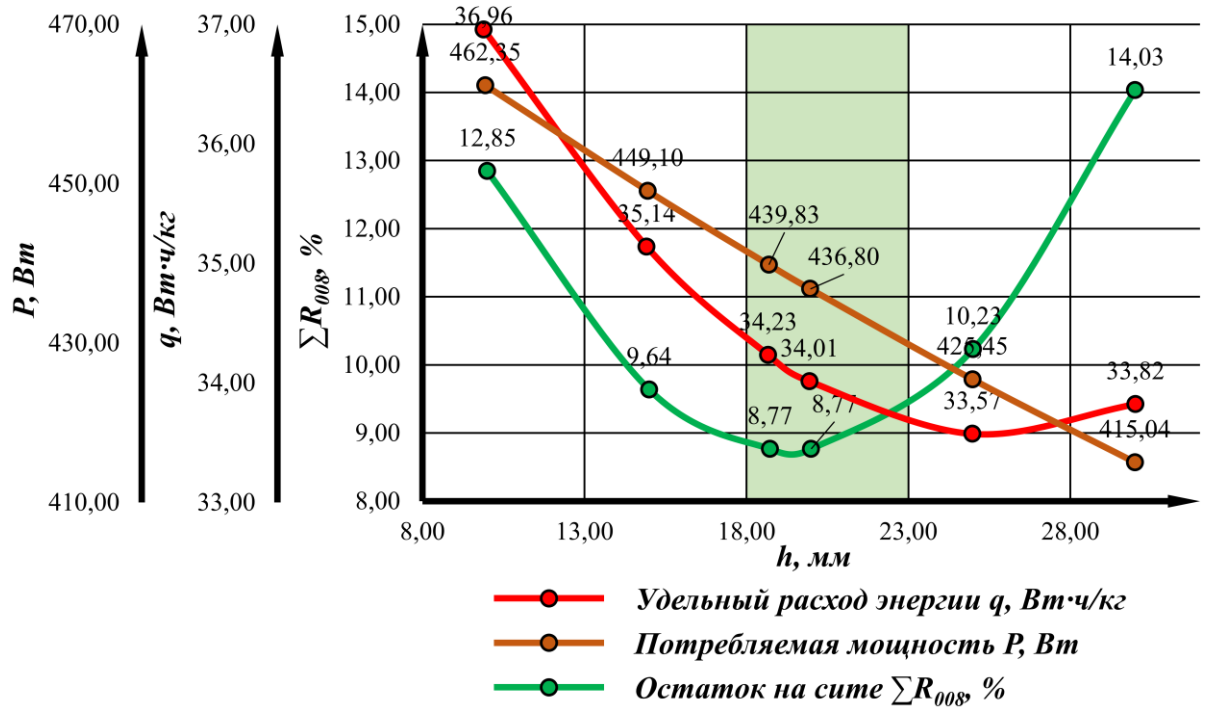


Рисунок 5.22 – График зависимости $P, \Sigma R_{008}, q=f(h)$

На графике, представленного на рисунке 5.22, изображена зависимость функций отклика $P, \Sigma R_{008}, q=f(h)$. Определено, что с увеличением высоты выступов остаток на сите ΣR_{008} снижается с параллельным снижением значений потребляемой мощности и удельного расхода энергии. В пределах высоты выступов 18-23 мм достигаются значения остатка на сите ΣR_{008} в диапазоне 8,90-9,51%. При последующем увеличении высоты выступов до 24 ед. остаток на сите

увеличивается и достигает максимального значения $\sum R_{008}=14,03\%$, то есть тонкость помола готового продукта уменьшается, помол «загрубляется», что не является целесообразным.

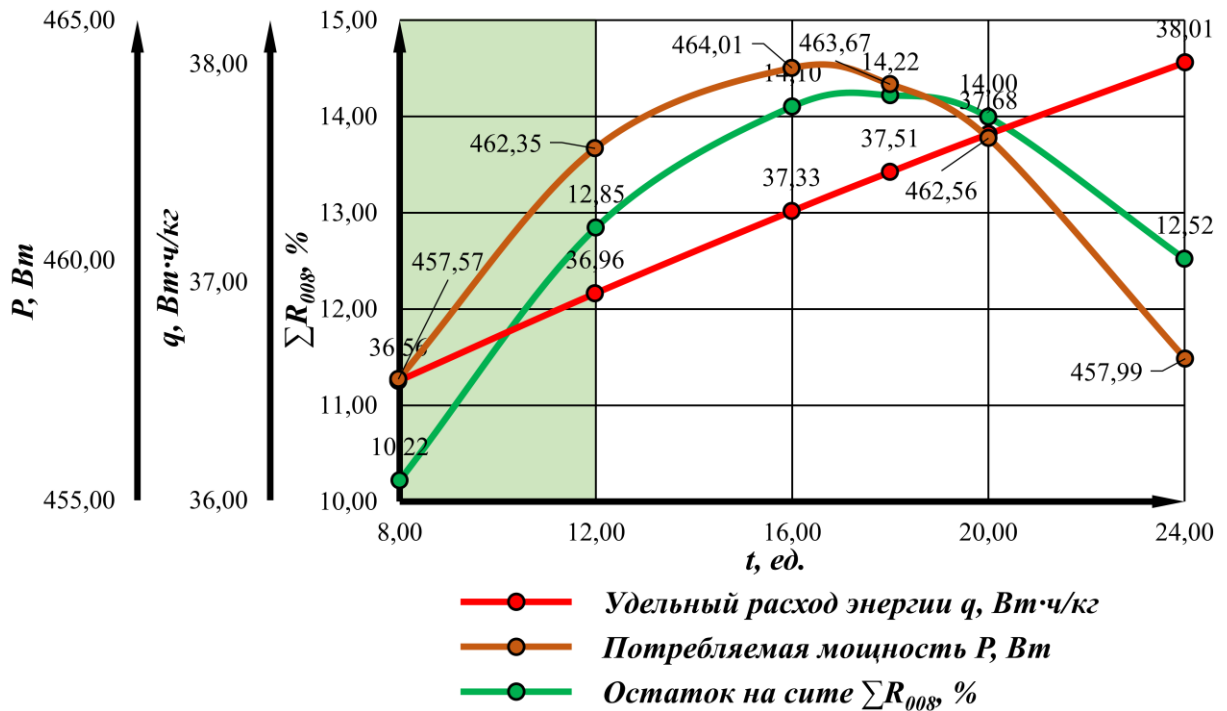


Рисунок 5.23 – График зависимости $P, \sum R_{008}, q=f(t)$

Из графика, представленного на рисунке 5.23, зависимости функций отклика $P, \sum R_{008}, q=f(t)$ видно, что при увеличении количества выступов футеровки все основные показатели увеличиваются до точки максимума, после чего снижаются. В данном случае, рациональный режим работы лабораторной барабанной шаровой мельницы достигается при количестве выступов 8-12 ед., при котором остаток на сите достигает максимального значения $\sum R_{008}=12,85\%$ а удельный расход энергии увеличивается не значительно.

5.7 Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Для оценки адекватности разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования сопоставление значений потребляемой мощности привода, полученных теоретическим и экспериментальным путем.

Теоретические исследования позволили определить расчетные значения мощности для диапазона частот вращения $n=40,51-52,51$ об/мин. Как показано на рисунке 5.24, расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями не превышает 7%. На основании этого разработанный метод может быть признан обладающим высокой степенью адекватности, что подтверждает целесообразность его использования в условиях реального производства.

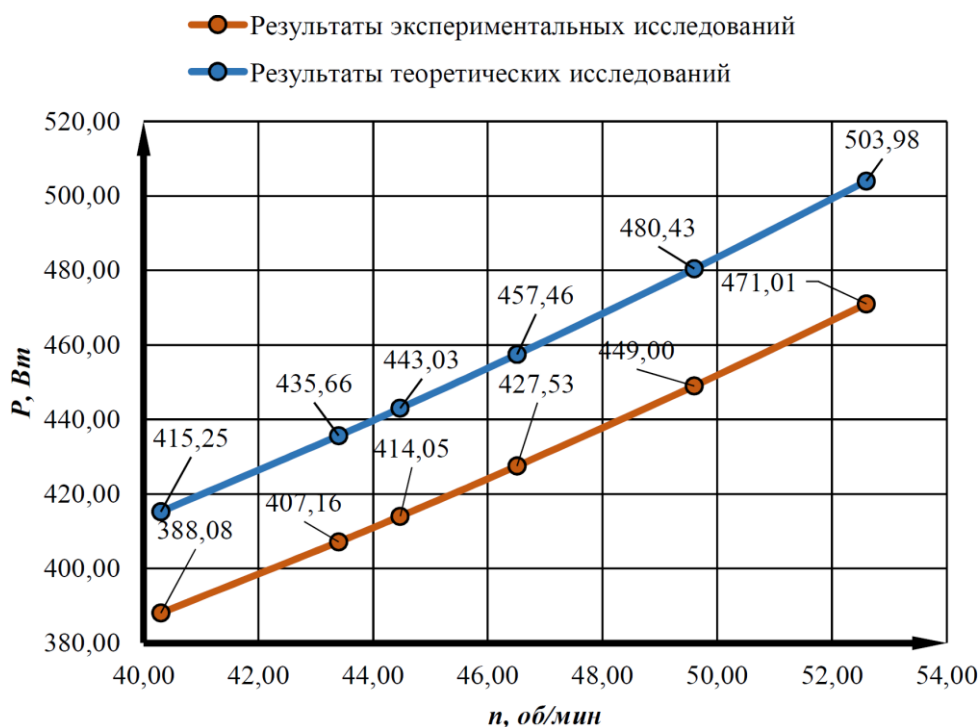


Рисунок 5.24 – Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований по потребляемой мощности

5.8 Выводы.

1. Проведен сравнительный анализ траекторий движения мелющих тел, полученных в ходе цифрового моделирования и экспериментальных исследований.
2. В ходе реализации экспериментальных исследований на основе центрального композиционного ротатбельного плана (ЦКРП-2⁴) полного факторного эксперимента в качестве функций отклика были выбраны: потребляемая мощность привода P , остаток на сите $\sum R_{008}$, удельный расход энергии q ; варьируемые факторы: x_1 – частота вращения барабана мельницы, об/мин; x_2 – коэффициент загрузки, доли ед.; x_3 – высота выступов футеровки, мм; x_4 – количество выступов футеровки, ед. Уровни исследуемых факторов учитывают

все возможные режимы работы мельницы и процесса измельчения в рамках установленных программой параметров.

3. На основе статистической обработки результатов экспериментальных исследований получены уравнения регрессии в кодированном $P, \sum R_{008}, q=f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, и натуральном виде $P, \sum R_{008}, q=f(n, \varphi, h, t)$. Наибольшее влияние на величину потребляемой мощности P и остаток на сите $\sum R_{008}$ оказывают факторы x_2 и x_1 – величина коэффициента загрузки и частота вращения барабана мельницы – это очевидно, что подтверждает адекватность полученных уравнений регрессии.

4. Определены рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы, при которых потребляемая мощность привода находится в пределах $P=410-460$ Вт, тонкость помола готового продукта находится в пределах $\sum R_{008}=6,00-13,62\%$, удельный расход энергии находится в пределах $q=34-39$ Вт·ч/кг, которые обеспечиваются в диапазоне варьируемых факторов: $n=43,5-46,5$ об/мин, $\varphi=0,28-0,33$ доли ед., $h=18-23$ мм, $t=8-12$ ед.

5. Разработан метод оценки адекватности результатов цифрового моделирования и экспериментальных исследований, который может применяться в проектных и конструкторских бюро при разработке новых видов футеровок с целью сокращения количества натуральных испытаний.

6 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

6.1 Апробация результатов работы на АО «Спасскцемент».

Целью внедрения методов цифрового моделирования футеровки трубной шаровой мельницы является разработка технического решения новой футеровки и моделирование процесса измельчения. Применение предложенного решения основано на использовании систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа.

