

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Ощепков Василий Владимирович**

**Повышение энергоэффективности систем пылеприготовления с шаровыми  
барабанными мельницами при работе на непроектных углях**

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические  
системы и агрегаты

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат физ.-мат. наук  
Иванов Сергей Дмитриевич

Иркутск 2021

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| Глава 1. Анализ методов повышения энергоэффективности систем<br>пылеприготовления.....  | 12 |
| 1.1. Особенности эксплуатации систем пылеприготовления с шаровыми<br>барабанными мельницами.....                                | 12 |
| 1.2. Обзор результатов исследований энергоэффективности пылесистем .....  | 16 |
| 1.3. Обзор работ по моделированию пневмотранспорта .....  | 20 |
| 1.4. Постановка задач работы .....  | 28 |
| Глава 2. Моделирование течения газозвеси в основных элементах систем<br>пылеприготовления.....                                  | 29 |
| 2.1. Характеристика объекта исследования.....   | 29 |
| 2.2. Физико-математическая постановка задачи.....   | 31 |
| 2.3. Описание инструмента моделирования.....  | 34 |
| 2.4. Исходные данные для расчета .....  | 35 |
| 2.5. Численный эксперимент. Обработка результатов .....   | 38 |
| 2.6. Верификация результатов численного эксперимента.....   | 44 |
| 2.7. Выводы по главе 2.....   | 46 |
| Глава 3. Моделирование аэродинамического сопротивления основных элементов<br>пылесистем с учетом инъекции угольных частиц ..... | 48 |
| 3.1. Скорость витания и средний диаметр частиц угольной пыли .....  | 48 |
| 3.2. Аэродинамическое сопротивление, возникающее при инъекции угольных<br>частиц в ШБМ.....                                     | 53 |
| 3.3. Аэродинамическое сопротивление, возникающее при инъекции частиц в<br>центробежных сепараторах пыли.....                    | 57 |
| 3.4. Выводы по главе 3.....   | 62 |

|   |     |
|---|-----|
| Глава 4. Анализ энергоэффективности шаровой барабанной мельницы.....                                | 63  |
| 4.1. Сушильная производительность ШБМ.....  | 63  |
| 4.2. Расчет удельного расхода электроэнергии мельницы ШК-32 .....                                   | 65  |
| 4.3. Верификация полученных уравнений.....  | 68  |
| 4.4. Анализ влияния режимных и внешних параметров на<br>энергоэффективность мельницы ШК-32 .....    | 70  |
| 4.5. Определение оптимальной производительности мельницы ШК-32 при<br>размоле мугунского угля ..... | 73  |
| 4.6. Выводы по главе 4.....   | 74  |
| Заключение .....  | 76  |
| Список литературы .....   | 79  |
| Приложение А .....  | 93  |
| Приложение Б .....  | 96  |
| Приложение В.....   | 101 |
| Приложение Г .....  | 111 |
| Приложение Д.....   | 117 |

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Экономия топливно-энергетических ресурсов рассматривается в Федеральной программе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [1] в качестве основного фактора повышения конкурентоспособности отечественной продукции и минимизации техногенного воздействия на окружающую среду. Значительные резервы экономии энергии имеются в различных технологических процессах, в том числе в процессах размола и транспорта угольной пыли в системах пылеприготовления энергетических котлов ТЭС. Также энергостратегия предусматривает расширение производства тепловой и электрической энергии на базе сжигания твердого топлива (в частности, угля).

В настоящее время «предприятия энергетической отрасли имеют 80% мощности сроком эксплуатации более 30 лет и не в состоянии самостоятельно осуществить серьезные мероприятия по обновлению основных фондов в связи с длительным сроком окупаемости инвестиционных проектов» [2]. Системы пылеприготовления (СПП) ТЭС весьма энергоемки: их энергопотребление составляет около 25% от общих затрат электроэнергии на собственные нужды или около 2% от общей выработки электрической энергии [3].

Одним из основных агрегатов для измельчения твердого топлива в России являются шаровые барабанные мельницы (ШБМ) [4]. Область рационального использования ШБМ: очень твердые, абразивные угли с низким коэффициентом размолоспособности  $k_{лo}$ ; низкорреакционные угли с малым выходом летучих, требующие очень тонкого помола; угли с большим содержанием серы и минеральных примесей [5]. Следует также отметить, что пылеприготовление применяется не только в энергетике, но и в других отраслях промышленности таких, как горно-обогатительная, металлургическая, строительная, химическая, зерно-, деревоперерабатывающая, пищевая.

Однако на тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго» из-за ценовой политики ШБМ размалывают угли марок 2Б, 3Б, Д, отходы углеобогащения. На

рисунке 1 представлены расходы сжигаемых углей на ТЭЦ-9 и ТЭЦ-10 ПАО «Иркутскэнерго» за 2016 г.

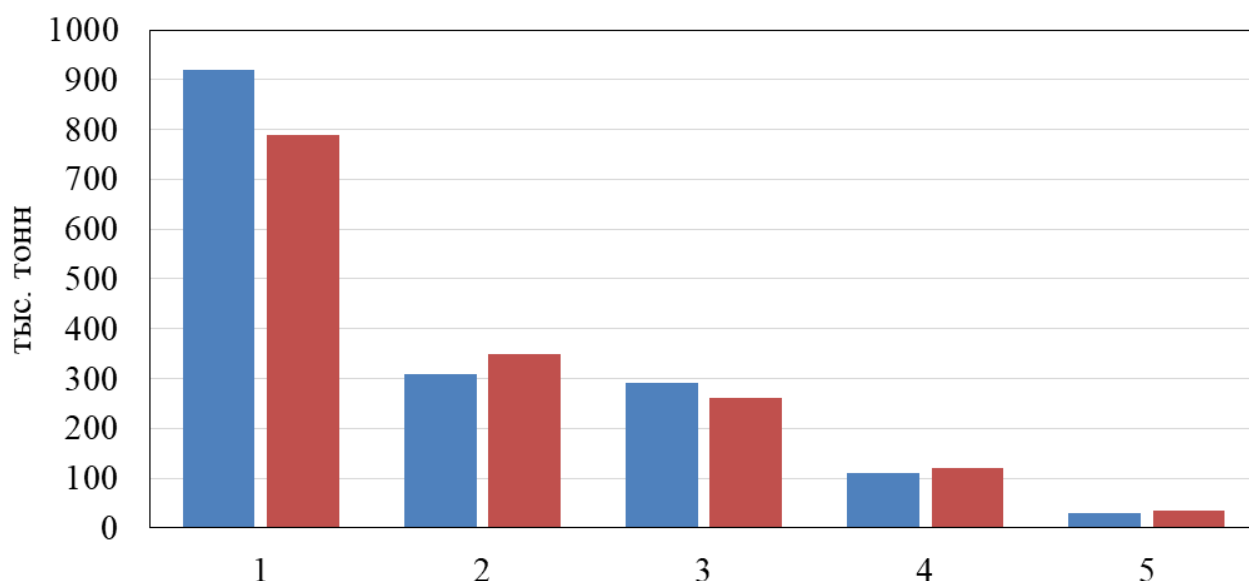


Рисунок 1 – Расходы сжигаемых углей на ТЭЦ-9 (■) и ТЭЦ-10 (■) ПАО «Иркутскэнерго» за 2016 г.: 1 – мугунский (ЗБ); 2 – черемховский (Д); 3 – азейский (ЗБ); 4 – ирбейский (2Б); 5 – головинский (Д)

При переводе ШБМ на размол непроектного топлива необходимо уточнение режимов ее работы и определение оптимального. Основные параметры, характеризующие работу ШБМ: предельная производительность; расход сушильно-вентилирующего агента; аэродинамическое сопротивление; тонина помола пыли. Особенностью мельниц этого типа является зависимость потребляемой ими мощности от количества загруженных шаров, количество же топлива, проходящего через ШБМ, мало сказывается их энергопотреблении. Поэтому работа ШБМ, оснащенной пылевым бункером, с максимальной производительностью по топливу наиболее выгодна. Испытания с целью определения предельной производительности ШБМ весьма трудоемки и затратны. Полученная в ходе испытаний информация обычно не отражает влияние изменения характеристик топлива [6, 7]. Замена ШБМ на другие типы мельниц, подходящих для размола бурых углей, является крайне дорогостоящим мероприятием. Поэтому необходимо проводить

модернизацию действующего оборудования, повышать эффективность его работы путем экономически и научно обоснованных мероприятий.

В связи с вышеперечисленными проблемами при эксплуатации пылесистем с ШБМ, работающих на непроектных углях, тема диссертационной работы является **актуальной**.

**Степень разработанности проблемы.** В отечественной литературе вопросам моделирования и повышения эффективности работы систем пылеприготовления в целом и их отдельных агрегатов уделялось и уделяется много внимания. Этим вопросам посвящены работы Г.Т. Левита [6], А.Н. Лебедева [7], Ю.Г. Назмеева и Р.Г. Мингалеевой [8-10], Д.М. Хзмаляна и Я.А. Кагана [5], В.С. Богданова и Ф.П. Потапова [11], Л.В. Голышева и др. [12-14], С.И. Шувалова [15-16]. В [5-7] обобщен опыт испытаний пылесистем, даны методические рекомендации по анализу их результатов, отмечено существование оптимальных режимов вентиляции и загрузки шарами мельниц типа ШБМ, а также оптимальной тонкости помола пыли при минимуме расхода электроэнергии на пылеприготовление. Исследования [8-10] посвящены «комплексной методике оценки термодинамической эффективности систем подготовки твердого топлива на тепловых электростанциях и котельных» [10]. В работах [12-14] рассматривается повышение эффективности работы систем пылеприготовления с ШБМ. Математическое моделирование пылесистем с ШБМ с целью анализа влияния структуры пылесистемы на ее производительность проводилось в статьях [15-16]. Однако, методика определения оптимального режима работы ШБМ на непроектных углях, которая учитывала бы влияние комплекса режимных, внешних и конструктивных параметров, отсутствует.

Энергоэффективность СПП с ШБМ сильно зависит от режима вентиляции, который определяется расходом сушильного агента. Аэродинамическое сопротивление мельницы является одним из основных параметров, характеризующих ее работу. К настоящему времени существует довольно подробный теоретический и экспериментальный материал, посвященный газовой динамике гетерогенных потоков [17]. Из теоретических исследований следует отметить работы А.Ю. Варак-

сина [17], С. Соу [18], Г. Уоллиса [19], Р.И. Нигматулина [20], Л.И. Зайчика и В.И. Алипченкова [21], И.В. Деревича [22] и др. Среди исследований экспериментального характера стоит выделить работы А.М. Дзядзио и А.С. Кеммера [23], Н. В. Соколова и М.Л. Кисельгофа [24], У. Стегмайера и М. Вебера [25], А.С. Сукомела, Ф.Ф. Цветкова и Р.В. Керимова [26] и др. Но в перечисленных работах приводятся методы и модели, описывающие в основном только влияние концентрации твердых частиц на аэродинамическое сопротивление потоков газозвеси. Данные модели подходят для установок малой производительности. Течение газодисперсных потоков в реальных объектах энергетики недостаточно подробно изучено.