В рамках внедрения (Приложение 3) метода цифрового моделирования футеровки и исследования режимов работы мелющей загрузки на предприятии АО «Спасскцемент» выполнено обследование конструкции помольного агрегата с трубной шаровой мельницей $\text{Ø}4 \times 13,5$ м (рис. 6.1, 6.2). Обследование конструкции выполнялось с применением наземного лазерного сканера *Leica RTC360*, позволяющего выполнять трехмерное сканирование строительных конструкций, технологического оборудования и местности с целью сбора данных.

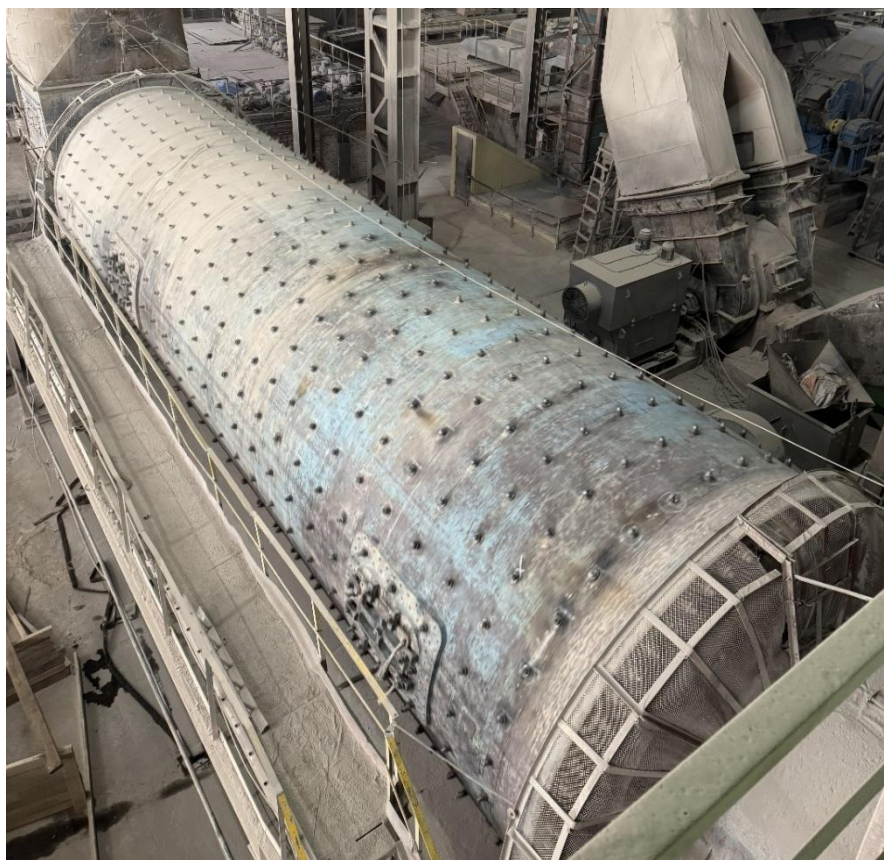


Рисунок 6.1 – Помольный агрегат с трубной шаровой мельницей $\text{Ø}4 \times 13,5$ м



Рисунок 6.2 – Помольный агрегат с трубной шаровой мельницей $\text{Ø}4 \times 13,5$ м

В ходе обследования конструкции помольного агрегата с трубной шаровой мельницей $\text{Ø}4 \times 13,5$ м выполнено 3D-сканирование сырьевого отделения и проведена обработка его результатов, в ходе которой было получено облако точек (рис. 6.3).

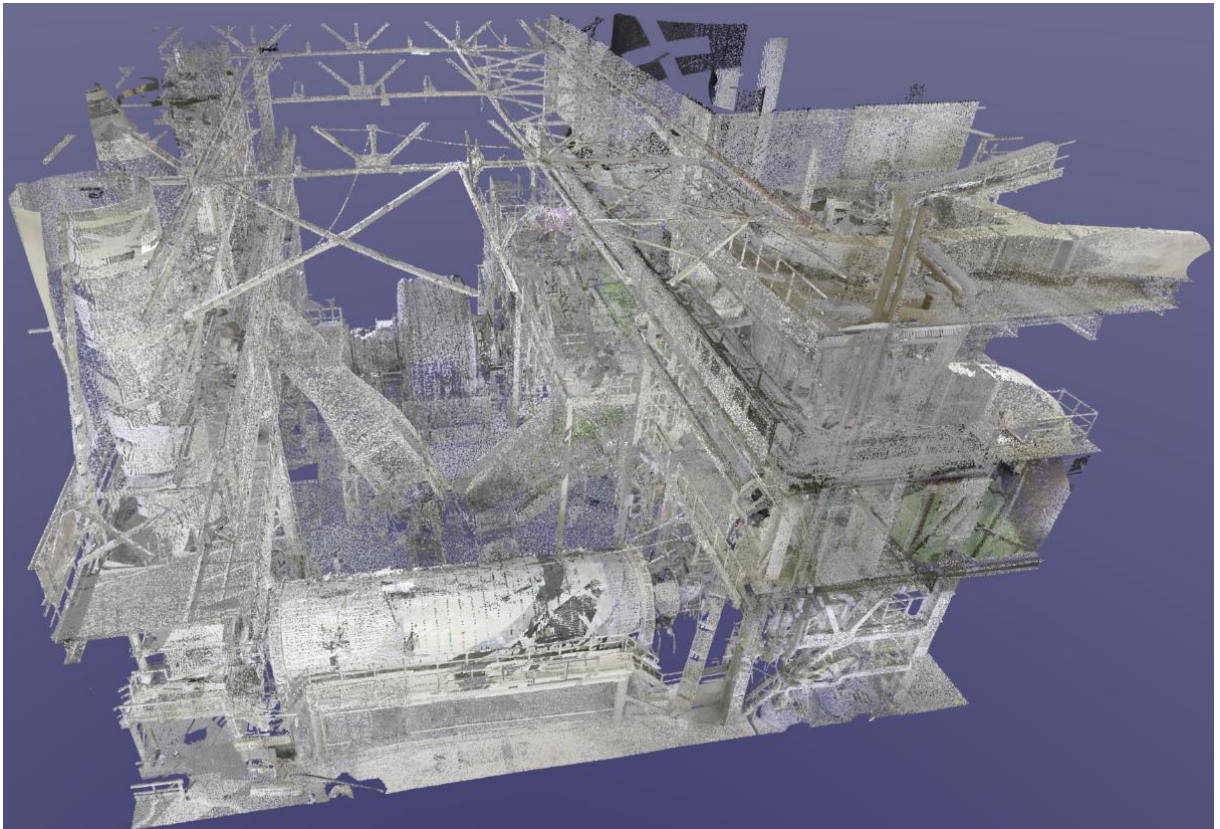


Рисунок 6.3 – Облако точек сырьевого отделения

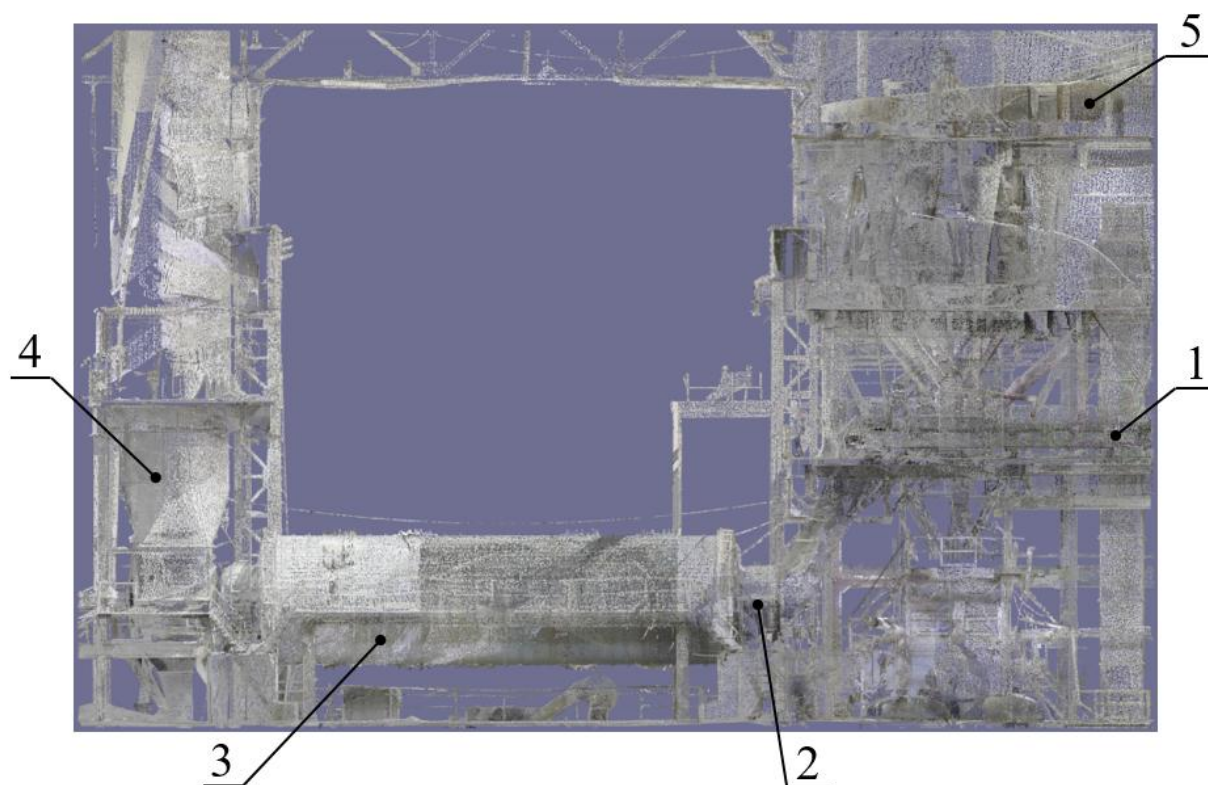


Рисунок 6.4 – Облако точек помольного агрегата
с трубной шаровой мельницей $\text{Ø}4 \times 13,5$ м:

1 – ленточный питатель; 2 – загрузочная часть; 3 – трубная шаровая мельница;
4 – патрубок; 5 – динамический сепаратор

Помольный агрегат с трубной шаровой мельницей $\text{Ø}4 \times 13,5$ м работает в замкнутом цикле. Материал по ленточному питателю 1 поступает в загрузочную часть 2 трубной шаровой мельницы 3. После измельчения в трубной шаровой мельнице материал потоком аспирационного воздуха по патрубку 4 направляется в динамический сепаратор 5 для классификации по крупности. В сепараторе готовый продукт измельчения уходит, а крупный материал возвращается обратно в мельницу на домол.

Затем на основании облака точек трубной шаровой мельницы (рис. 6.5) были определены основные геометрические размеры загрузочной и разгрузочной частей, корпуса, цапфовых подшипников и привода.