**Цель работы.** Разработка методики определения энергоэффективных режимов работы систем пылеприготовления с ШБМ при размоле непроектных углей.

**Основные задачи исследования:**

1. Обзор существующих методов повышения энергоэффективности систем пылеприготовления.
2. Разработка математической модели и получение критериальных уравнений аэродинамического сопротивления ШБМ.
3. Разработка математической модели и получение критериальных зависимостей аэродинамического сопротивления центробежных сепараторов пыли.
4. Исследование влияния различных параметров на энергоэффективность ШБМ и определение оптимальных режимов работы ШБМ.

**Объект исследования.** Индивидуальная система пылеприготовления с шаровой барабанной мельницей и промежуточным бункером пыли энергетических котлов.

**Предмет исследования.** Газодинамика пылегазового потока в элементах оборудования пылесистемы, удельные расходы электроэнергии на пылеприготовление.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы является разработка алгоритма определения энергоэффективных режимов работы

СПП с ШБМ. В работе применяются моделирование с помощью пакета прикладных программ FlowVision, методы статистического анализа данных, теории подобия и анализа размерностей.

**Научная новизна работы:**

1. Предложена математическая модель аэродинамического сопротивления систем пылеприготовления с ШБМ энергетических котлов, отличающаяся учетом потерь давления на инжекцию частиц угольной пыли в поток воздуха.

2. Получены критериальные уравнения, описывающие зависимость аэродинамического сопротивления ШБМ от концентрации угольной пыли, средней скорости витания, среднего диаметра угольных частиц и линейных размеров барабана мельницы.

3. Получены критериальные уравнения, описывающие зависимость аэродинамического сопротивления центробежных сепараторов пыли от концентрации угольной пыли, средней скорости витания, среднего диаметра угольных частиц и линейных размеров сепаратора.

4. Создан алгоритм расчета эффективности работы системы пылеприготовления с шаровой мельницей, отличающийся возможностью определять минимальный удельный расход электроэнергии на пылеприготовление.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты работы могут применяться при эксплуатации шаровых барабанных мельниц с целью повышения экономичности и надежности их работы. Примененный метод исследования и полученные сведения о закономерностях аэродинамического сопротивления могут быть использованы в аэродинамических расчетах широкого класса установок систем пылеприготовления, таких как углеразмольные мельницы различного типа, сепараторы, циклоны, пылепроводы и др.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в Иркутском национальном исследовательском техническом университете. Кроме того, разработанная методика определения оптимального режи-



ма работы ШБМ используется на ТЭЦ-9 ПАО «Иркутскэнерго» и ТЭЦ-10 ООО «Байкальская энергетическая компания» (г. Ангарск) (приложение А).

**Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. критериальное уравнение, позволяющее вычислить коэффициент аэродинамического сопротивления гомогенного потока для ШБМ;
2. критериальное уравнение, позволяющее вычислить коэффициент аэродинамического сопротивления гомогенного потока для центробежных сепараторов пыли;
3. критериальные уравнения, позволяющие найти коэффициент аэродинамического сопротивления, обусловленного инъекцией частиц угольной пыли в ШБМ;
4. критериальные уравнения, позволяющие найти коэффициент аэродинамического сопротивления, обусловленного инъекцией частиц угольной пыли в центробежных сепараторах пыли;
5. методика анализа энергоэффективности работы ШБМ, основанная на режиме равенства размольной и сушильной производительности мельницы и заключающаяся в определении минимального удельного расхода электроэнергии.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, согласованием расчетов с результатами вычислений по известным формулам и измерениями, полученными в ходе режимно-наладочных испытаний систем пылеприготовления.

Расчеты и исследования в работе проводились на основе официальной статистической информации ПАО «Иркутскэнерго» [27, 28]. Многочисленные расчеты, сделанные по предложенным моделям, показали, что расчетные величины (аэродинамическое сопротивление, расход электроэнергии) находятся в близком сопоставимом диапазоне с фактическими показателями.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» ИТФ им. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск, 2015 г.), конференциях-конкурсах молодых ученых «Системные исследования в энергетике».

ке» ИСЭ им. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, 2015-2016 гг.), XII международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплоэнергетика. Энергия-2017» ИГЭУ (г. Иваново, 2017 г.), Всероссийских конференциях с международным участием «Производство и использование энергии в условиях Сибири» ИРНТУ (г. Иркутск, 2014-2018 гг.), IX Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» ТПУ (г. Томск, 2020 г.).

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, результаты и выводы диссертационной работы получены автором лично. Анализ полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 16 статьях [29-44], в том числе 7 в рецензируемых научных изданиях, 4 из которых входят в перечень ВАК РФ, 2 – в базу Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 141 наименования, 5 приложений, изложенных на 121 странице, иллюстрированной 44 рисунками и 12 таблицами.

В **первой главе** приводится обзор литературы по вопросам, исследуемым в данной работе. Рассмотрены проблемы эксплуатации и повышения эффективности систем пылеприготовления энергетических котлов. Рассмотрены существующие методы описания двухфазных дисперсных турбулентных течений, проанализированы их преимущества и недостатки. Дана постановка основных задач, решаемых в диссертационной работе.

Во **второй главе** проведено моделирование течения газозвеси, кратко описаны объекты исследования, поставлена физико-математическая задача, приведены уравнения, описывающие газодинамику гомогенного запыленного потока. С применением программного комплекса FlowVision получена картина движения гомогенной угольной газозвеси в шаровых барабанных мельницах и центробежных сепараторах. Выявлено одно составляющее полного аэродинамического сопротивления основных агрегатов систем пылеприготовления – сопротивление го-

могенного потока, учитывающее сопротивление трения и местные сопротивления. Для этого составляющего получены критериальные уравнения, описывающие зависимость сопротивления от концентрации угольной пыли.

**Третья глава** посвящена моделированию аэродинамического сопротивления основных элементов систем пылеприготовления. Выявлено второе составляющее полного аэродинамического сопротивления основных агрегатов систем пылеприготовления – сопротивление, обусловленное торможением частиц угольной пыли и повторной их инжекцией турбулизированным потоком. Для этого составляющего получены критериальные уравнения, выражающие зависимость сопротивления от средней скорости витания, среднего диаметра угольных частиц и линейных размеров ШБМ и сепараторов.

**В четвертой главе** исследовались энергоэффективность пылесистемы с шаровой мельницы ШК-32 и зависимости удельного расхода электроэнергии на пылеприготовление от шаровой загрузки и расхода сушильного агента. Получена система уравнений, которая позволяет определить минимальный расход электроэнергии на размол и пневмотранспорт угля в пылесистеме с мельницей ШК-32.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

## Глава 1. Анализ методов повышения энергоэффективности систем пылеприготовления

### 1.1. Особенности эксплуатации систем пылеприготовления с шаровыми барбанными мельницами

Система пылеприготовления (СПП) – это совокупность специальных устройств, в которых происходит размол топлива, его сушка и подача полученной пыли в горелки топочной камеры [6, 7, 24].

Основными элементами СПП являются мельница, сепаратор и циклон.

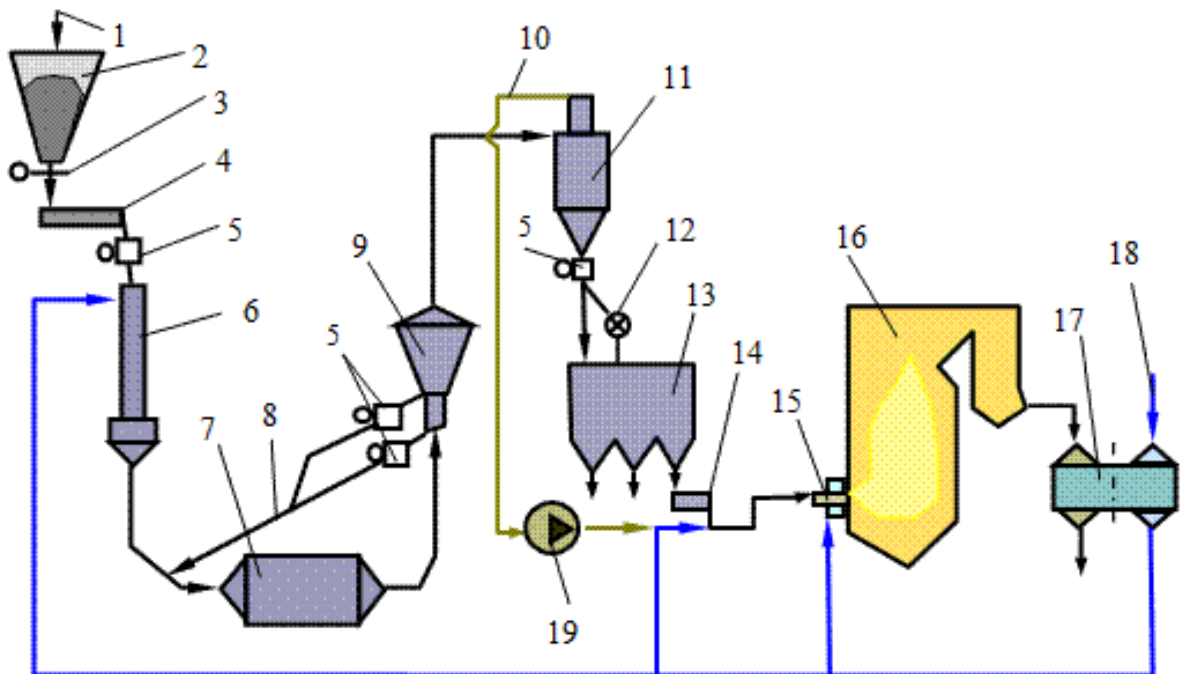


Рисунок 1.1 – Технологическая схема замкнутой системы пылеприготовления с промбункером: 1 – подача топлива из системы топливоприготовления; 2 – бункер сырого топлива; 3 – шибер; 4 – питатели сырого топлива; 5 – клапан-мигалка; 6 – установка нисходящей сушки; 7 – мельница; 8 – возврат крупных частиц топлива в мельницу; 9 – сепаратор; 10 – сушильный агент; 11 – циклон; 12 – шнековый распределитель топлива; 13 – промежуточный бункер пыли; 14 – питатели пыли; 15 – горелки; 16 – котел; 17 – воздухоподогреватель; 18 – подвод воздуха; 19 – мельничный вентилятор

В энергетике применяются различные типы мельниц:  
шаровые барабанные мельницы (ШБМ);  
среднеходные мельницы (СМ);  
молотковые мельницы (ММ);  
мельницы-вентиляторы.

Наибольшее распространение на ТЭС получили индивидуальные замкнутые системы пылеприготовления, среди которых схемы с промежуточным бункером в основном применяются при установке ШБМ [7].

На тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго» установлены 144 молотковых мельницы на 54 котлах суммарной паропроизводительностью 11150 т/ч, 86 шаровых – на 43 котлах суммарной паропроизводительностью 13290 т/ч, 30 мельниц-вентиляторов на 7 котлах суммарной паропроизводительностью 2620 т/ч (рисунки 1.2-1.4). Практически все размалывают бурый уголь Иркутского бассейна.