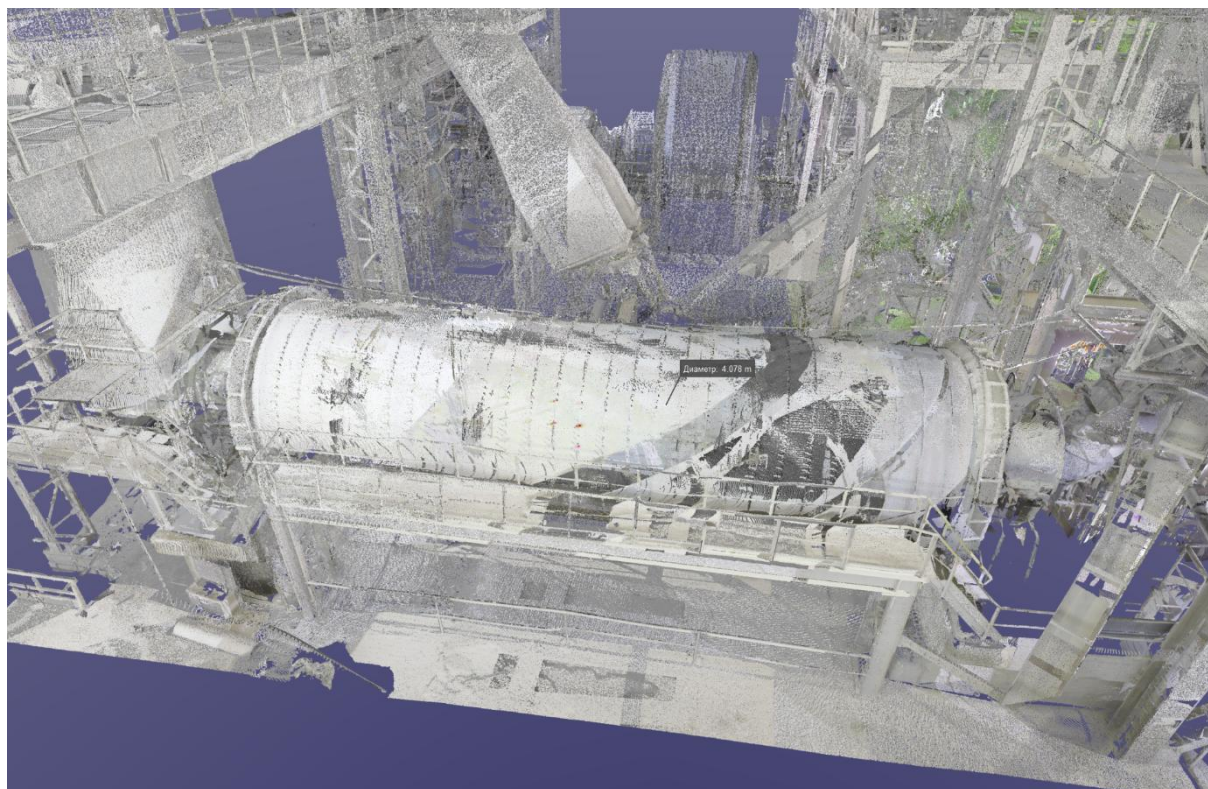


Рисунок 6.5 – Определение геометрических размеров основных сборочных единиц
трубной шаровой мельницы $\text{Ø}4 \times 13,5$ м

После определения исходных данных был разработан цифровой двойник трубной шаровой мельницы $\text{Ø}4 \times 13,5$ м с использованием системы автоматизированного проектирования *Siemens NX*. Цифровой двойник трубной шаровой мельницы (рис. 6.6) состоит из средней части 1, соединенной с загрузочной 2 и разгрузочной 3 частями посредством болтового соединения. Средняя часть в сборе опирается на подшипник 4. Подача материала в мельницу осуществляется через приемную камеру 5. Во вращение мельница приводится от центрального привода 6.

Средняя часть мельницы разделена на камеры грубого и тонкого помола межкамерной перегородкой 7 (рис. 6.6). В первой камере помола установлена ступенчатая футеровка 8 разработанная и оптимизированная в рамках настоящей работы. Во второй камере установлена сортирующая футеровка 9. Выгрузка материала из мельницы осуществляется за счет установки разгрузочной решетки 10.

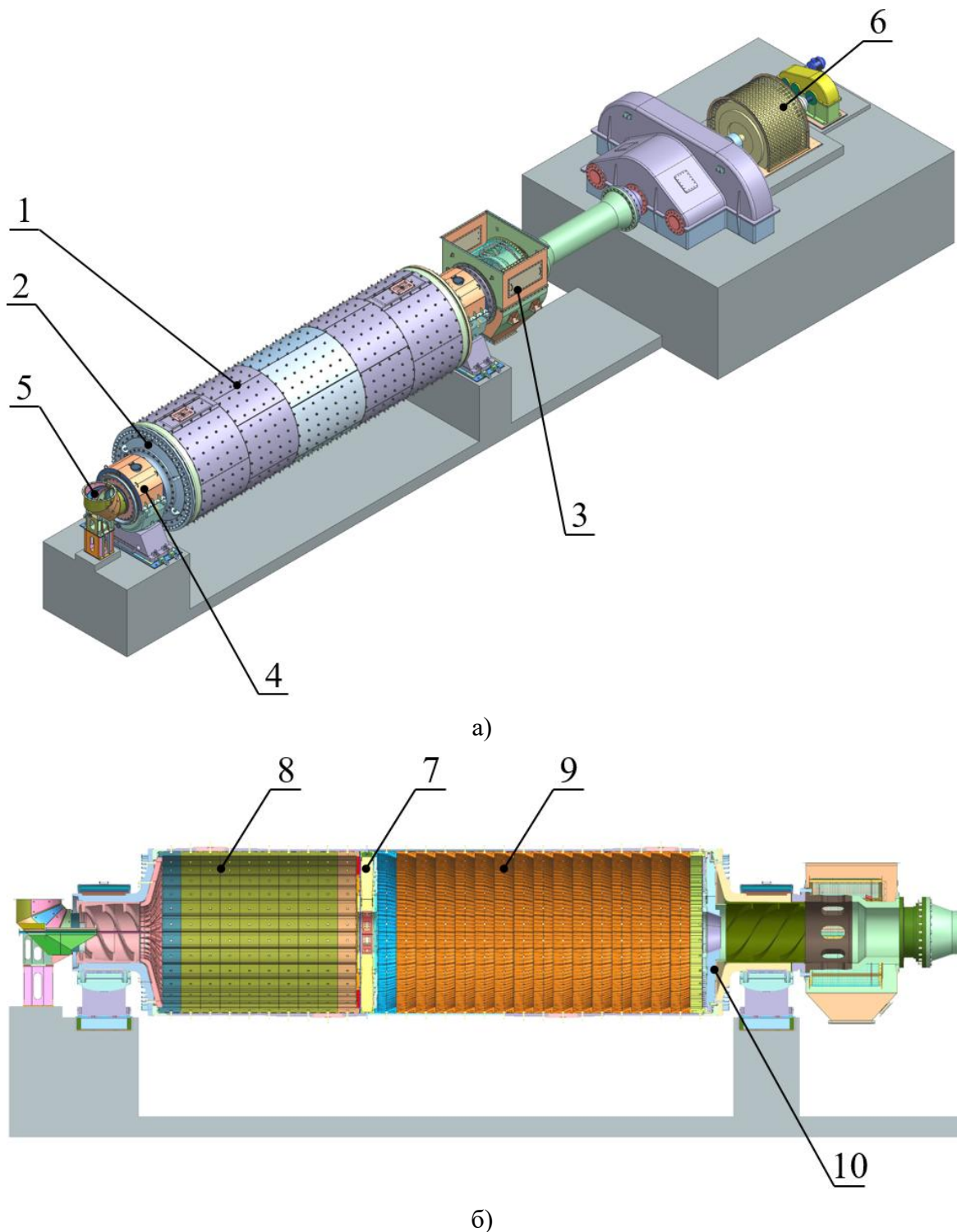


Рисунок 6.6 – Цифровой двойник трубной шаровой мельницы $\text{Ø}4 \times 13,5$ м:

а – вид изометрии; б – разрез

1 – средняя часть; 2 – загрузочная часть; 3 – разгрузочная часть; 4 – подшипник;

5 – приемная камера; 6 – центральный привод; 7 – межкамерная перегородка;

8 – ступенчатая футеровка; 9 – сортирующая футеровка; 10 – разгрузочная решетка

С целью цифрового моделирования рационального профиля ступенчатой футеровки определены исходные данные для исследования процесса измельчения.

Цифровое моделирование осуществляется при максимальном коэффициенте загрузки барабана мельницы $\varphi=0,32$, так как в этом случае энергопотребление мельницы является максимальным. Исходные данные для цифрового моделирования футеровки представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Исходные данные для цифрового моделирования

Наименование параметра	Ед. из-я	Значение
Внутренний диаметр мельницы	м	3,97
Длина мельницы	м	13,5
Длина первой камеры	м	4,859
Длина второй камеры	м	7,983
Коэффициент загрузки	доли ед.	0,32
Размеры мелющих тел и их ассортимент	мм	Ø90 – 13,5%; Ø80 – 38,5%; Ø70 – 33%; Ø60 – 15%.
Размер загружаемого материала	мм	30
Частота вращения барабана мельницы	об/мин	16,2

Далее определены физико-механические свойства материалов, для футеровки выбран материал – сталь 110Г13Л, материал мелющих тел – сталь ШХ-15, измельчаемый материал – клинкер. Физико-механические свойства материалов представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Физико-механические свойства материалов

Наименование параметра	Футеровка	Мелющие тела	Измельчаемый материал
Наименование материала	Сталь 110Г13Л	Сталь ШХ-15	Цементный клинкер
Плотность, кг/м ³	7820	7812	3100
Модуль Юнга, МПа	$2 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$
Коэффициент Пуассона	0,29	0,3	0,15

В соответствии с задачами моделирования футеровки и режимов работы мелющей загрузки определены параметры взаимодействия каждой пары контактов (табл. 6.3): мелющие тела – футеровка; клинкер – футеровка; мелющие тела – мелющие тела; мелющие тела – клинкер; клинкер – клинкер.

Таблица 6.3 – Параметры взаимодействия каждой пары контактов

Наименование параметра	Наименование пары контактов				
	Мелющие тела-футеровка	Клинкер-футеровка	Мелющие тела-мелющие тела	Мелющие тела-клинкер	Клинкер-клинкер
Коэффициент статического трения	0,5	0,7	0,4	0,6	0,7
Коэффициент динамического трения	0,5	0,55	0,1	0,5	0,55
Коэффициент восстановления	0,5	0,5	0,68	0,5	0,5

В настоящей работе выполнено цифровое моделирование ступенчатой футеровки трубной шаровой мельницы и режимов работы при использовании исходной конструкции футеровки [93, 94]. В ходе исследования режимов работы мелющей загрузки трубной шаровой мельницы на основе цифрового моделирования определены траектории движения мелющих тел в поперечном сечении барабана мельницы (рис. 6.7).

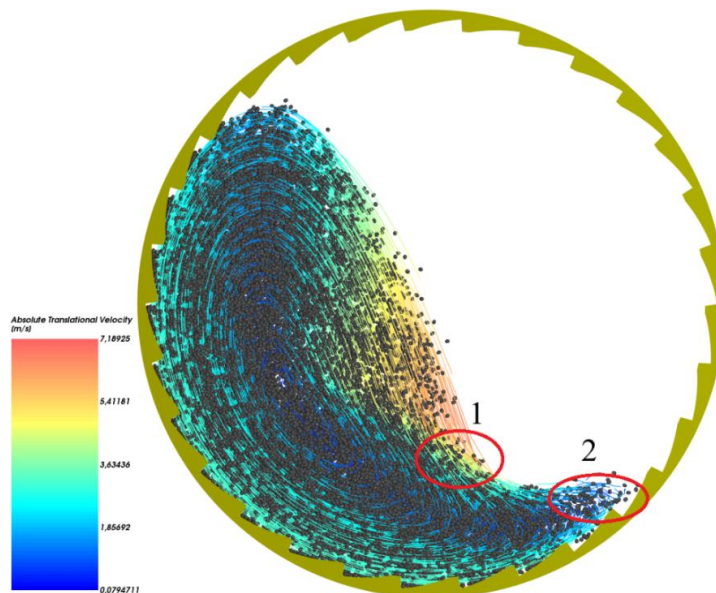


Рисунок 6.7 – Скорость движения мелющих тел с частицами материала

Из рисунка 6.7 видно, что при использовании разработанного профиля футеровки обеспечивается смешанный режим работы мелющей загрузки, при этом, в сравнении с использованием прокатного профиля ударное воздействие мелющих тел на частицы клинкера осуществляется в зоне 1. В зоне 2 ударное воздействие

мельющих тел на частицы клинкера отсутствует, за счет чего увеличивается срок службы футеровки.