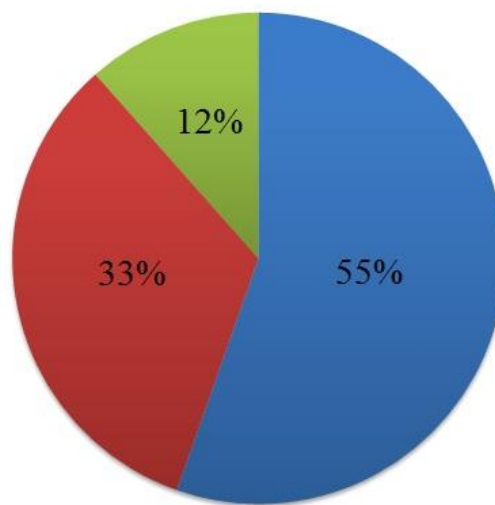


Рисунок 1.2 – Количество углеразмольных мельниц, установленных на ТЭС ПАО «Иркутскэнерго»: ■ – ММ; ■ – ШБМ; ■ – МВ

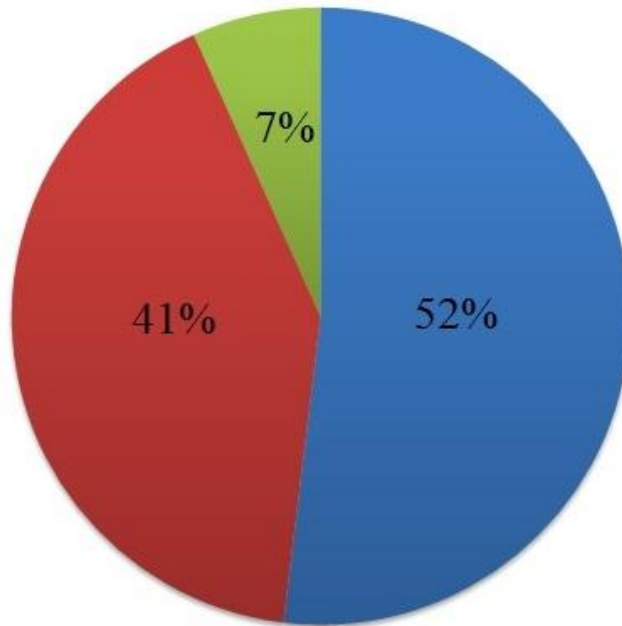


Рисунок 1.3 – Количество котлов, установленных на ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» с разными мельницами: ■ – ММ; ■ – ШБМ; ■ – МВ

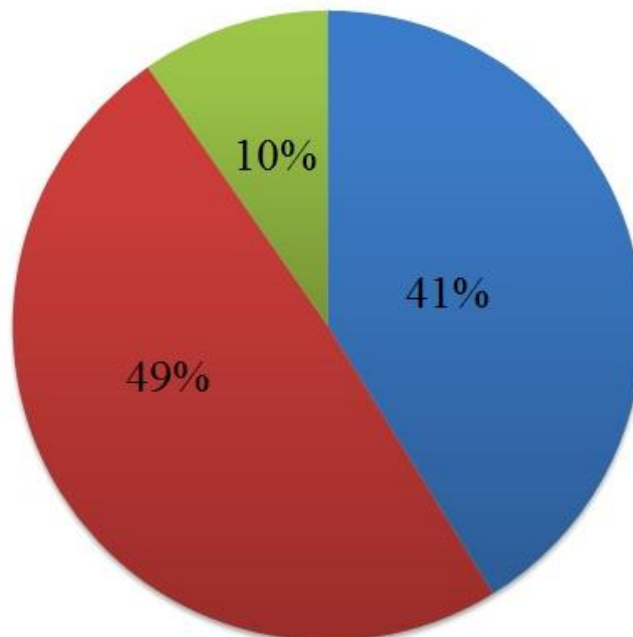


Рисунок 1.4 – Паропроизводительность котлов, установленных на ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» с разными мельницами: ■ – ММ; ■ – ШБМ; ■ – МВ

То есть, хотя и ШБМ не являются самыми многочисленными, но работают на более мощных котлоагрегатах, имеют большую суммарную производительность и расход электроэнергии.

В ШБМ одновременно протекают три процесса:

размол угля;  
сушка угля;  
аэродинамическая сепарация угольной пыли.

Параметры, определяющие протекание этих процессов, можно распределить по следующим группам:

конструктивные параметры (размеры ШБМ, частота вращения, форма брони и т.п.);

режимные параметры, определяющие качество и эффективность процессов (степень заполнения ШБМ шарами, вентиляция ШБМ, производительность ШБМ по угольной пыли заданного качества);

внешние факторы (исходная влажность угля, температура сушильного агента, твердость угля, присосы воздуха и т.д.)

Наличие большого количества переменных затрудняет оптимизацию удельных затрат энергии на пылеприготовление. Даже для идентичных ШБМ и одинаковых углей каждая ШБМ имеет индивидуальную точку оптимального режима работы [7]. Следует отметить, что наибольшее влияние оказывают режимные параметры. Управляя этими параметрами, можно компенсировать случайные вариации внешних факторов, но утверждать, что полученный режим является оптимальным, невозможно без дополнительных исследований.

Эффективным способом стабилизации внешних факторов является модернизация конструктивных элементов установки:

по предварительной сушке топлива;  
уплотнения течек угля и горловин мельницы;  
подогрева сушильного агента.

Очевидно, что эти мероприятия повышают сушильную производительность мельницы. Поэтому можно заключить, что увеличение сушильной производительности приводит к росту размольной производительности мельницы, которое, в свою очередь, влияет на эффективность работы ШБМ.

В [13, 14] показано, что этим соответствием можно управлять за счет изменения размольной производительности при изменении шаровой загрузки мельни-

цы. Ещё один способ управления размольной производительностью основан на формировании заданного гранулометрического состава пыли. Математическая модель этого процесса разработана группой Шувалова С.И. [15, 16].

Из этого следует вывод, что при использовании ШБМ для размола влажных углей сушильная производительность ограничивает размольную производительность ШБМ. Поэтому для анализа эффективности работы ШБМ необходимо определять реальную размольную производительность из уравнений теплового баланса сушки угля. Сушильная производительность зависит от расхода сушильного агента через мельницу, следовательно, необходимо исследование газодинамики и пневмотранспорта угольной пыли.

## 1.2. Обзор результатов исследований энергоэффективности пылесистем

Показателем эффективности пылесистемы с ШБМ является производительность ШБМ, зависящая от комплекса конструктивных и режимных параметров. Особенностью ШБМ является зависимость потребляемой ими мощности от количества загруженных шаров, подача топлива в мельницы этого типа мало сказывается на потребляемой мощности [45].

В работе [6] обобщен опыт испытаний пылесистем, даны методические рекомендации по анализу их результатов, отмечено существование оптимальных режимов вентиляции и загрузки шарами мельниц типа ШБМ, а также оптимальной тонкости помола пыли при минимуме расхода электроэнергии на пылеприготовление (рисунок 1.5).

В [46] предлагается новый подход к определению тонкости помола, суть которого заключается в том, что кроме влияния выхода летучих  $V^d$  на надежное воспламенение топлива предлагается учитывать их теплоту сгорания  $Q_l$ , что определяет реакционность топлива, выраженную в виде произведения  $V^d Q_l$ , а также внутреннюю поверхность угольных частиц.



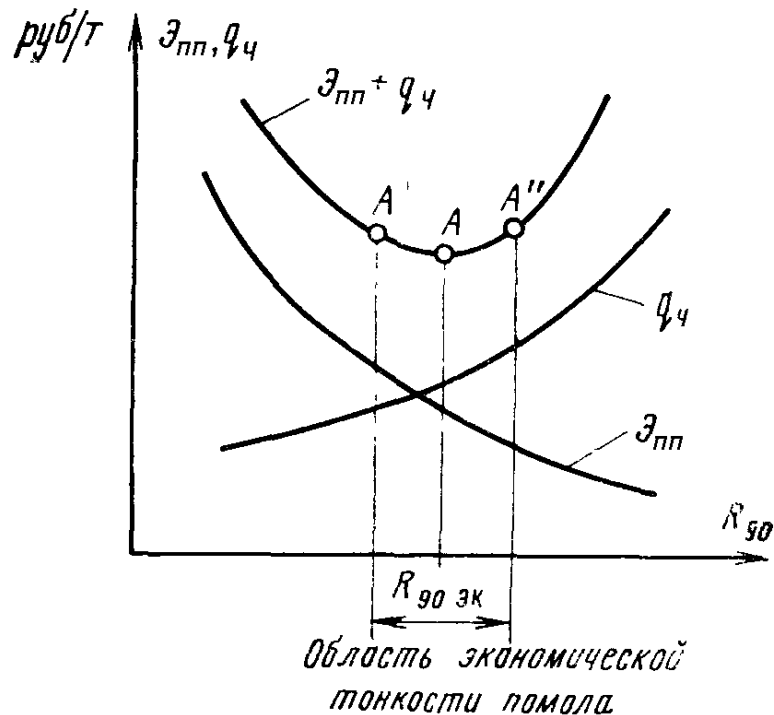


Рисунок 1.5 – Экономическая тонкость помола

В работах Голышева Л.В. и соавторов [12-14] рассматривается повышение эффективности работы систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами: сделан вывод, что режимы размола угля в ШБМ могут быть эффективными только при условии соответствия сушильной и размольной производительностей или превышения сушильной производительности над размольной [12]; предложены методы определения шаровой загрузки с учетом брони [13] и производительности мельницы по мощности, потребляемой электродвигателем ШБМ [14].

Исследования Назмеева Ю.Г. и Мингалеевой Г.Р. [8-10] посвящены комплексной методике оценки термодинамической эффективности систем подготовки твердого топлива на тепловых электростанциях и котельных основе тепловых и эксергетических КПД.

В работе [47] изучено увеличение производительности пылесистем с центробежными сепараторами с помощью схемы провеивания возврата, предполагающей установку внутренней ступени сепарации.

Исследования [48, 49] посвящены закономерностям и принципу минимальных затрат энергии при пневмотранспорте и распределении мелкодисперсной пыли пылесистемах с прямым вдуванием и анализу эффективности сепаратора мельницы при его работе в замкнутом цикле.

Стоит также отметить, что ШБМ используются для измельчения руд и цемента. Эффективность таких мельниц исследовалась в [50-52]: выявлены закономерности измельчения, проведены оценки энергозатрат, определены оптимальные режимы работы, определена корреляционная зависимость между мощностью, потребляемой мелющей средой, и коэффициентом заполнения барабана мельницы.

В зарубежной практике для размолва каменных углей наибольшее распространение получили среднеходные мельницы, а для размолва влажных бурых углей и лигнитов – мельницы-вентиляторы [4, 6]. Вследствие этого исследований, посвященных повышению энергоэффективности ШБМ, немного. В работах зарубежных авторов рассматривается эффективность измельчения с точки зрения различных подходов ее оценки [53], анализируется распределение энергии размолва в ШБМ [54], исследуется влияние новых конструкций барабана [55] и добавок разных материалов [56] на эффективность шаровых мельниц.

Повышение энергоэффективности систем пылеприготовления главным образом связано со снижением удельного расхода электроэнергии на пылеприготовление  $\mathcal{E}_{nm}$ , который складывается из удельных энерготзатрат на размол топлива  $\mathcal{E}_p$  и на его пневмотранспорт  $\mathcal{E}_{nm}$ :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_{nm} = \frac{N_{\delta}}{B} + \frac{N_{MB}}{B},$$

где  $N_{\delta}$  – мощность, потребляемая мельницей;  $N_{MB}$  – мощность, потребляемая мельничным вентилятором;  $B$  – производительность мельницы.

В [24] при проектировании ШБМ для расчета  $N_{\delta}$  используется эмпирическая формула, выражающая зависимость от конструктивных и режимных параметров мельницы.

Мощность, потребляемая мельничным вентилятором на пневмотранспорт в мельнице, в свою очередь зависит от расхода воздуха  $V_в$  и сопротивления пылесистемы  $\Delta p$

$$N_{nm} = \frac{(1 + \mu)V_в \Delta p}{\eta_{эл} \eta_{ме}}$$

где  $\mu$  – пылесодержание потока воздуха;  $\eta_{ме}$  – КПД мельничного вентилятора.

Сопротивление элементов оборудования пылесистем на незапыленном газе хорошо изучено. В то же время в вопросе учета концентрации пыли имеется много неясностей. Большинство экспериментальных исследований течений двухфазных дисперсных сред проводилось в трубопроводах малых диаметров [25, 26, 57-66]. Процессы переноса в газодисперсных потоках в реальных объектах энергетики, в частности, транспорт угольной пыли в СПП, недостаточно подробно изучены.

В нормативной литературе [23] расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов приведены по антрациту, полуантрациту и каменным углям. Ряд современных ТЭС России вынуждены переходить на непроектные низкокачественные бурые угли [67], что требует новых исследований и данных, в том числе в области аэродинамики пневмотранспорта угольной пыли, влияющей на надежность и экономичность СПП, котельного агрегата и ТЭС в целом.

Аэродинамическое сопротивление элементов оборудования систем пылеприготовления котельных агрегатов обычно определяется уравнением [6, 24, 26, 68]:

$$\Delta p = \xi(1 + K\mu) \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1.14)$$

где  $\xi$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $K$  – экспериментальный коэффициент Гастерштадта, отражающий влияние на сопротивление массовой концентрации  $\mu$  пыли в газе.

В работах [69-72] подтверждается линейная зависимость сопротивления от концентрации пыли и в основу обработки опытных данных закладывается зависимость типа (1.14). Также было получено, что коэффициент  $K$  зависит от скорости транспортирующего газа, размеров и свойств твердых частиц, состояния поверхности и диаметра трубы. На основании опытов по пневмотранспорту зерна, продуктов его размолла, песка и свинцовой дроби коэффициент Гастерштадта описывается зависимостью

$$K = 1,9 \cdot 10^{-2} \left( \frac{D}{d_u} \right)^{1,23} \text{Re}_{\text{sum}}^{0,92} \text{Re}^{-0,65},$$

где  $D$  – диаметр трубы, м;  $d_u$  – диаметр твердых частиц, м;  $\text{Re}_{\text{sum}} = w_{\text{sum}} d_u / \nu_g$  – критерий Рейнольдса для частицы, где в качестве характерной скорости выбирается скорость витания;  $\nu_g$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса для транспортирующего газа (воздуха).

В нормативной литературе [24]  $K = 0,6-3$  в зависимости от конструктивного типа элемента пылесистемы. При испытаниях систем пылеприготовления реальные значения коэффициента Гастерштадта имели значения на уровне 5-10 [6]. «Анализ значений коэффициента  $K$  при эксплуатации реальных установок может способствовать выявлению резервов в снижении аэродинамического сопротивления различных элементов и пылесистемы в целом, а также в борьбе с отложениями пыли».

### 1.3. Обзор работ по моделированию пневмотранспорта

Одним из важнейших направлений современной науки является проблема транспорта многофазных (гетерогенных, неоднородных) сред и процессов, его сопровождающих [26]. Исследования динамики многофазных систем охватывают очень многие отрасли науки и техники. Большое значение имеет знание закономерностей гидродинамики дисперсных сред не только для таких традиционных отраслей промышленности, как химическая, металлургическая, энергетическая и

пищевая, но и для расчета различных конструктивных элементов в объектах новой техники и оптимизации работы действующего оборудования.

Теоретическому и экспериментальному исследованию многофазных дисперсных турбулентных течений посвящены книги Вараксина [17], Соу [18], Уоллиса [19], Нигматулина [20], Зайчика и Алипченкова [21], Сукомела и др. [26], Шрайбера и др. [73], Zhou [74], Волкова и др. [75], Gorbis & Spokoyny [76], Crowe et al. [77] и обзоры Eaton & Fessler [78], Elghobashi [79], McLaughlin [80], Crowe et al. [81], Simonin [82], Зайчика и Першукова [83], Loth [84], Sommerfeld [85], Mashayek & Pandya [86].

Наиболее изучены следующие виды дисперсных смесей:

суспензии – смеси жидкости и твердых частиц;

эмульсии – смеси жидкости и капли другой жидкости;

пузырьковые среды – смеси жидкости и пузырьки газа или пара;

газовзвеси или аэровзвеси – смеси газа и твердых частиц или жидких капель; иногда смеси газа и жидких капель называют аэрозолями.

Пневматический транспорт угольной пыли представляет собой движение небольших тяжелых частиц в турбулентном потоке. При пневмотранспорте пылевидных (дробленых) материалов требуется обеспечить скорости несущей фазы (воздуха), исключающие выпадение из пылегазового потока твердой фазы.

Скорость газа  $w$ , соответствующая равновесию между давлением газового потока и силой тяжести, носит название скорости парения или витания тела  $w_{вит}$ . Эта скорость зависит от размеров и формы частицы.

Принцип пневматической транспортировки для вертикального подъемного движения показан на рисунке 1.6.

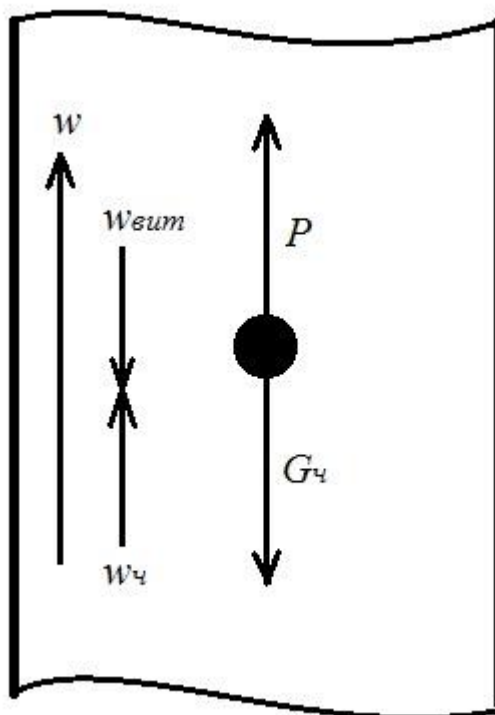


Рисунок 1.6 – Баланс сил, действующих на частицу при вертикальном пневмотранспорте

В горизонтальной трубе связи намного более сложные, так как основное направление движения текучего потока перпендикулярно силе тяжести, действующей на твердые частицы.

Уточнение скоростей в элементах оборудования систем пылеприготовления, связанных с тонкостью и концентрацией пыли, плотностью и вязкостью газа, а также плотностью топлива, является актуальной технико-экономической задачей.

При исследовании движения многофазных систем обычно применяют два подхода:

1. Изучение динамики одиночных частиц с последующим обобщением их характеристик, как это делается в молекулярно-кинетической теории.
2. Учет частиц в уравнениях механики однофазной сплошной среды.

Динамические характеристики одиночных частиц (твердых частиц, жидких капель или пузырьков газа) достаточно подробно исследованы, как правило, с помощью методов механики одиночной частицы [18, 87-90].

На данный момент существуют два основных метода описания двухфазных дисперсных турбулентных течений: лагранжево-траекторный и эйлеров континуальный [18]. Континуальный статистический метод на основе функций распределения в фазовом пространстве нашел применение и для развития теории дисперсных турбулентных течений в работах В.И. Кляцкина [91], Т. Эльперина [92], M.W. Reeks [93], K.E. Hyland [94], D.C. Swailes [95], J. Pozorski [96], J.-P. Minier [97], R.V.R Pandya & F. Mashayek [98], L.X. Zhou [99], O. Simonin [100], Л.И. Зайчика и В.М. Алипчекова [101], И.В. Деревича [102]. Pialat et al. [103] предложили объединенный лагранжево-эйлеров метод, сочетающий детальность лагранжева и эффективность эйлерова подходов к описанию дисперсной среды. Применяя предложенную модель, можно получить детальную информацию о движении отдельных частиц, проинтегрировав уравнения движения (теплообмена) частиц в известном поле скоростей (температур) несущего газа. Систематизация гетерогенных потоков по различным аспектам проводилась в работах [104-111]. Но потребность в более подробной классификации такого рода течений чрезвычайно велика.

В теории гомогенного течения определяются средневзвешенные свойства (скорость, термодинамические и переносные свойства), и смесь рассматривается как некоторый квазиконтинуум, который описывается уравнениями однофазной среды. При этом могут использоваться все обычные методы гидромеханики. Определение соответствующих свойств очень часто следует начинать с более сложных уравнений и приведения их к виду уравнений однофазного потока.

Смесь двух и более фаз называется равновесной, если температуры  $T_1$  и  $T_2$ , давления  $p_1$  и  $p_2$ , скорости фаз  $v_1$  и  $v_2$  совпадают между собой [18-20]

$$\begin{aligned} T_1 &= T_2 = T(x, t), \\ p_1 &= p_2 = p(x, t), \\ v_1 &= v_2 = v(x, t). \end{aligned} \tag{1.1}$$

Покажем на примере двух фаз, что движение равновесной смеси описывается системой уравнений однофазной сплошной среды с некоторым уравнением состояния, определяемого свойствами фаз [18-20]

$$\begin{aligned} p_i &= p_i(\rho_i, T_i), \\ u_i &= u_i(\rho_i, T_i), \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $p_i$  – давление  $i$ -й компоненты;  $\rho_i$  – плотность  $i$ -й компоненты;  $T_i$  – температура  $i$ -й компоненты;  $u_i$  – удельная внутренняя энергия  $i$ -й компоненты;  $i = 1, 2$  – номера компонент смеси.

Пусть  $x_1$  и  $x_2$  определяют текущие массовые концентрации фаз

$$\begin{aligned} x_i &= \rho_i / \rho, \\ x_1 + x_2 &= 1, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\rho$  – плотность смеси.