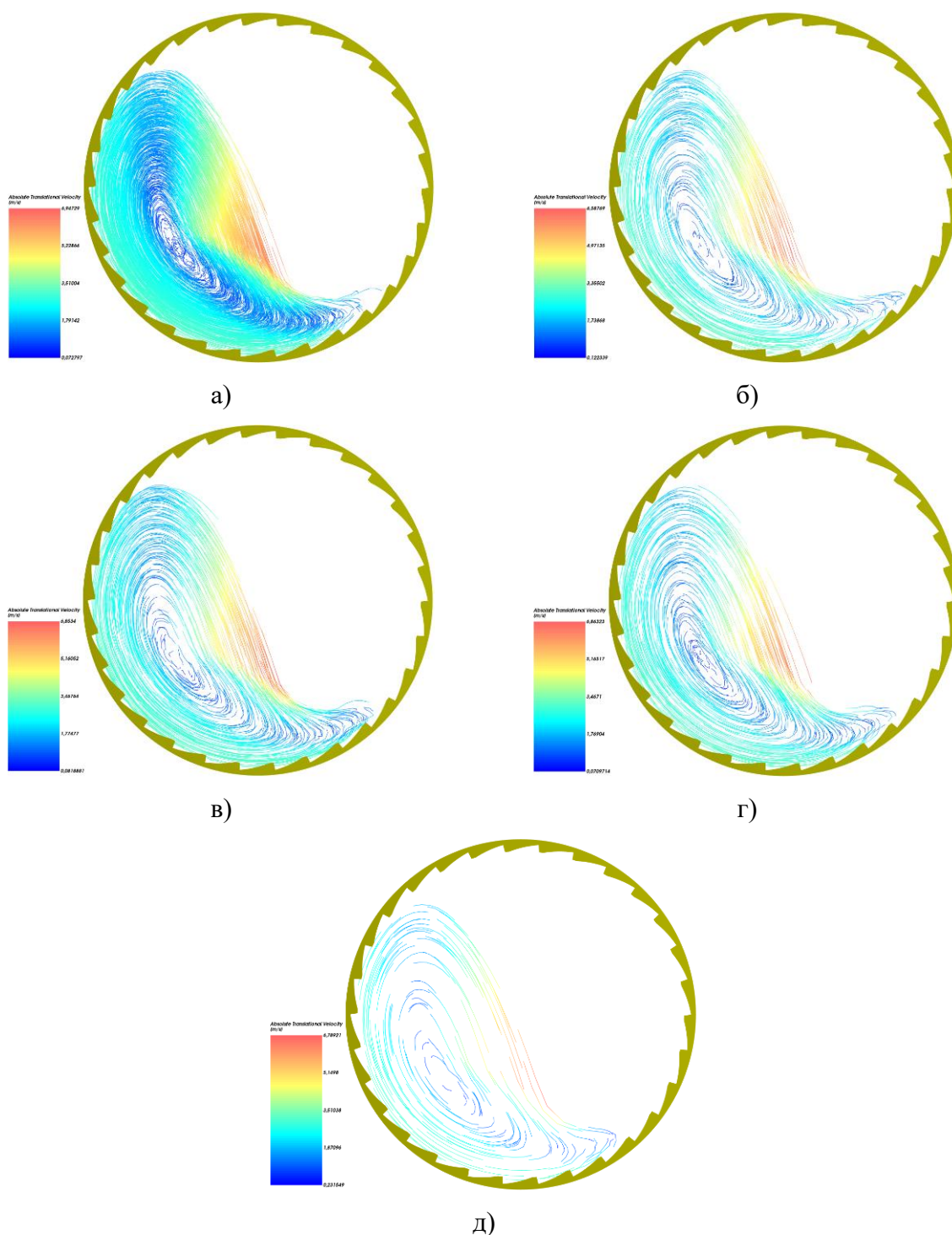


Рисунок 6.8 – Траектории и скорости движения мельющей загрузки:
а – частиц клинкера; б –мельющих тел Ø60 мм; в – мельющих тел Ø70 мм;
г – мельющих тел Ø80 мм; д – мельющих тел Ø90 мм

Далее произведен анализ траекторий движения и скоростей движения мельющих тел и частиц клинкера (рис. 6.8). В ходе анализа определено, что частицы клинкера и мельющие тела работают в смешанном режиме работы (рис. 6.8, а-д).

Следует отметить, что максимальной интенсивностью работы обладают мелющие тела диаметром 70 мм (рис. 6.8, в).

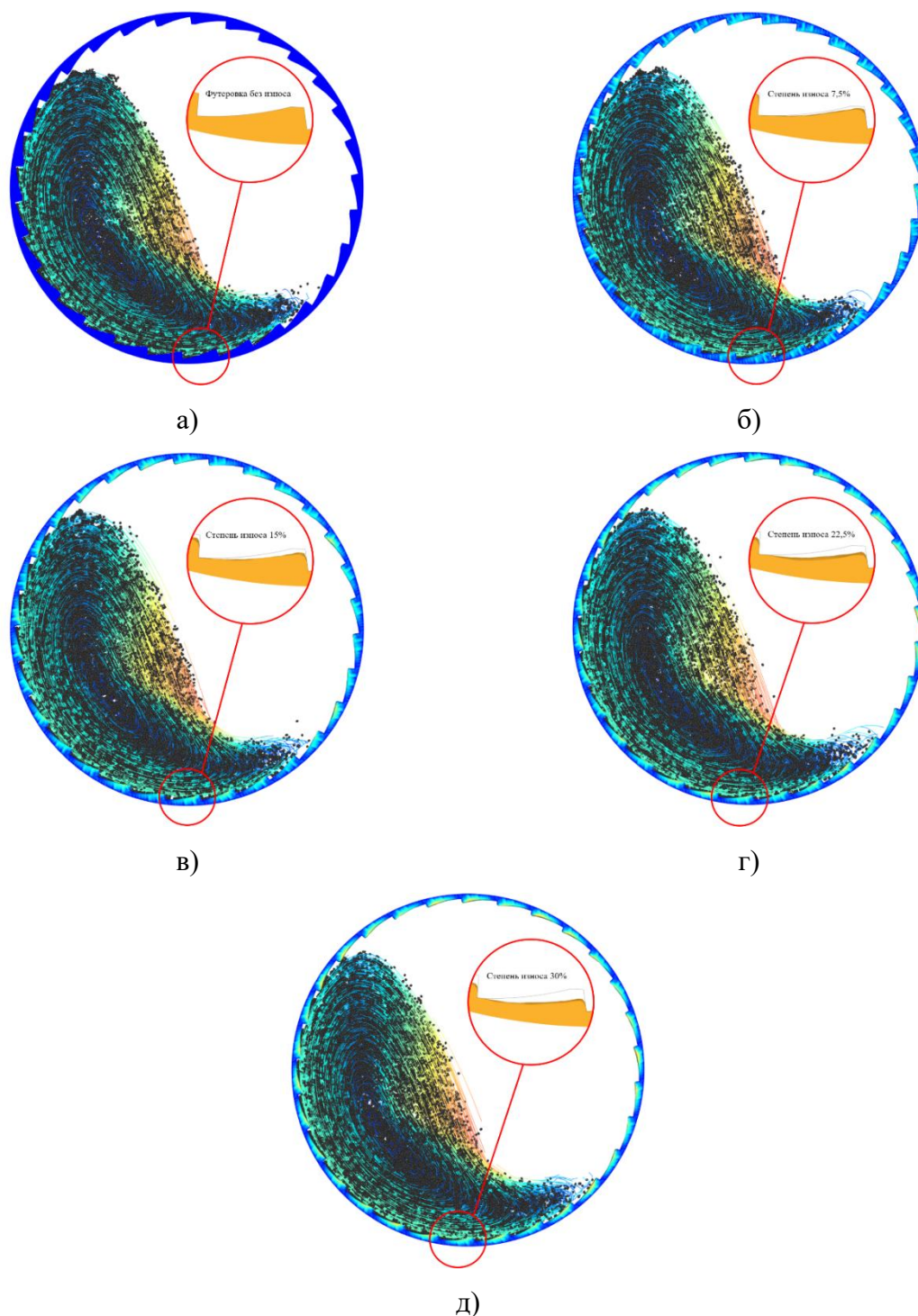


Рисунок 6.9 – Траектории движения мелющей загрузки:

- а – при степени износа футеровки 0%; б – при степени износа футеровки 7,5%;
- в – при степени износа футеровки 15%; г – при степени износа футеровки 22,5%;
- д – при степени износа футеровки 30%

В рамках внедрения метода цифрового моделирования футеровки барабанной шаровой мельницы выполнено моделирование износа футеровки

(рис. 6.9). При износе футеровки на 7,5% (рис. 6.9, б), траектории движения мелющей загрузки не изменяются, в сравнении с футеровкой без износа (рис. 6.9, а). При работе мельницы с увеличением степени износа в пределах 15-30% (рис. 6.9, в-д) траектории движения мелющей загрузки также не изменяются. Таким образом, можно сказать, что обеспечивается постоянство высоты поперечного профиля футеровки, из-за чего сохраняется постоянство траекторий движения мелющей загрузки.

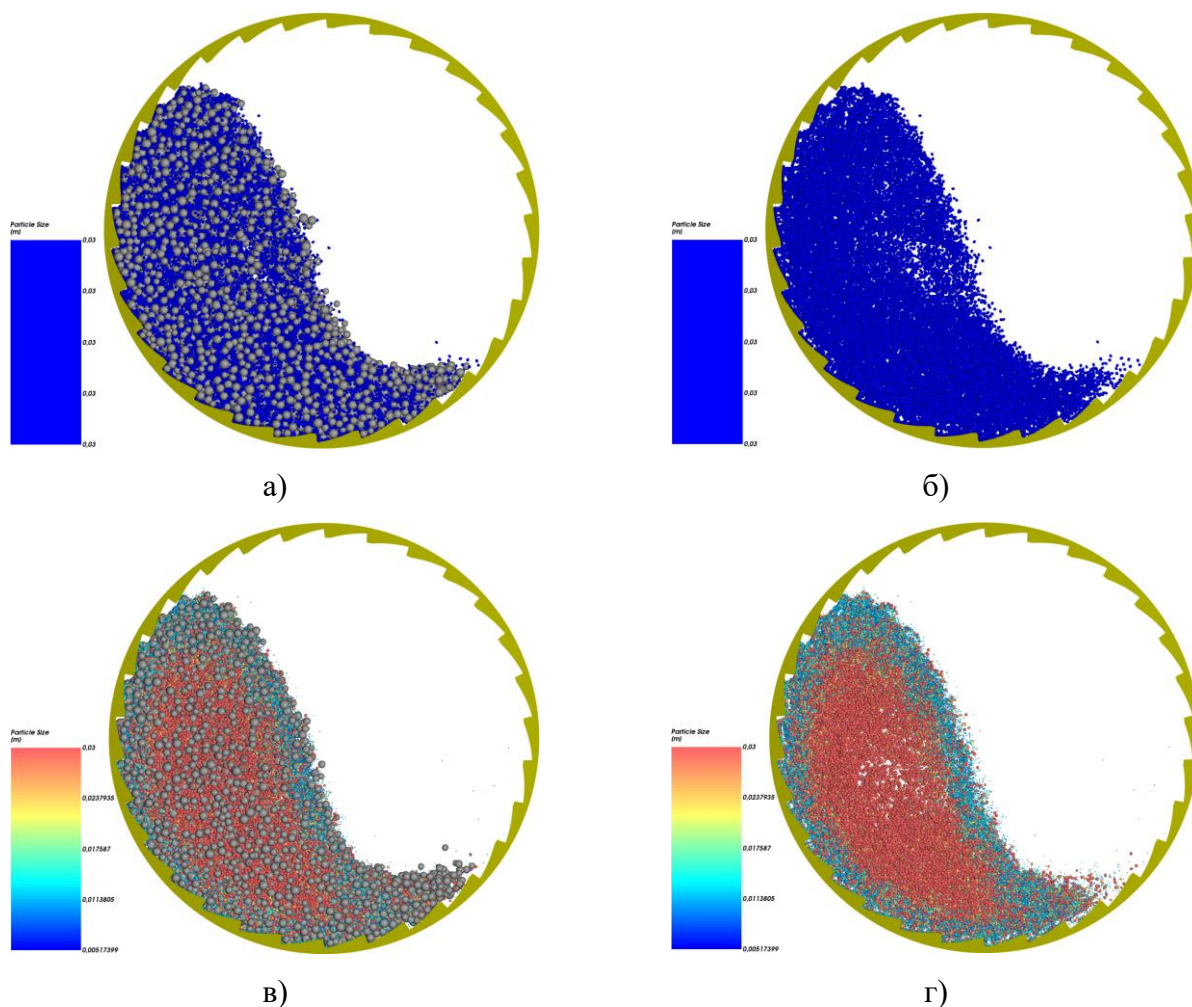


Рисунок 6.10 – Процесс измельчения частиц клинкера в трубной шаровой мельнице $\text{Ø}4 \times 13,5$ м:

а – поперечное сечение мельницы с мелющими телами и частицами материала в начальный момент времени $t=10$ с;

б – поперечное сечение мельницы с частицами материала в начальный момент времени $t=10$ с;

в – поперечное сечение мельницы с мелющими телами и частицами материала в конечный момент времени $t=100$ с;

г – поперечное сечение мельницы с частицами материала в конечный момент времени $t=100$ с;

При моделировании измельчения частиц клинкера в начальный момент времени $t=10$ с размер частиц клинкера составляет 30 мм (рис. 6.10, а-б). При моделировании измельчения в момент времени $t=100$ с минимальный размер частиц 5 мм (рис. 6.10, в-г).