Объемные концентрации фаз выражаются в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{x_1 \rho_2}{x_2 \rho_1 + x_1 \rho_2}, \\ \alpha_2 &= \frac{x_2 \rho_1}{x_2 \rho_1 + x_1 \rho_2}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

Из условия равновесия между фазами по давлению и температуре, т. е. из (1.1), (1.2) и условия взаимно однозначной зависимости между  $p_i$  и  $\rho_i$  при фиксированной температуре смеси  $T$  можно получить

$$\rho_2 = \varphi(\rho_1, T), \quad (1.5)$$

откуда с учетом (1.4) имеем

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 = \Phi(x_1, \rho_1, T). \quad (1.6)$$

Если разрешить это уравнение относительно  $\rho_1$  и учесть (5), получим

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \psi_1(x_1, \rho, T), \\ \rho_2 &= \psi_2(x_1, \rho, T). \end{aligned}$$

Тогда из (1.1) и (1.2) следуют выражения для уравнений состояний смеси в виде:

$$\begin{aligned} p &= p(x_1, \rho, T), \\ u &= u(x_1, \rho, T). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Таким образом, движение равновесной двухфазной смеси описывается обычными уравнениями однофазной сплошной среды с трехпараметрическими уравнениями состояния (1.7), определяющими давление и внутреннюю энергию



через плотность смеси  $\rho$ , температуру  $T$  и массовую концентрацию  $x_1$ . Для определения последней при наличии фазовых переходов необходимо задавать дополнительное условие фазового равновесия или насыщения, которое для однокомпонентной двухфазной смеси имеет вид:

$$T = T_s(p). \quad (1.8)$$

При нарушении этого условия равновесия необходимо привлекать уравнение кинетики.

Для примера запишем уравнения (1.7) для равновесной смеси калорически совершенного газа (первая фаза) и несжимаемого вещества (вторая фаза):

$$\begin{aligned} p_1 &= \rho_1 R_1 T_1, \\ u_1 &= c_1 T_1, \\ p_2 &= \text{const}, \\ u_2 &= c_2 T_2, \\ T_1 &= T_2 = T, \\ p_1 &= p_2 = p. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Учитывая (1.4), имеем

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 = \frac{\rho_1 \rho_2}{x_2 \rho_1 + x_1 \rho_2},$$

$$\rho_1 = \frac{x_1 \rho_2 \rho}{\rho_2 - (1 - x_1) \rho},$$

и уравнения состояния (1.2) примут вид:

$$p = \rho R(x_1, \rho) T,$$

$$R(x_1, \rho) = R_1 \rho_2 x_1 / (\rho_2 - x_2 \rho) = R_1 x_1 / \alpha_1, \quad (1.10)$$

$$u = c T,$$

$$c = x_1 c_1 + x_2 c_2,$$

где  $R$  – газовая постоянная смеси;  $R_1$  – газовая постоянная 1-й фазы (газа);  $c$  – удельная массовая теплоемкость смеси;  $c_1$  – удельная массовая теплоемкость газа;  $c_2$  – удельная массовая 2-й фазы (несжимаемого вещества).

Из-за зависимости  $R$  от  $\rho$  смесь (1.9) не является совершенным газом.

Для случая газозвеси с малой объемной концентрацией конденсированной фазы

$$\begin{aligned}\alpha_2 &\ll 1, \\ \alpha_1 &\approx 1,\end{aligned}\tag{1.11}$$

уравнения состояния (1.10) примут вид

$$\begin{aligned}p &= \rho RT, \\ R &= x_1 R_1, \\ u &= cT, \\ c &= x_1 c_1 + x_2 c_2.\end{aligned}\tag{1.12}$$

Таким образом, если в равновесной газозвеси с малой объемной концентрацией дисперсной фазы ( $\alpha_2 \ll 1$ ) отсутствуют фазовые переходы ( $x_1 = \text{const}$ ), то такая среда может рассматриваться как калорически совершенный газ ( $R = \text{const}$ ,  $c = \text{const}$ ) с показателем адиабаты

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{c + R}{c} = \frac{x_1(c_1 + R_1) + x_2 c_2}{x_1 c_1 + x_2 c_2}, \\ 1 \leq \gamma &\leq \gamma_1 = \gamma = \frac{c_1 + R_1}{c_1}\end{aligned}$$

и скоростью звука (равновесной)

$$C_e^2 = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{\gamma p}{\rho} = \gamma RT = C_1^2 \frac{x_1 \gamma}{\gamma_1},$$

где  $\gamma_1$  и  $C_1$  – показатель адиабаты и скорость звука в чистом газе. Для определения движения такой смеси можно использовать все результаты и весь аппарат (например, газодинамические функции) классической газовой динамики.

В исследуемых в данной работе системах пылеприготовления скорость звука в пылевоздушной смеси составляет порядка 300 м/с, что во много раз превышает скорость смеси в этих же пылесистемах (10-20 м/с). Следовательно, поток пылевоздушной смеси можно считать несжимаемым.

Рассмотрим другой крайний случай (1.10), когда можно пренебречь массовым содержанием газа ( $x_1 \ll 1$ ) из-за  $\rho_1 \ll \rho_2$ , но объемная концентрация

конденсированной фазы не мала ( $\alpha_2 \gg 1$ ). Этот случай реализуется, в частности, для жидкости с пузырьками газа. При этом

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 = \left(1 + \frac{\alpha_1 \rho_1}{\alpha_2 \rho_2}\right) \alpha_2 \rho_2 \approx \alpha_2 \rho_2,$$

$$\frac{x_1 \rho_1}{\rho_2 - x_2 \rho} = \frac{\alpha_1 \rho_1 \rho_2 / \rho}{\rho_2 - \rho \alpha_2 \rho_2 / \rho} \approx \frac{\rho_1}{\alpha_2 \rho_2},$$

и из (1.10) имеем

$$p = \rho RT,$$

$$R = R_1 \frac{\rho_1}{\alpha_2 \rho_2} \neq \text{const},$$

$$u = cT,$$

$$c \approx c_2. \quad (1.13)$$

Таким образом, равновесная смесь газа с преобладающим массовым содержанием конденсированного вещества не является совершенным газом из-за переменности  $R$ . Равновесная скорость звука в такой смеси должна определяться непосредственно из формулы

$$\frac{1}{c_e^2} = \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s.$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2}$$

при отсутствии фазовых переходов ( $x_1, x_2 = \text{const}$ ) имеем

$$-\frac{1}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s = -\frac{x_1}{\rho_1^2} \left( \frac{\partial \rho_1}{\partial p} \right)_s.$$

Следует иметь в виду, что последняя частная производная берется при постоянной энтропии смеси  $s$ , а не газа  $s_1$ . При этом в силу того, что теплоемкость газовой фазы  $c_1 x_1$  мала по сравнению с теплоемкостью жидкой фазы  $c_2 x_2$  (из-за  $x_1 \ll x_2$ ,  $c_1 \sim c_2$ ), равновесные адиабатические процессы в смеси идут практически при постоянной температуре  $T$ . Действительно, за счет теплоты газа,

выделяющегося при сжатии, температура смеси практически не повысится. Поэтому

$$\left(\frac{\partial \rho_1}{\partial p}\right)_s \approx \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial p}\right)_{T_1} = \frac{1}{R_1 T_1} = \frac{\rho_1}{p},$$

а равновесная скорость звука в смеси равна

$$C_e^2 = \frac{p}{\alpha_1 \alpha_2 \rho_2}$$

и она при не очень малых объемных содержаниях газа  $\alpha_1$  может быть меньше скорости звука в чистом газе, а при уменьшении содержания газа  $\alpha_1 \rightarrow 0$  имеем  $C_e \rightarrow \infty$ . Учет сжимаемости конденсированной (второй) фазы и конечности скорости звука  $C_2$  в ней приводит к тому, что при  $\alpha_1 \rightarrow 0$  величина  $C_e \rightarrow C_2$ .

#### 1.4. Постановка задач работы

Анализ литературы по теме данной диссертации показал, что эффективность работы пылесистем с ШБМ зависит от условий размола топлива и его пневмотранспорта. При этом аэродинамика пневмотранспорта угольной пыли недостаточно изучена. Таким образом, для определения энергоэффективных режимов работы систем пылеприготовления с ШБМ при размоле непроектных углей необходимо решить следующие задачи:

1. Провести численное моделирование течения угольной газозвеси в ШБМ и центробежных сепараторах пыли с целью определения их аэродинамического сопротивления.
2. Получить критериальные уравнения, описывающие основные факторы, влияющие на сопротивление ШБМ и центробежных сепараторов пыли.
3. Исследовать влияние режимных параметров на энергоэффективность ШБМ и определить ее оптимальные режимы работы при размоле непроектных углей.

## **Глава 2. Моделирование течения газозвеси в основных элементах систем пылеприготовления**

### **2.1. Характеристика объекта исследования**

Объектом исследования данной диссертационной работы являются основные установки пылесистемы: шаровые барабанные мельницы (ШК-32 и Ш-16) и центробежные сепараторы типа ТКЗ-ВТИ диаметрами 3,3 и 4,25 м. Шаровая мельница с коническим барабаном ШК-32 Новокраматорского завода тяжелого машиностроения имеет номинальную производительность по АШ 32 т/ч при шаровой загрузке 70 т и скорости вращения барабана 18 об/мин, барабан длиной 5,5 м и эквивалентном диаметром 3,18 м, оборудована центробежным сепаратором типа ТКЗ-ВТИ диаметром 4,25 м. Шаровая мельница с цилиндрическим барабаном Ш-16 Сызранского завода тяжелого машиностроения имеет номинальную производительность по АШ 16 т/ч при шаровой загрузке 35 т и скорости вращения барабана 18,7 об/мин, барабан длиной 4,7 м и диаметром 2,87, оборудована центробежным сепаратором типа ТКЗ-ВТИ диаметром 3,42 м.

Измельчение топлива в шаровой барабанной мельнице (рисунок 2.1) осуществляется падающими шарами, подъем которых происходит благодаря вращению барабана. Полученная пыль в соединении с воздухом, подаваемым в мельницу для сушки и вентиляции, образует газозвесь. После ШБМ угольная газозвесь по пылепроводу попадает в центробежный сепаратор, где из нее выделяются достаточно измельченные частицы пыли, а более крупные возвращаются на повторное измельчение в мельницу.

Центробежный сепаратор (рисунок 2.2) является наиболее распространенным типом сепараторов для шаровых барабанных и среднеходных мельниц, а также молотковых мельниц, рассчитанных на размол каменных углей. Центробежный сепаратор включает две ступени разделения пыли: 1) в пространстве между наружным и внутренним конусами, где благодаря гравитационным силам и умеренным скоростям воздуха (умеренное динамическое давление воздуха) происходит выделение наиболее крупных частиц; 2) во внутреннем конусе при

сходе пылевоздушного потока с лопаток и при повороте его к выходному патрубку, где под действием инерционных сил в возврат выделяются сравнительно мелкие частицы. Регулирование тонкости готовой пыли в центробежном сепараторе осуществляется изменением положения лопаток (створок), установленных на входе во внутренний конус, – при радиальном положении получается наиболее грубая пыль, по мере прикрытия створок (после некоторой зоны нечувствительности) готовая пыль становится более тонкой. Эффективность разделения пыли в сепараторе оказывает непосредственное влияние на производительность пылесистемы и совершенство выжига топлива в котле, причем последний фактор наиболее значим.