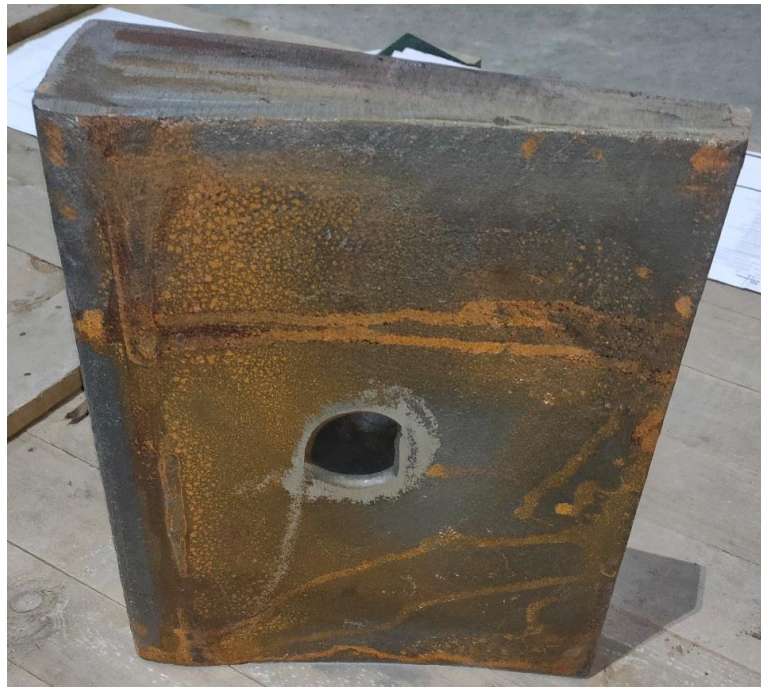


Рисунок 6.11 – Изготовленная футеровка

После цифрового моделирования разработана конструкторская документация для модернизированного профиля футеровки. На основании конструкторской документации изготовлен комплект футеровки для первой камеры трубной шаровой мельницы (рис. 6.11).

6.2 Технико-экономическая эффективность внедрения результатов работы в промышленности.

Целесообразность применения разработанных метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы подтверждается на основе технико-экономического обоснования.

На основе результатов расчета экономической эффективности внедрения разработанного метода исследования режимов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы (Приложение 4) с вариативным исполнением футеровки определено, что срок окупаемости капиталовложений на научно-исследовательские работы в объеме 1,3 млн. руб. составит 2,20 года.

6.3 Внедрение результатов работы в учебный процесс.

При выполнении диссертационной работы были разработаны методы исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки на основе цифрового моделирования.

Разработанный метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки внедрен в образовательный процесс кафедры «Механического оборудования» БГТУ им. В.Г. Шухова (Приложение 5) при выполнении выпускных квалификационных работ при подготовке обучающихся бакалавриата, специалитета, магистратуры и аспирантуры

Разработанный метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки применяется студентами при изучении дисциплины «Проектирование машин общего назначения» для определения кинетических и энергетических параметров мелющей загрузки, потребляемой мощности привода и рациональных режимов работы мелющей загрузки.

6.4 Алгоритм проектирования футеровки барабанной шаровой мельницы.

На основе проведенных исследований разработан алгоритм проектирования футеровки барабанной шаровой мельницы, включающий в себя несколько основных этапов:

- разработка параметризованных цифровых моделей футеровок с многовариантным исполнением;
- определение физико-механических свойств материала футеровки, мелющих тел и измельчаемого материала;
- определение граничных условий и задание параметров взаимодействия между парами контактного взаимодействия в среде цифрового моделирования;
- анализ результатов цифрового моделирования и определение рационального профиля футеровки на основе потребляемой мощности, величины износа и кинетических параметров загрузки.

6.5 Выводы.

1. Разработан цифровой двойник трубной шаровой мельницы $\text{Ø}4 \times 13,5$ м для промышленного применения на предприятии АО «Спасскцемент» и оптимизации технологических процессов.
2. Проведено внедрение метода исследования режимов работы мелющей загрузки трубной шаровой мельницы с применением цифровых двойников и систем инженерного анализа.
3. Проведена апробация результатов работы на предприятии АО «Спасскцемент» г. Спасск-Дальний. Проведено исследование режимов работы мелющей загрузки, в ходе которого при сохранении показателей производительности удалось добиться снижения показателей потребления электроэнергии до 6%.
4. На основе результатов расчета экономической эффективности внедрения разработанного метода исследования режимов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы (Приложение 4) с вариативным исполнением футеровки определено, что срок окупаемости капиталовложений на научно-исследовательские работы в объеме 1,3 млн. руб. составит 2,20 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа научно-технической литературы и исследований отечественных и зарубежных ученых установлено, что основным направлением совершенствования барабанных шаровых мельниц является разработка высокоэффективных внутримельничных устройств с применением современных методов и подходов цифрового моделирования.

2. Получены аналитические выражения, учитывающие конструктивные особенности рассматриваемой футеровки, для определения угла отрыва шара с выступа футеровки, скорости шара в момент его отрыва от выступа футеровки и в момент его падения в зону «пяты».

3. Создан цифровой двойник барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением профиля футеровки, применяемый для проведения моделирования, учитывающего конструктивные особенности футеровки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026614550 от 16.02.2026 г., позволяющей автоматизировать операции по разработке множества цифровых двойников барабанной мельницы.

4. Разработан метод исследования режимов работы мелющей загрузки, состоящей из мелющих тел и частиц измельчаемого материала, барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением поперечного и продольного профиля футеровки на основе цифрового моделирования, позволяющий выполнить анализ траекторий движения мелющих тел, определить скоростные и энергетические параметры мелющей загрузки, определить потребляемую мощность привода, осуществить оценку характера и величины износа футеровки, провести оценку эффективности процесса измельчения.

5. По результатам цифрового моделирования различных исполнений футеровок и исследования режимов работы мелющей загрузки определены рациональные режимы работы мелющих загрузок, достигаемые при частоте вращения барабана мельницы $n=46,51$ об/мин, определено максимальное значение потребляемой мощности $P=652$ Вт, что подтверждается сходимостью с расчетными данными, расхождение с которыми не превышает 7%.

6. Установлено влияние варьируемых параметров цифрового моделирования на степень износа рабочей поверхности футеровки, и определено что на степень износа рабочей поверхности футеровки оказывают существенное влияние частота вращения барабана мельницы и коэффициент загрузки. При этом, минимальной степенью износа, равной 15,1% обладает волнистая футеровка, при износе которой режим работы мелющей загрузки изменяется незначительно.

7. Выполнена модернизация лабораторной барабанной шаровой мельницы путем установки футеровки, изготовленной из композитных материалов с применением многономенклатурного гибридного производства на основе аддитивных технологий. Проведена апробация результатов государственного задания №FZWN-2024-0006 «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников» в рамках изготовления футеровки из металла с применением аддитивной технологии послойного наплавления металлической проволоки.

8. В ходе реализации экспериментальных исследований на основе центрального композиционного ротатбельного плана (ЦКРП-24) полного факторного эксперимента в качестве функций отклика были выбраны: потребляемая мощность привода P , остаток на сите $\sum R_{008}$, удельный расход энергии q ; варьируемые факторы: x_1 – частота вращения барабана мельницы, об/мин; x_2 – коэффициент загрузки, доли ед.; x_3 – высота выступов футеровки, мм; x_4 – количество выступов футеровки, ед. Уровни исследуемых факторов учитывают все возможные режимы работы мельницы и процесса измельчения в рамках установленных программой параметров.

9. На основе статистической обработке результатов экспериментальных исследований получены уравнения регрессии в кодированном $P, \sum R_{008}, q=f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, и натуральном виде $P, \sum R_{008}, q=f(n, \varphi, h, t)$. Наибольшее влияние на величину потребляемой мощности P и остаток на сите $\sum R_{008}$ оказывают факторы x_2 и x_1 – величина коэффициента загрузки и частота вращения барабана мельницы – это очевидно, что подтверждает адекватность полученных уравнений регрессии.

10. Определены рациональные режимы работы лабораторной барабанной шаровой мельницы, при которых потребляемая мощность привода находится в пределах $P=410-460$ Вт, тонкость помола готового продукта находится в пределах $\sum R_{008}=6,00-13,62\%$, удельный расход энергии находится в пределах $q=34-39,00$ Вт·ч/кг, которые обеспечиваются в диапазоне варьируемых факторов: $n=43,5-46,5$ об/мин, $\varphi=0,28-0,33$ доли ед., $h=18-23$ мм, $t=8-12$ ед.

11. Проведена апробация результатов работы на предприятии АО «Спасскцемент» г. Спасск-Дальний в рамках выполнения научно-исследовательских работ. Проведено исследование режимов работы мелющей загрузки, в ходе которого при сохранении показателей производительности удалось добиться снижения показателей потребления электроэнергии до 6%.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы рекомендуются для применения в условиях реального производства при исследовании режимов работы мелющей загрузки барабанных шаровых мельниц и производстве новых типов футеровок, а также для выполнения выпускных квалификационных работ при подготовке обучающихся бакалавриата, специалитета, магистратуры и аспирантуры.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в совершенствовании процесса измельчения за счет определения рациональных параметров футеровки промышленных мельниц с целью снижения удельного расхода энергии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- \vec{P} – сила тяжести, Н;
- \vec{N} – сила реакции площадки футеровки, Н;
- $\vec{F}_ц$ – центробежная сила, Н;
- R – радиус барабана шаровой мельницы, м;
- $\vec{F}_к$ – сила трения качения, Н;
- m – масса шара, кг;
- g – ускорение свободного падения, м/с²;
- f – коэффициент трения качения, доли ед.;
- $r_{ш}$ – радиус некоторого выделенного шара, м;
- r_0 – размер ступенчатой футеровки, радиально ориентированной по отношению к центру барабана мельницы, м;
- ω_k – критическая частота вращения барабана мельницы, с⁻¹;
- ω – частота вращения барабана мельницы, с⁻¹;
- φ_0 – угол поворота плоскости футеровки, до которого шар будет находиться на ней в состоянии покоя, град;
- φ_1 – угол поворота плоскости футеровки, при котором центр шара достигает края площадки футеровки, град;
- ψ – доля от критической частоты вращения барабана, доли ед.;
- C_1 и C_2 – произвольные постоянные,
- ϑ_r – скорость перемещения центра шара, м/с;
- ϑ_0 – скорость перемещения центра шара в момент схода с выступа футеровки, м/с;
- ϑ_ω – окружная скорость перемещения центра шара, м/с;
- ϑ – скорость отделения центра шара от плоскости футеровки, м/с;
- $\vartheta_{x0}, \vartheta_{y0}$ – соответственно проекции вектора скорости на координатные оси декартовой системы координат «ХОУ», м/с;
- u_{max} – максимальная высота подъема шара, м;
- x_0, y_0 – соответственно координаты в момент схода шара с футеровки, м;