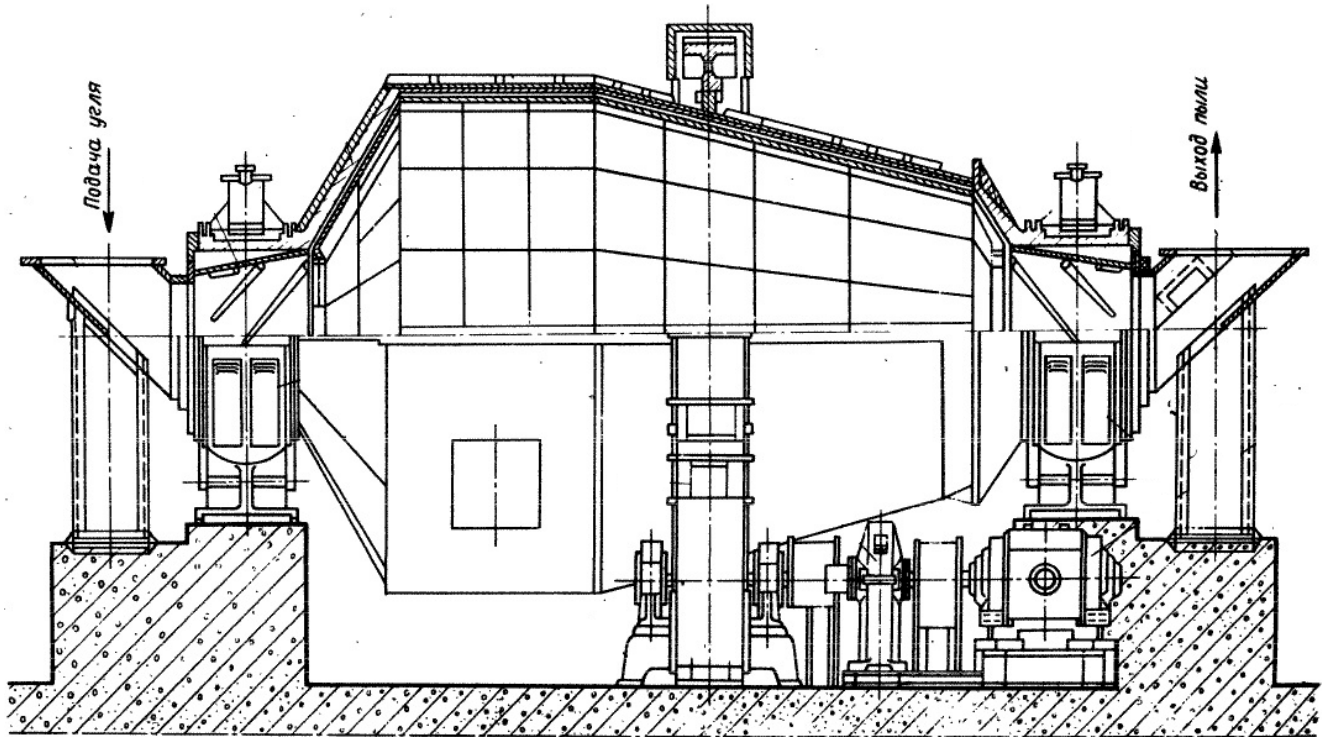


Рисунок 2.1 – Схема ШБМ с биконическим барабаном ШК-32

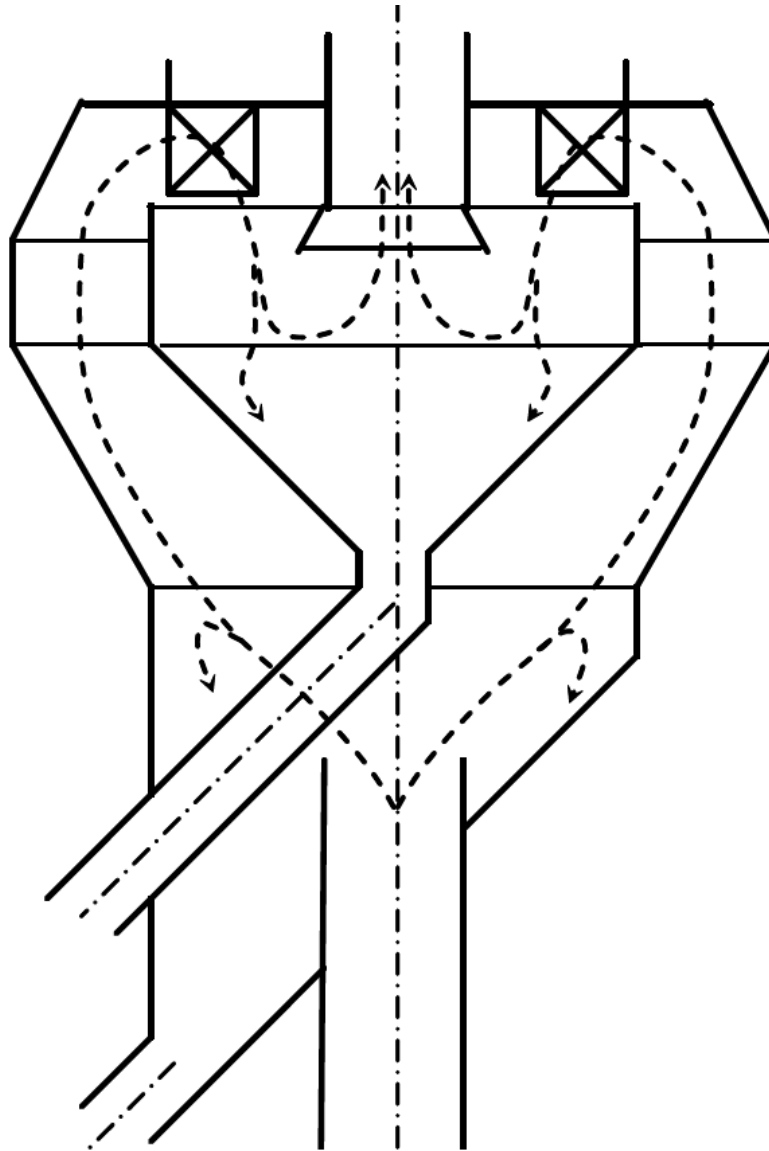


Рисунок 2.2 – Схема центробежного сепаратора ТКЗ-ВТИ

## 2.2. Физико-математическая постановка задачи

В качестве математической модели для описания пневмотранспорта в основных элементах пылесистемы была принята модель несжимаемого гомогенного газа, движение которого считается установившимся, поэтому все уравнения представлены в стационарном виде.

Уравнение движения

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho_m} \nabla p + \vec{f},$$

где  $\vec{v}$  – векторное поле скоростей;  $t$  – время;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\rho_m$  – плотность гомогенной смеси;  $p$  – давление;  $\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$\rho_m vA = \text{const},$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения канала.

При движении газозвеси в каналах различных диаметров одной из важных характеристик является массовая концентрация твердых частиц в потоке газозвеси. Она в значительной мере определяет структуру потока, его взаимодействие со стенками канала и взаимодействие частиц друг с другом

$$\mu = \frac{G_m(1 - \Delta W)}{G_g + G_m \Delta W},$$

где  $G_m$  – массовый расход топлива, кг/с;  $G_g$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $\Delta W$  – доля испаренной влаги.

Другой важной характеристикой газозвеси является объемная доля твердых частиц в потоке несущей фазы (воздуха)

$$\alpha = \mu \frac{\rho_g}{\rho_c},$$

где  $\rho_g$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_c$  – плотность частиц угольной пыли, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность смеси описывалась следующим уравнением:

$$\rho_{см} = (1 - \alpha)\rho_g + \alpha\rho_c.$$

Динамическая вязкость пылевоздушной смеси определялась по формуле Эйнштейна:

$$\eta_{см} = (1 + 5,5\alpha)\eta_g,$$

где  $\eta_g$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $t_g$  – температура воздуха, °С.

Скорость смеси в данной модели равна скорости воздуха  $w_g$

$$w_{см} = w_g.$$



Общая формула Буссинеска для многомерных течений записывается в следующем виде:

$$\tau_{ij}^t = \eta_{eff} \left( \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{w}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k,$$

$$i, j = 1, 2, 3,$$

где  $\eta_{eff}$  – эффективная вязкость;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности.

Эффективная турбулентная вязкость определяется по соотношению

$$\eta_{eff} = \eta + \bar{\rho} w_t l, \quad (2.1)$$

где  $w_t$  – скорость турбулентности,  $l$  – характерный масштаб.

Кинетическая энергия турбулентности  $k$

$$k = \frac{1}{2} (\bar{w}^2 + \bar{u}^2 + \bar{v}^2).$$

Турбулентная скорость

$$w_t = \sqrt{\frac{2}{3} k}. \quad (2.2)$$

Масштаб турбулентности

$$l \approx \frac{k^{1.5}}{\varepsilon}, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии турбулентности.

Подставляя (2.2) и (2.3) в (2.1), получаем:

$$\eta_{eff} = \eta + C_\eta \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

где  $C_\eta$  – эмпирическая константа.

На основании обзора литературных данных [112-133] для расчета пневмотранспорта газозвеси в пылесистеме была выбрана к-ε-модель турбулентности, как наименее затратная и достаточно точная.

Основываясь на работах [25, 26], сделаем предположение, что общее аэродинамическое сопротивление газозвеси при движении в канале складывается из нескольких составляющих

$$\Delta p = \Delta p_{\text{гом}} + \Delta p_{\text{инж}},$$

где  $\Delta p_{\text{гом}}$  – динамические потери сопротивления гомогенного потока газозвеси, обусловленные трением и местными потерями;  $\Delta p_{\text{инж}}$  – потери сопротивления, обусловленные инжекцией частиц в несущий поток.

### 2.3. Описание инструмента моделирования

На кафедре теплоэнергетики Иркутского национального исследовательского технического университета для моделирования задач теплоэнергетики используется пакет прикладных программ (ППП) FlowVision, разработанный инженеринговой компанией ТЕСИС и предназначенный для численного моделирования трехмерных ламинарных и турбулентных, стационарных и нестационарных течений жидкости и газа. Многочисленные модели позволяют моделировать сложные течения, сопровождаемые закруткой потока, движением свободных/контактных поверхностей, ударными волнами, сопряженным теплообменом, горением и т. д. Базовыми в ППП FlowVision являются уравнения Навье-Стокса (вместе с уравнением неразрывности).

Во FlowVision имеются следующие типы граничных условий (шаблоны):

стенка – условия на границах твердое тело-жидкость, твердое тело-газ, твердое тело-твердое тело;

симметрия – граничные условия на плоскости симметрии; также могут быть заданы на твердой поверхности, для которой реализуются условия непротекания и проскальзывания для переменной Скорость (для остальных переменных устанавливаются условия Нулевой градиент);

вход/выход – условия на границе, задающие конвективный поток через поверхность указанием скорости течения или давления (полного давления);

свободный выход – задает поверхность, через которую поток выходит из расчетной области (и допускается втекание среды в расчетную область);

неотражающее – условия на границе, предполагающие, что уравнения относительно всех переменных на границе принимают вид волнового уравнения;

связанное – условия, ставящиеся при расчете физического процесса, общего для двух подобластей, разделяемых границей. Связанные граничные условия (граничные связи) бывают следующих видов: полное сопряжение, сопряженный теплообмен, периодическая поверхность, скользящая поверхность.