P – потребляемая полная мощность привода, Вт;

P_1 – мощность, затрачиваемая на передачу мелющим телам потенциальной энергии, Вт;

P_2 – мощность, затрачиваемая на передачу мелющим телам кинетической энергии, Вт;

η – коэффициент полезного действия привода, доли ед.;

n – частота вращения барабана мельницы, с^{-1} ;

A_{II} – работа, затрачиваемая на подъем мелющих тел, Дж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хахалев, П.А. Совершенствование конструкции ступенчатой футеровки и исследование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице: специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хахалев Павел Анатольевич; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – 192 с. – Библиогр.: с. 162-177. – Текст: непосредственный.
2. Боганов, А.И. Механическое оборудование цементных заводов учебное пособие для технических специальностей химико-технологических высших учебных заведений и факультетов / А.И. Боганов. – Москва, Свердловск: Гос. науч.-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1961. – 384 с.
3. Increase efficiency and reliability with cost effective ball mill solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fls.com/en/equipment/grinding/ball-mills>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
4. Simply reliable: meet the ball mill ВAM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.christianpfeiffer.com/en/products/mills/bam/>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
5. From raw material grinding to kiln feed bin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.slideshare.net/slideshow/khdpart2from-raw-material-grinding-to-kiln-feed-binpdf/265599727>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
6. Мельницы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zavodvcm.ru/customers/production/64314f93380b1e3b4681cced>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
7. Бауман, В.А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: Учебник для строительных вузов / В.А. Бауман, Б.В. Клушанцев, В.Д. Мартынов // 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1981. – 324 с.

8. АТОХ Coal Mill [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fuller-technologies.com/products/atox-coal-mill>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
9. Mineral Grinding Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.claudiuspeters.com/product/grinding-systems/>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
10. Валковые измельчители [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ecofor.com/chapter6/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
11. Крюков, Д.К. Футеровка шаровых мельниц / Д.К. Крюков. – М.: Машиностроение, 1965. – 184 с.
12. Несмеянов, Н.П. Новый критерий оценки эффективности процесса измельчения при производстве строительных материалов / Н.П. Несмеянов, Д.Г. Круговой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2009. – №3. – С. 99-103.
13. Крюков, Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горно-обогатительных предприятий / Крюков, Д.К. – М.: Недра, 1966. – 174 с.
14. Uralcem [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uralcemlz.ru/o-kompanii>. – (Дата обращения: 15.05.2025 г.).
15. Mill liners ready for all milling conditions [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <https://fls.com/en/parts-and-services/consumables/milling-consumables>. – (Дата обращения: 15.03.2026).
16. ARMOUR Mill liner solutions Augmenting grinding excellence and sustainability [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <https://brandhub.flsmidth.com>. – (Дата обращения: 15.03.2026).
17. Вдовин, К.Н. Исследование динамики износа мельницы полусамоизмельчения путем математического измельчения / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Ш.М. Хабибуллин // Автоматизация и САПР металлургического производства, – 2017. – №1. – С. 27-31.
18. Дружинина, Т.Я. Факторы абразивного износа и методы повышения износостойкости элементов футеровки барабанных мельниц износа // Т.Я.

Дружинина, В.А. Гронь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, – 2015. – №4. – С. 60-65.

19. Metso Corporation [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <http://www.metso.ru/> – (Дата обращения: 06.05.2026).

20. Morrison, R; Comparing power and performance trends from DEM and JK modelling / R. Morrison, P. CLEARY, W. Valery // SAG Conference Proceedings: Mining and Mineral Process Engineering; Vancouver, BC. – 2001. – P. 284-300 / Режим доступа: <http://hdl.handle.net/102.100.100/201619?index=1> – (Дата обращения: 05.05.2026).

21. Свадковский, В.А. Применение цифровых двойников для повышения операционной эффективности предприятий добывающих отраслей / В.А. Свадковский // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2023. – №14(3). – С. 292-311. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-3-292-311

22. Дмитрак, Ю.В. Научный анализ математических моделей движения мелющей загрузки в помольных камерах мельниц различных типов / Ю.В. Дмитрак, А.А. Кравцов, Л.С. Адамова, Р.Р. Кутуев, А.Е. Цыганов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9-1. – С. 55-74. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_55.

23. Guasch, E. New approach to ball mill modelling as a piston flow process / E. Guasch, H. Anticoi, S.A. Hamid // Minerals Engineering. – 2017 – Vol. 116. – PP. 82-87. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.04.002.

24. Пулатов, В.Б. Математическое моделирование работы шаровой мельницы в ГМЗ-2 НГМК / В.Б. Пулатов, Е.Б. Кадиров, С.Б. Бойбутаев, Р. Р. Ийдиева // Горный вестник Узбекистана. – 2020. – № 4(83). – С. 56-59.

25. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения [Текст]. – Дата введения 01.01.2022; – М.: Изд-во стандартов, 2021. – 15 с.

26. Voemer, D. Discrete Element Method Modeling of Ball Mills – Liner Wear Evolution: master's thesis / Dominik Voemer. – Liege, Belgium: 2015. – 215 p.

27. Cleary, P.W. Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM / P.W. Cleary, Rob D. Morrison // Minerals Engineering. – 2011. – Vol. 24. – P. 352-366.
28. Jayasundara, C.T., Impact energy of particles in ball mills based on DEM simulations and data-driven approach / C.T. Jayasundara, H.P. Zhu // Powder Technology. – 2021. – Vol. 395. – P. 226-234.
29. Wang, M.H., DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills / M.H. Wang, R.Y. Yang, A.B. Yu // Powder Technology. – 2012. – Vol. 223. – P. 83-91.
30. Yaoyu, L.A DEM based scale-up model for tumbling ball mills / L. Yaoyu, Y. Yang, G. Dazhao, Y. Aibing, Y. Runyu // Powder Technology. – 2022. – Vol. 409. – P. 117854.
31. Rodrigo, M. de Carvalho. Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model / Rodrigo M. de Carvalho, Luis Marcelo Tavares // Minerals Engineering. – 2013. – Vol. 43-44. – P. 91-101.
32. Tano, K. Continuous monitoring of mineral processing processes with special attention to ball mills – a multidimensional approach: doctoral thesis / Kent Tano. – Lulea, Sweden, – P. 60.
33. Tano, K. Persson Continuous Monitoring of a Tumbling Mill / K. Tano, B. Pålsson, V. Sture // Proceedings XXII International mineral processing congress, October 28, 2003 – Cape Town, South Africa, 2003. – P. 1514-1523.
34. Tano, K. Monitoring of a tumbling mill using PLS-regression on a wavelet transformed strain gauge signal / K. Tano, B. Pålsson, S. Rannar // Submitted to Sensors and Actuators A: Physical. – 2004. – P. 12.
35. Tano, K. On-line measurement of charge position and filling level in industrial-scale mills / K. Tano, A. Berggren, B. Pålsson // Minerals & Metallurgical Processing. – 2005. – Vol. 22. – P. 121-129.

36. Tano, K. On-line lifter deflection measurements showing flow resistance effects in grinding mills / K. Tano, B. Palsson, A. Sellgren // Minerals Engineering. – 2005. – Vol. 18. – P. 1077-1085.
37. Tano, K. Comparison of experimental mill lifter deflection measurements with DEM predictions / K. Tano, M.M. Pierce, J. Alatalo // Mineral Processing. – 2008. – P. 13.
38. Wang, M. Particle fracture modeling in drum ball mills: master's thesis / M. Wang. – Sydney, Australia, 2012. – 107 p.
39. Hosseini KouhKamari M. A PBM framework based on DEM modelling and particle breakage kinetics to investigate continuous grinding in ball mills: doctoral thesis / M. Hosseini KouhKamari. – Sydney, Australia, 2017. – 152 p.
40. Cleary, P. Effect of operating condition changes on the collisional environment in a SAG mill / P. Cleary, P. Owen // Minerals Engineering. – 2018. – Vol. 132. – P. 297-315.
41. Xua, L. Influence of particle shape on liner wear in tumbling mills: A DEM study / L. Xua, K. Luo, Y. Zhao, J. Fan, K. Cen // Powder Technology. – 2019. – Vol. 350. – P. 26-35.
42. Aldrich, C. Consumption of steel grinding media in mills – A review / C. Aldrich // Minerals Engineering. – 2013. – Vol. 49. – P. 77-91.
43. Xin, F. Research on mixed steel and ceramic balls in tumbling mills: Motion behavior and energy evolution / F. Xin, W. Caibin, L. Ningning, L. Li, W. Ji, L. Riqian, L. Dagui, W. Hongxi, L. Baojian // Powder Technology. – 2025. – Vol. 452. – P. 120576.
44. Yin, Z. Research on an Accurate Simulation Modeling and Charge Motion Quantitative Evaluation Method for Ball Mill in Confined Space / Z. Yin, Z. Jin, T. Li // Minerals. – 2024. – Vol. 14, No. 6. – P. 604.
45. Pedrayes, F. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring / F. Pedrayes, J.G. Norriella, M.G. Melero, A. Pelaez, J.J. Diaz // Powder Technology. – 2018. – Vol. 323. – P. 433-444.

46. Celine, Zapata-Massot. Effect of ball milling in a tumbling ball mill on the properties of multi-wall carbon nanotubes / Zapata-Massot Celine, Nadine Le Bolay // *Chemical Engineering and Processing*. – 2008. – Vol. 47. – P. 1350-1356.
47. Rajamani, R.K. Advances in discrete element method application to grinding mills / R.K. Rajamani, S. Rashidi, N. Dhawan // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. – 2014 – Vol. 10. – P. 117-128.
48. Неронов, Н.П. Механика шаровой мельницы / Н.П. Неронов // *Записки Горного института*. – 1956. – Том 33. № 3. – С. 37-53.
49. Дэвис, Э.В. Тонкое измельчение в шаровых мельницах / Э.В. Дэвис // Сб. ин-та «Механобр». Теория и практика дробления и тонкого измельчения. – М.: ГОСтехиздат. – 1932. – С. 194-234.
50. Богданов, В.С. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 270101 «Строительство» и 151000 «Технологические машины и оборудование» / В.С. Богданов, Р.Р. Шарапов, Ю.М. Фадин [и др.] // ред. проф. В.С. Богданова. – Старый Оскол: ТНТ. – 2013. – 679 с. – ISBN 978-5-94178-355-7.
51. Дешко, Ю.И. Измельчение материалов в цементной промышленности / Ю.И. Дешко, М.Б. Креймер, Г.С. Крытхин. – М.: Стройиздат, 1966. – 275 с.
52. Дуда, В.Г. Цемент / В.Г. Дуда; пер. с нем. Е. Ш. Фельдмана. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
53. Зозуля, П.В. Проектирование цементных заводов / П. Н. Дмитриев, Г. Б. Егоров, П. В. Зозуля [и др.] // ред. П. В. Зозули, Ю. В. Никифорова. – СПб: Синтез, 1995. – 444 с.
54. Силенок, С.Г. Механическое оборудование предприятий строительной индустрии / С.Г. Силенок. – М.: Стройиздат. – 1973. – 375 с.
55. Алексеев, Б.В. Технология производства цемента / Б.В. Алексеев. – М.: Высшая школа, 1980. – 266 с.

56. Морозов, Е.Ф. Экспериментальное исследование влияния профиля футеровки на скольжение дробящей среды барабанной мельницы / Е.Ф. Морозов, Г.П. Образцов // Известия Вузов «Горный журнал». – 1973. – №6. – С. 176-182.

57. Крюков, Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горно-обогатительных предприятий / Д.К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 174 с.