В ППП FlowVision препроцессор, блок расчета уравнений и постпроцессор объединены и работают одновременно.

Комплекс FlowVision используют такие предприятия, как РКК «Энергия», ЦНИИМАШ, ММПП «САЛЮТ», НИКИЭТ, ОКБМ им. Африкантова, КБ «Южное», ОАО АК им. С.В. Илюшина, Арзамасский приборостроительный завод, ОАО «Вымпел», ТАНТК им. Бериева и другие [134-136].

#### **2.4. Исходные данные для расчета**

На начальном этапе моделирования была построена трехмерная модель расчетной области, представляющая собой проточную часть ШБМ (рисунок 2.3), в системе автоматизированного моделирования Компас 3D на основе схемы ШК-32 (рисунок 2.1). Построение проходило с учетом шаров таким образом, что от действительного диаметра барабана мельницы вычиталась высота засыпки шаров, и по полученному эквивалентному диаметру строилась трехмерная модель. Затем наносилась волнообразная броня.

Трехмерная модель расчетной области, представляющей собой проточную часть центробежного сепаратора пыли (рисунок 2.4), была построена также в системе автоматизированного моделирования Компас 3D на основе чертежа (рисунок 2.2).

Далее модель загружалась в ППП FlowVision, задавались параметры задачи и строилась расчетная сетка. Для данной области были заданы стандартная  $k-\epsilon$  модель турбулентной несжимаемой жидкости и вращение для барабанов мельниц.

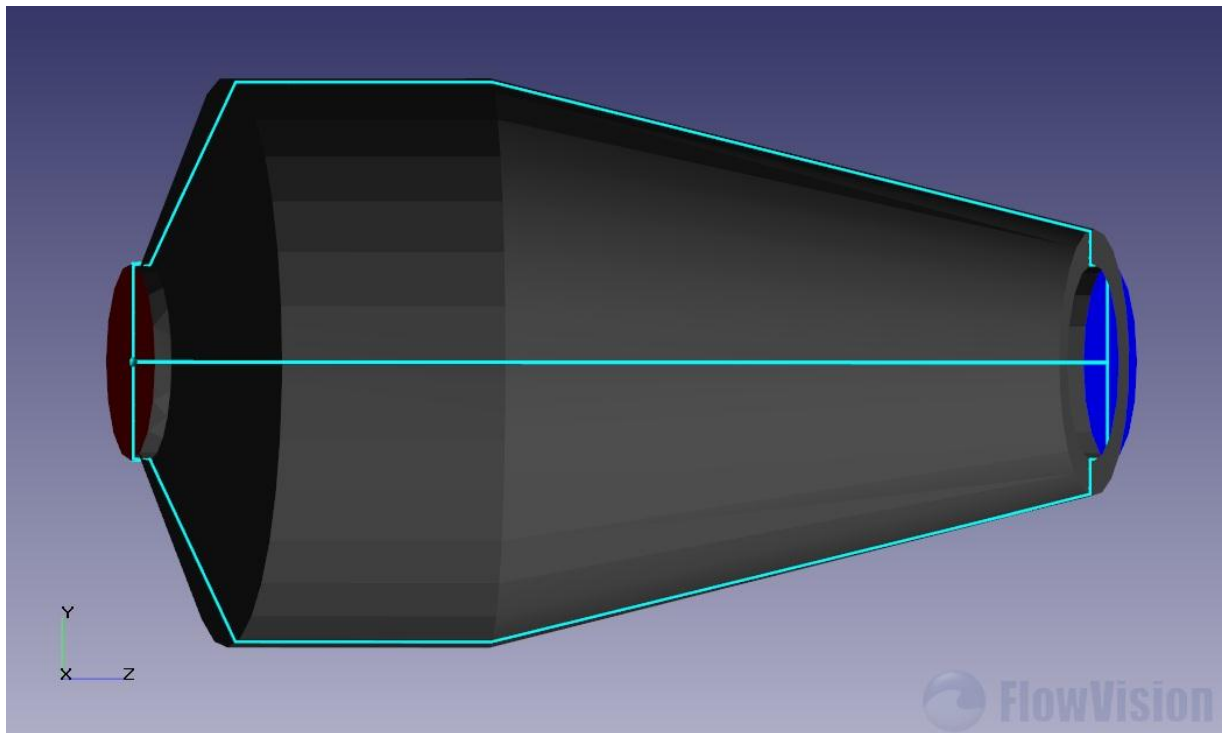


Рисунок 2.3 – Трехмерная модель мельницы ШК-32

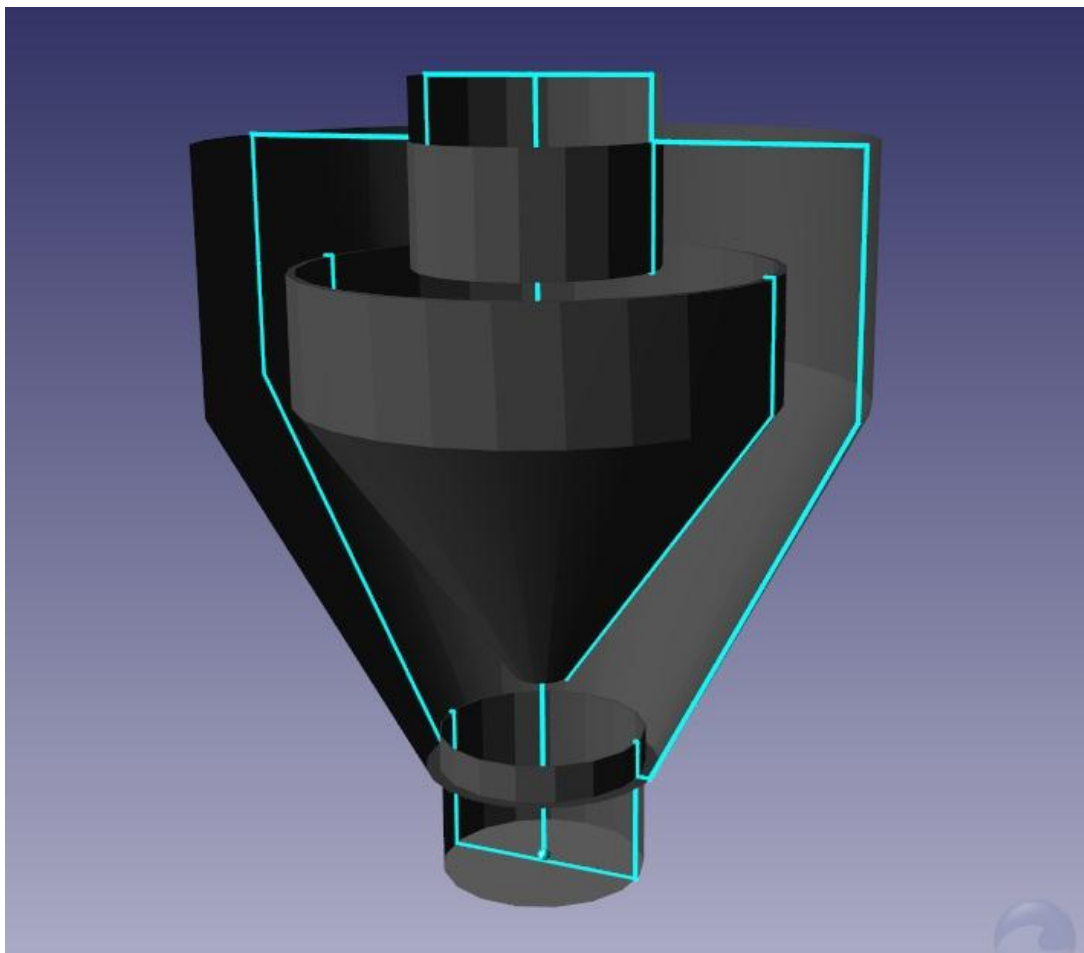


Рисунок 2.4 – Трехмерная модель сепаратора

Расчетная сетка FlowVision – декартова, локально адаптивная. Начальная сетка состоит из прямоугольных ячеек. Вблизи границы расчетной области происходит булево вычитание нерасчетных объемов из прямоугольных ячеек, в результате которого образуются ячейки-многогранники произвольной формы. Никакого упрощения приграничных ячеек не производится. Генерация сетки полностью автоматизирована. По результатам исследований установлено, что расчетная сетка с  $2,27 \cdot 10^5$  ячейками является оптимальной для решения поставленной задачи.

На рисунке 2.5 показана расчетная сетка FlowVision для модели мельницы ШК-32.

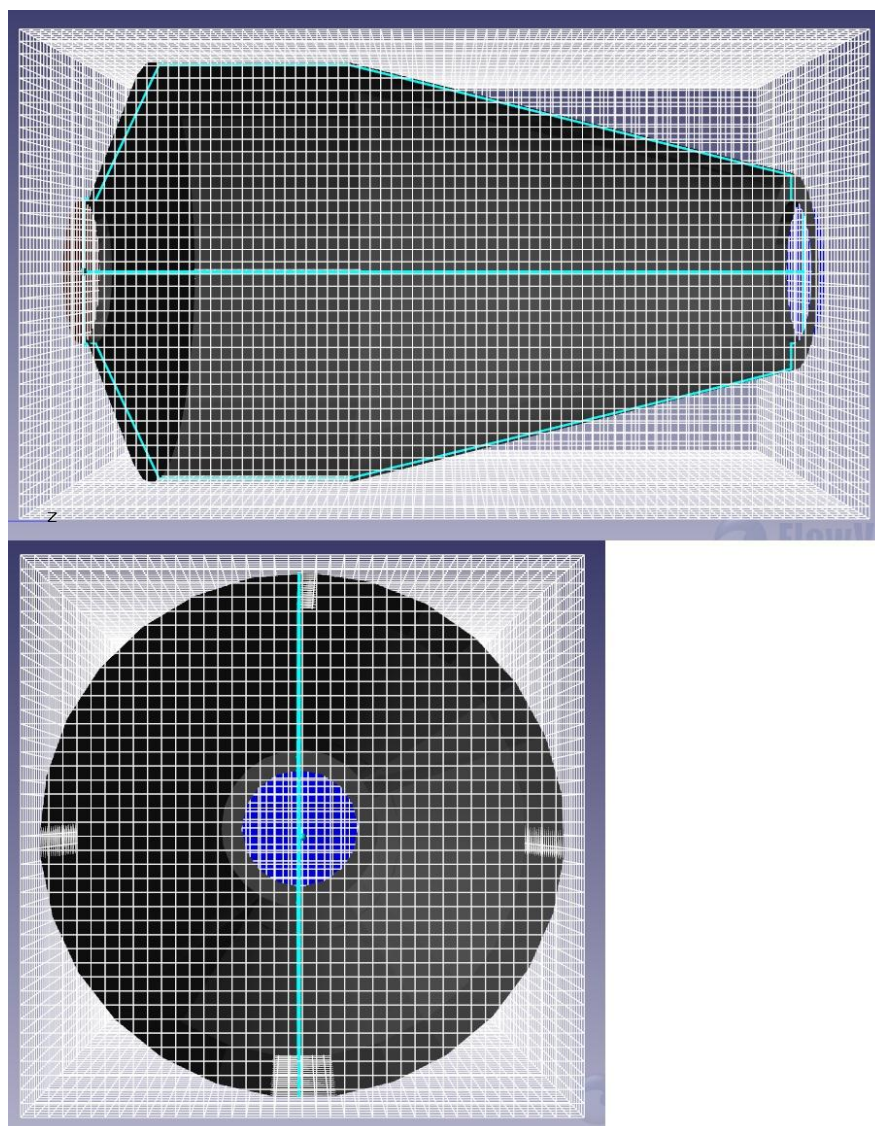


Рисунок 2.5 – Расчетная сетка FlowVision для модели мельницы ШК-32

## 2.5. Численный эксперимент. Обработка результатов

Численный эксперимент проводился с целью определения аэродинамического сопротивления шаровых мельниц и сепараторов при течении гомогенного потока газозвеси. Условия проведения и результаты экспериментов представлены в таблицах Г1-Г4 Приложения Г.