58. Богданов, В.С. Проблема проектирования технологических комплексов / В.С. Богданов, М.Ю. Ельцов, С.И. Анциферов, П.А. Хахалев // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы международной научно-технической конференции, Минск, 26-28 ноября 2014 года, – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2014. – С. 210-213.

59. Переделы производства. Проектирование. Инжиниринг. Консалтинг. Тематическая подборка. / Цемент и его применение. – СПб: Изд-во Журнал «Цемент» – 2012. – №6. – С. 36-66.

60. Переделы производства. Помол. Тематическая подборка. / Цемент и его применение. СПб: Изд-во Журнал «Цемент» – 2008. – №5. – С. 16-94.

61. Low overall costs and sophisticated technology [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.christianpfeiffer.com/all-products/> – (Дата обращения: 20.12.2025).

62. Переделы производства. Рабочие элементы измельчающего оборудования. Тематическая подборка. / Цемент и его применение. СПб: Изд-во Журнал «Цемент» – 2015. – №2. – С. 46-74.

63. Comparing power and performance trends from DEM and JK modelling [Электронный ресурс]. / Режим доступа: [http://www.metso.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB-120117-22576-296EB/\\$File/080.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB-120117-22576-296EB/$File/080.pdf). – (Дата обращения: 20.12.2025).

64. Cleary, P.W. Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mill / P.W. Cleary, R. Morrisson, S. Morrell // International Journal of Mineral Processing. – 2003. – № 1-4 (68). – P. 129-165.

65. Delaney, G.W. Predicting breakage and the evolution of rock size and shape

distributions in Ag and SAG mills using DEM / G.W. Delaney, P.W. Cleary, R.D. Morrison, S. Cummins, B. Loveday // Minerals Engineering. – 2013. – № 50-51. – P. 132-139.

66. Rosenkranz, S. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills / S. Rosenkranz, S. Breitung-Faes, A. Kwade // Powder Technology. – 2011. – № 1 (212). – P. 224-230.

67. Sato, A. Analysis of abrasion mechanism of grinding media in a planetary mill with DEM simulation / A. Sato, J. Kano, F. Saito // Advanced Powder Technology. – 2010. – № 2 (21). – P. 212-216.

68. Gutierrez, A. Simulation of Material Transport in a SAG Mill with Different Geometric Lifter and Pulp Lifter Attributes Using DEM / A. Gutierrez // Mining, Metallurgy and Exploration. – 2019. – № 2 (36). – P. 431-440.

69. Kalala, J.T. Discrete element method (DEM) modelling of evolving mill liner profiles due to wear. Part II. Industrial case study / J.T. Kalala, M. Bwalya, M.H. Moys // Minerals Engineering. – 2005. – № 15 (18). – P. 1392-1397.

70. Kolahi, S. Mill P. S. A. G. Investigation of Effect of Number of Lifters on Performance of Pilot-Scale SAG Mills Using Discrete Element Method / S. Kolahi, M.J. Chegeni // Journal of Mining and Environment. – 2020. – Vol. 11, No. 3. – P. 675-693.

71. Bian, X. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation / X.W. Bian, W. Guoqiang, W. Hongdi, W. Shuai, Lv. Weidong // Minerals Engineering. – 2017. – № 105. – P. 22-35.

72. Powell, M.S. DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills / M.S. Powell, N.S. Weerasekara, S. Cole, R.D. Laroche, J. Favier // Minerals Engineering. – 2011. – № 3-4 (24). – P. 341-351.

73. Читалов, Л.С. Новые подходы в моделировании процессов рудоподготовки / В.В. Львов, Л.С. Читалов // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса, СПб, 12-30 ноября 2018 года – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. –

C. 266-267.

74. Aleksandrova, T. Selective Desintegration and Concentration: Theory and Practice / T. Aleksandrova, N. Nikolaeva, H. Lieberwirth, A. Aleksandrov // E3S Web of Conferences, 2018, Vol. 56. – P. 03001 – DOI: 10.1051/e3sconf/20185603001.

75. Chitalov, L. New approaches in mineral raw materials comminution tests modelling / V. Lvov, L. Chitalov // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. – 2020. – P. 146-151.

76. Klichowicz, M. Grain-based dem for particle bed comminution / M. Klichowicz, H. Lieberwirth // Minerals. – 2021. – № 3 (11). – P. 1-19.

77. Таранов, В.А. Обзор программ по моделированию и расчету технологических схем рудоподготовки / В.А. Таранов, В.Ф. Баранов, Т.Н. Александрова // Обогащение руд. – 2013. – № 5. – С. 3-7.

78. Aleksandrova, T.N. Ore processing efficiency improvements for precious metals based on process simulations / T.N. Aleksandrova, N.V. Nikolaeva, V.V. Lvov, A.O. Romashev // Obogashchenie Rud. – 2019. – № 2. – P. 8-13.

79. Datta, A. A direct approach of modeling batch grinding in ball mills using population balance principles and impact energy distribution / A. Datta, R.K. Rajamani // International Journal of Mineral Processing. – 2002. – Vol. 64. – P. 181-200.

80. Mishra, B.K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Part I-contact mechanics / B.K. Mishra // International Journal of Mineral Processing. – 2003. – Vol. 71, No. 1-4. – P. 73-93. – DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00032-2

81. Mishra, B.K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Part II-Practical applications / B.K. Mishra // International Journal of Mineral Processing. – 2003. – Vol. 71, No. 1-4. – P. 95-112. – DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00031-0.

82. Mishra, B.K. Simulation of charge motion in ball mills: Part 1. Experimental verifications / B.K. Mishra, R.K. Rajamani. // International journal of mineral processing. – 1994. – Vol. 40. – P. 171-186.

83. JK Drop Weight Test [Электронный ресурс]. / Режим доступа:

<https://www.sgs.com/-/media/sgscorp/documents/corporate/brochures/sgs-151-jk-drop-weight-test.cdn.en-CA.pdf> – (Дата обращения: 06.05.2026).

84. The University of Queensland Brisbane, Australia [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.jktech.com.au> – (Дата обращения: 06.05.2026).

85. ООО «Вычислительные Системы» [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <https://procsim.ru/products/usim-pac/> – (Дата обращения: 02.02.2026).

86. Богданов, В.С. Состояние и направления развития техники и технологии измельчения / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Д.В. Богданов, Е.А. Сычѐв // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 7. – С. 110-116. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116.

87. Богданов, В.С. Моделирование кинетики работы мелющих тел в шаровой барабанной мельнице / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Е.А. Сычѐв // Цемент и его применение. – 2024. – № 6. – С. 34-37.

88. Богданов, В.С. Цифровое проектирование футеровки трубных мельниц / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Е.А. Сычѐв [и др.] // Цемент и его применение. – 2025. – № 1. – С. 38-41.

89. Богданов, В.С. Влияние высоты выступов футеровки шаровой барабанной мельницы на процесс измельчения / В.С. Богданов, Е.А. Сычѐв, Е.И. Шелудченко [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2025. – С. 38-41.

90. Богданов, В.С. Исследование режимов работы шаровой загрузки при использовании двойных выступов футеровки / В.С. Богданов, Е.А. Сычѐв, У.И. Запара [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2025. – С. 33-37.

91. Богданов, В.С. Численное моделирование режимов работы мелющей загрузки шаровой барабанной мельницы / В.С. Богданов, Е.А. Сычѐв, А.А. Волков [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для

производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2025. – С. 29-32.

92. Богданов, В.С. Исследование распределения мощности, затрачиваемой при помоле клинкера / В.С. Богданов, Е.А. Сычѐв, С.И. Анциферов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 3. – С. 344-352. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-3-344-345.

93. Богданов, В.С. Дополнительно потребляемая мощность привода шаровой барабанной мельницы / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Е.А. Сычѐв // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 2. – С. 33-37.

94. Bogdanov, V.S. Power Calculation of Ball-Tube Mill Drives in the Construction Materials Industry / V.S. Bogdanov, S.I. Antsiferov, D.V. Bogdanov, E.A. Sychev // Innovations and Technologies in Construction, Белгород, 09-10 марта 2022 года. Vol. 307. – RUS: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 319-327. – DOI 10.1007/978-3-031-20459-3_40.

95. Bogdanov, V.S. Calculation of the Parameters of the Grinding Load in a Ball-Tube Mill for the Production of Construction Materials / V. S. Bogdanov, D.V. Bogdanov, E.A. Sychev, A.V. Karachevtseva // Innovations and Technologies in Construction, Белгород, 09-10 марта 2022 года. Vol. 307. – RUS: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 180-188. – DOI 10.1007/978-3-031-20459-3_23.

96. Archard, J.F. Theory and mechanisms of wear: a handbook of wear control / J.F. Archard, M.B. Peterson; edited by W.O. Wiener. – New York: American Society of Mechanical Engineers. – 1980. – P. 35-80.

97. Qiu, X. Prediction of wear of mill lifters using discrete element method / X. Qiu, A. Potapov, M. Song, L. Nordell // SAG Conference Proceedings: Mining and Mineral Process Engineering, Vancouver, BC. – 2001. – P. 260-271.

98. Сычѐв, Е.А. Возможности моделирования износа футеровки шаровой мельницы в Rocky DEM / Е.А. Сычѐв, И.В. Севостьянов // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XVII Международного молодежного форума, Белгород, 30-31 октября 2025 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 715-718.

99. Богданов, В.С. Численное моделирование износа футеровки шаровой мельницы / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Е.А. Сычѳв // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 1. – С. 254-261. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-1-254-255.
100. Богданов, В.С. Расчет предельного коэффициента загрузки шаровой барабанной мельницы с поперечно-продольным движением мелющих тел / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Е.А. Сычѳв, Н.Е. Богданов // СТИН. – 2022. – № 12. – С. 25-28.
101. Читалов, Л.С. Разработка комплексного метода оценки эффективности процессов измельчения сульфидных медно-никелевых руд.: дис. канд. техн. наук: 25.00.13 / Читалов Леонид Сергеевич. – Санкт-Петербург, 2021. – 118 с.
102. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
103. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
104. Налимов, В.В. Теория эксперимента/ В.В. Налимов. – М.: Наука. – 1971. – 208 с.
105. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учебное пособие для хим.-технол. спец. вузов. / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
106. Бондарь, А.Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев: Высшая школа, 1976. – 181 с.
107. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер [и др.]; пер. с нем. Г. А. Фомина и Н. С. Лецкой; ред. Э. К. Лецкого. – М.: Мир. – 1977. – 552 с.
108. Борщевский, А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. / А.А. Борщевский, А.С. Ильин. – М.: Высшая школа, 1987. – 368 с.

109. ГОСТ 6613-86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия [Текст]. – Дата введения 01.01.1988. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.

110. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614550 Российская Федерация. Программа формирования модели корпуса барабанной мельницы для цифрового моделирования режимов работы мелющей загрузки: № 2026613202 заявл. 11.02.2026; зарегистр. 16.02.2026; опубл. 16.02.2026 / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Е.А. Сычёв; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «БГТУ им. В.Г. Шухова».

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Программа расчета угла схода шара с футеровки

```

> restart;
> ur := diff(y(x), x $ 2) + y(x) = A0*sin(x);
> us := y(x0) = 0, D(y)(x0) = 0;
> dsolve({ur, us}, y(x));
> q := simplify(%);
> q1 := x0 = q;
> dsolve(diff(y(x), x, x) + y(x) = A0*sin(x), y(x));
> A := R/psi^2;
> B := f*R/r;
> dsolve(diff(y(x), x, x) + y(x) = A0*sin(x), y(x));
> diff(%, x);
> x := x0;
> q1 := 0 = rhs(y(x) = sin(x)*_C2 + cos(x)*_C1 - 1/2*A0*(cos(x)*x - sin(x)));
> q2 := 0 = rhs(diff(y(x), x) = _C2*cos(x) - _C1*sin(x) + 1/2*A0*sin(x)*x);
> solve({q1, q2}, {_C1, _C2});
> restart;
> _C1 := 1/2*A0*(cos(x0)^2*x0 + sin(x0)^2*x0 - sin(x0)*cos(x0))/(cos(x0)^2 +
sin(x0)^2);
> _C2 := -1/2*sin(x0)^2*A0/(cos(x0)^2 + sin(x0)^2);
> simplify(%);
> f := 0.0001;
> R := 0.225;
> r := 0.015;
> A0 := R*sqrt(1 + f^2/r^2)/psi^2;
> r0 := 2*r;
> psi := 0.76;
> x1 := 2*r0/A0;

```

```
> x0 := arctan(f/r) + arcsin(psi^2/sqrt(1 + f^2/r^2));  
> q3 := x1 = -(sin(x0)*cos(x0) + x - x0)*cos(x) + sin(x)*cos(x0)^2;  
> psi1 := fsolve(q3, x);  
> varphi1 := psi1 + arctan(f/r);  
> varphi := 180*varphi1/Pi;
```

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№2026614550

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026614550

**Программа формирования модели корпуса барабанной
мельницы для цифрового моделирования режимов
работы шаровой загрузки**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Богданов Василий Степанович (RU), Анциферов
Сергей Игоревич (RU), Сычѳв Евгений Андреевич (RU)*

Заявка № 2026613202

Дата поступления 11 февраля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 февраля 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Акт внедрения результатов работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Управляющий

АО «Спасскцемент»



Иванов Виктор Алексеевич

февраль 2026 г.**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы Сычёва Е.А. на
предприятии АО «Спасскцемент»

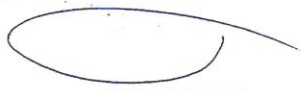
Мы, нижеподписавшиеся, от АО «Спасскцемент» Управляющий АО «Спасскцемент» Иванов В.А., от ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова): профессор кафедры «Механическое оборудование», д-р техн. наук, проф. Богданов В.С., заведующий кафедрой «Механическое оборудование», к.н.т., доц. Анциферов С.И., старший преподаватель кафедры «Механическое оборудование» Сычёв Е.А. составили настоящий акт о том, что на предприятии АО «Спасскцемент» применяется метод исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы для анализа траекторий движения и определения кинетических параметров мелющих тел и частиц материала в поперечном сечении барабана мельницы, оценки характера и прогнозирования износа рабочих поверхностей футеровки, и оценки эффективности процесса измельчения с применением цифрового двойника мельницы, в соответствии со свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026614550 «Формирование модели корпуса барабанной мельницы для цифрового моделирования режимов работы шаровой загрузки» от 16.02.2026 г.

В ходе проведенных исследований подтверждена эффективность предлагаемого метода исследования режимов работы мелющей загрузки

барabanной шаровой мельницы и определен рациональный режим работы трубной шаровой мельницы $\varnothing 4 \times 13,5$ м. При сохранении показателей производительности удалось добиться снижения показателей потребления электроэнергии до 6%.

От АО «Спасскцемент»

Иванов В.А.



От ФГБОУ ВО

БГТУ им. В.Г. Шухова

Богданов В.С.



Анциферов С.И.



Сычѳв Е.А.



Расчет экономической эффективности внедрения метода исследования режимов работы мелющей загрузки

При установке нового типа футеровки в первой камере трубной шаровой мельницы осуществляется расчет капитальных вложений K по формуле:

$$K = C \cdot K_{\text{дм}} + K_{\text{нир}}, \quad (1)$$

где C – оптовая цена комплекта футеровок для трубной шаровой мельницы 4×13,5 м, 23 552 550,00 руб.;

$K_{\text{дм}}$ – коэффициент, учитывающий затраты на доставку, монтаж и ввод мельницы в эксплуатацию, 1,15;

$K_{\text{нир}}$ – затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работы, руб.

Величину капитальных вложений на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ определим по формуле:

$$K_{\text{нир}} = C_{\text{нир}} + K_{\text{ис}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{нир}}$ – производственные затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, руб.;

$K_{\text{ис}}$ – затраты, обусловленные применением определенных материально-технических, трудовых и финансовых ресурсов, 100 000,00 руб.

Производственные затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ определяются как:

$$C_{\text{нир}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц.н.}} + C_{\text{экс}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{мат}}$ – затраты на основные материалы и покупные комплектующие изделия, необходимые для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, руб.;

$C_{\text{зп}}$ – заработная плата научно-технического персонала, руб.;

$C_{\text{соц.н.}}$ – отчисления на социальные нужды, руб.;

$C_{\text{экс}}$ – затраты на эксплуатацию оборудования, установок, стендов приборов, приспособлений и инструментов для выполнения НИР, руб.

Затраты на основные материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, необходимые для выполнения НИР, и цены, руб. определим по группам и видам, исходя из расчета потребности в них:

$$C_{\text{мат}} = Z_{\text{мат}} \cdot C_{\text{мат}}, \quad (4)$$

где $Z_{\text{мат}}$ – потребность в материале для выполняющих НИР, ед.;

$C_{\text{мат}}$ – цена материала (вычислительной техники), руб./ед.

$$C_{\text{мат}} = 1 \cdot 500\,000,00 = 500\,000,00 \text{ руб.}$$

Заработная плата научно-технического персонала, тыс. руб. определяется по формуле:

$$C_{\text{зп}} = C_{\text{спн}} \cdot Z_{\text{спн}} \cdot T_{\text{эф.ч.нир}} \cdot \left(1 + \frac{X}{100}\right), \quad (5)$$

где $C_{\text{спн}}$ – списочная численность работников, выполняющих НИР, чел.;

$Z_{\text{спн}}$ – оклад (тарифная ставка) работника НИР, руб./ч.;

$T_{\text{эф.ч.нир}}$ – период выполнения НИР, 740 ч.;

X – средний процент доплат к тарифному фонду, 65%.

$$C_{\text{зп}} = 1 \cdot 500,00 \cdot 740 \cdot \left(1 + \frac{65}{100}\right) = 610\,500,00 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды составляют:

$$C_{\text{соц.н.}} = C_{\text{зп}} \cdot \frac{Y}{100}, \quad (6)$$

где Y – процент отчисления на социальные нужды, 30%

$$C_{\text{соц.н.}} = 610\,500,00 \cdot \frac{30}{100} = 183\,150,00 \text{ руб.}$$

Затраты на эксплуатацию оборудования (компьютерной техники) для проведения научно-исследовательских работ, руб. определим по формуле:

$$C_{\text{экс}} = C_a + C_{\text{эн}} + C_{\text{эвм}}, \quad (7)$$

где C_a – затраты на амортизацию оборудования, 500 руб.;

$C_{\text{эн}}$ – затраты на энергию, необходимую для проведения НИР, руб.;

$C_{\text{эвм}}$ – затраты на использование вычислительной техники, руб.

Затраты на энергию, необходимую для проведения НИР, вычислим следующим образом:

$$C_{\text{эн}} = N \cdot T_{\text{эф.м.}} \cdot C_{\text{эн}}, \quad (8)$$

где N – мощность, потребляемая оборудованием (компьютерной техникой), кВт;

$T_{\text{эф.м.}}$ – фактический фонд времени работы оборудования по НИР, маш-ч.;

$C_{\text{эн}}$ – тариф (цена) на 1 кВт-ч энергии, руб.

$$C_{\text{эн}} = 1,0 \cdot 740 \cdot 4,27 = 3159,80 \text{ руб.}$$

Затраты на использование вычислительной техники, руб. определим по формуле:

$$C_{\text{ЭВМ}} = T_{\text{ЭВМ}} \cdot C_{\text{ЭВМ}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{ЭВМ}}$ – фактический фонд времени работы ЭВМ, маш-ч;

$C_{\text{ЭВМ}}$ – стоимость 1 ч работы ЭВМ, руб.

$$C_{\text{ЭВМ}} = 740 \cdot 10 = 7\,400,00 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{ЭКС}} = 500 + 3\,159,80 + 7\,400,00 = 11\,059,80 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{нир}} = 500\,000,00 + 610\,500,00 + 183\,150,00 + 11\,059,80 = 1\,304\,709,80 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{нир}} = 100\,000,00 + 1\,304\,709,80 = 1\,404\,709,80 \text{ руб.}$$

$$K = 23\,552\,550,00 \cdot 1,15 + 1\,404\,709,80 = 28\,490\,142,30 \text{ руб.}$$

После расчета капитальных вложений осуществляется расчет себестоимости C_2 создания нового комплекта футеровок:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{q_2 \cdot K_{\text{сер}2} \cdot K_{\text{усл}}}{q_1 \cdot K_{\text{сер}1}}, \quad (10)$$

где C_1 – себестоимость базового комплекта футеровок мельницы $4 \times 13,5$ м, руб.;

q_1, q_2 – значение удельного расхода электроэнергии на помол 1 тонны клинкера до и после внедрения разработанного метода исследования, кВт·ч/т;

$K_{\text{сер}1}, K_{\text{сер}2}$ – коэффициенты серийности [40];

$K_{\text{усл}}$ – коэффициент, учитывающий усложнения изготовления нового комплекта футеровок по сравнению с прежним.

$$C_2 = 26\,650\,000,00 \cdot \frac{44 \cdot 0,9 \cdot 1,5}{41 \cdot 0,9} = 42\,900\,000,00 \text{ руб.}$$

Цена нового комплекта футеровок для мельницы $4 \times 13,5$ м:

$$Ц_2 = C_2 + \frac{P_2}{100} \cdot C_2, \quad (11)$$

где P_2 – рентабельность продукции, %.

$$Ц_2 = 42\,900\,000,00 + \frac{23}{100} \cdot 42\,900\,000,00 = 52\,767\,000,00 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений (период возврата капитальных вложений) определим по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta\Pi_t}, \quad (12)$$

где $\Delta\Pi_t$ – прирост чистой прибыли, руб.

$$\Delta\Pi_t = (C_2 - C_2) - (C_1 - C_1). \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_t &= (52\,767\,000,00 - 42\,900\,000,00) - (23\,552\,550,00 - 26\,650\,000,00) = \\ &= 12\,964\,450,00 \text{ руб.} \end{aligned}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{28\,490\,142,30}{12\,964\,450,00} = 2,20 \text{ лет.}$$

Результаты расчета экономической целесообразности использования разработанного метода исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы на основе цифрового моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технико-экономические показатели проекта

Наименование показателей	Обозначение	Значение
Производственные затраты на выполнение НИР, руб.	$C_{\text{НИР}}$	1 304 709,80
Затраты на использование вычислительной техники, руб.	$C_{\text{ЭВМ}}$	7 400,00
Затраты на приобретение программного обеспечения, руб.	$C_{\text{мат}}$	500 000,00
Прирост чистой прибыли, руб.	$\Delta\Pi_t$	12 964 450,00
Срок окупаемости проекта, лет	$T_{\text{ок}}$	2,20

На основе результатов расчета экономической эффективности внедрения разработанного метода исследования режимов исследования режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы с вариативным исполнением футеровки определено, что срок окупаемости капиталовложений на научно-исследовательские работы в объеме 1,3 млн. руб. составит 2,20 года.

Акт внедрения в учебный процесс

Утверждаю

первый проректор

БГТУ им. В.Г. Шухова

д.т.н., профессор

Е.И. Евтушенко

2026 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Сычёва Евгения Андреевича в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова

Комиссия в составе:

Сергей Игоревич Анциферов – заведующий кафедрой механического оборудования, к.т.н., доцент – председатель комиссии;

Юрий Михайлович Фадин – к.т.н., профессор кафедры механического оборудования – член комиссии;

Матусов Михаил Геннадьевич – к.т.н., доцент кафедры механического оборудования – член комиссии

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Сычёва Е.А. «Цифровое моделирование рационального поперечного и продольного профиля футеровки с учетом режимов работы мелющей загрузки барабанной шаровой мельницы» используются в учебном процессе кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке студентов по направлениям 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 15.05.01-24 «Проектирование технологических машин и комплексов».

Председатель комиссии:

Анциферов С.И.

Члены комиссии:

Фадин Ю.М.

Матусов М.Г.