На рисунках 2.6-2.9 представлены некоторые примеры результатов расчетов течения гомогенного потока угольной газозвеси при различных значениях массовой расходной концентрации пыли  $\mu$  и скорости смеси в барабане мельницы  $w_{см}$ .

Полученные в результате численного эксперимента данные по сопротивлению мельницы  $\Delta P_{мод}$  обрабатывались так, чтобы получить зависимость от критерия Рейнольдса

$$Re_{см} = 4G_{см}/(\pi D \eta_{см}) = (1 + \mu)Re_{г} / (1 + 5,5\alpha) \approx (1 + \mu)Re_{г},$$

где  $G_{см} = G_{г} + G_{ч}$ ;  $G_{г}$ ,  $G_{ч}$  – массовые расходы смеси, воздуха и пыли на выходе из ШБМ, соответственно, кг/с;  $D$  – эффективный диаметр барабана мельницы, м;  $\mu = G_{ч}/G_{г}$  – массовая концентрация пыли в воздухе;  $Re_{г} = 4G_{г}/(\pi D \eta_{г})$  – критерий Рейнольдса по воздуху;  $\alpha = \mu \rho_{г}/\rho_{ч}$  – объемная доля частиц в воздухе.

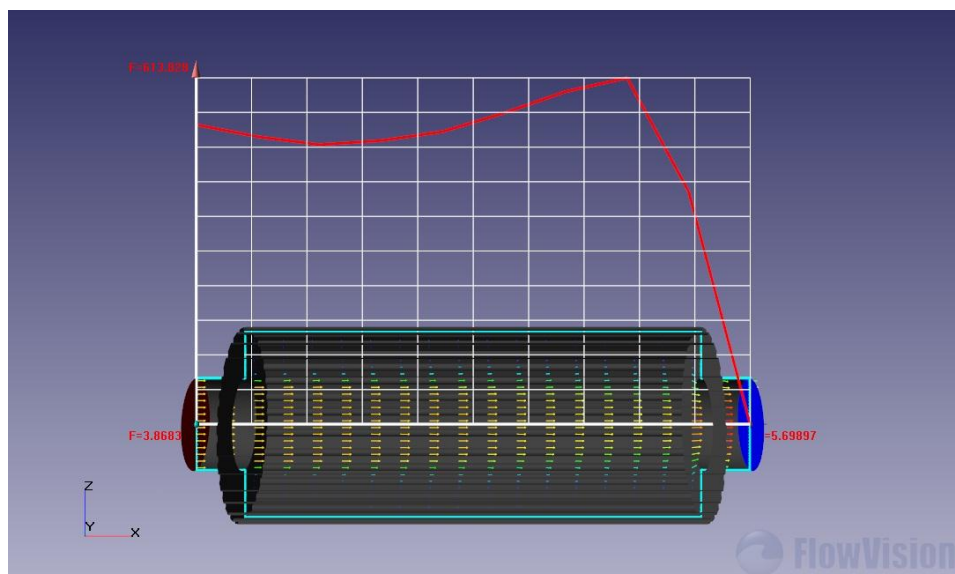


Рисунок 2.6 – Перепад давления и векторное поле скоростей в мельнице Ш-16 при  $\mu = 0,354$  и  $w_{см} = 3,66$  м/с

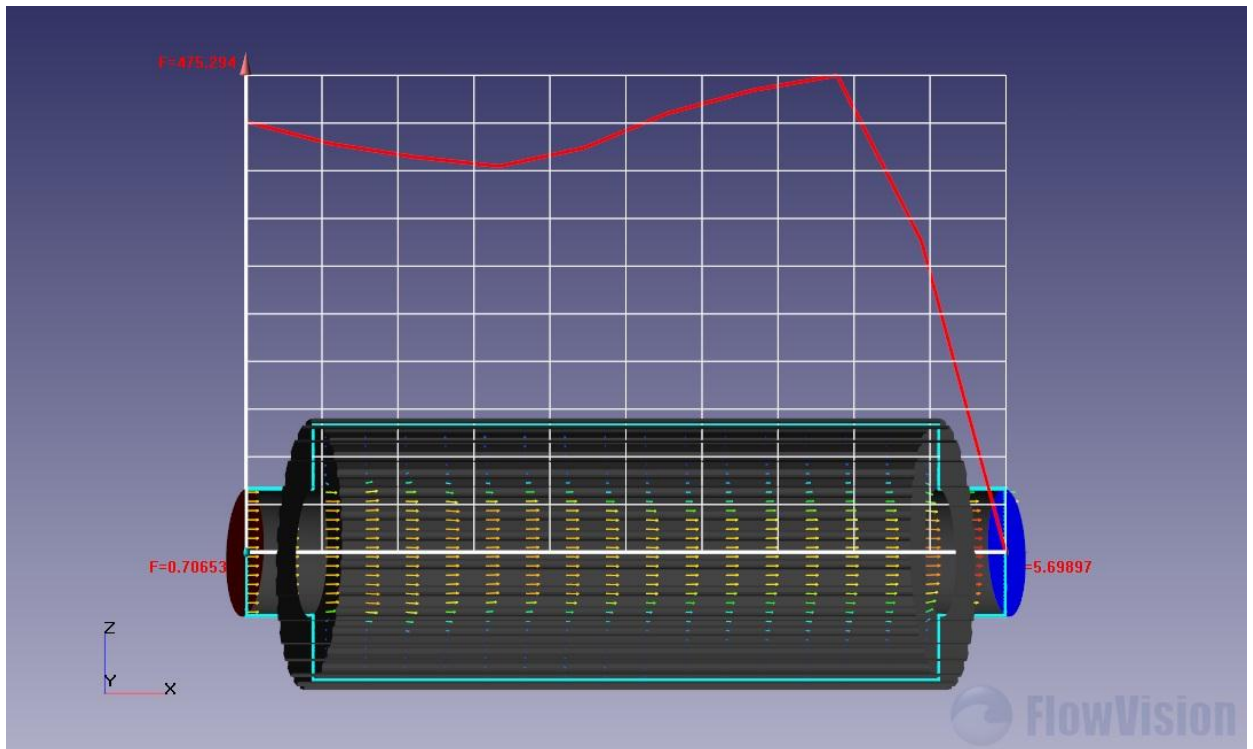


Рисунок 2.7 – Перепад давления и векторное поле скоростей в мельнице Ш-16 при  $\mu = 0,356$  и  $w_{cm} = 3,76$  м/с

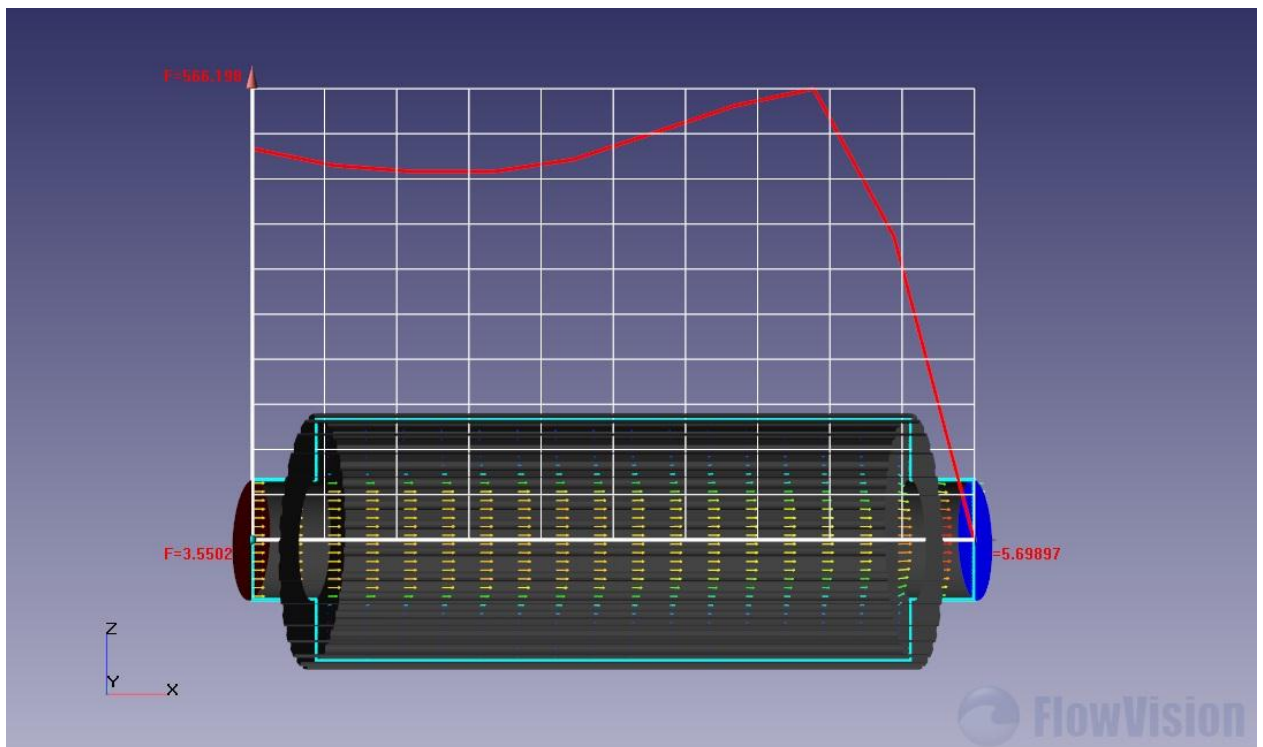


Рисунок 2.8 – Перепад давления и векторное поле скоростей в мельнице Ш-16 при  $\mu = 0,434$  и  $w_{cm} = 3,49$  м/с



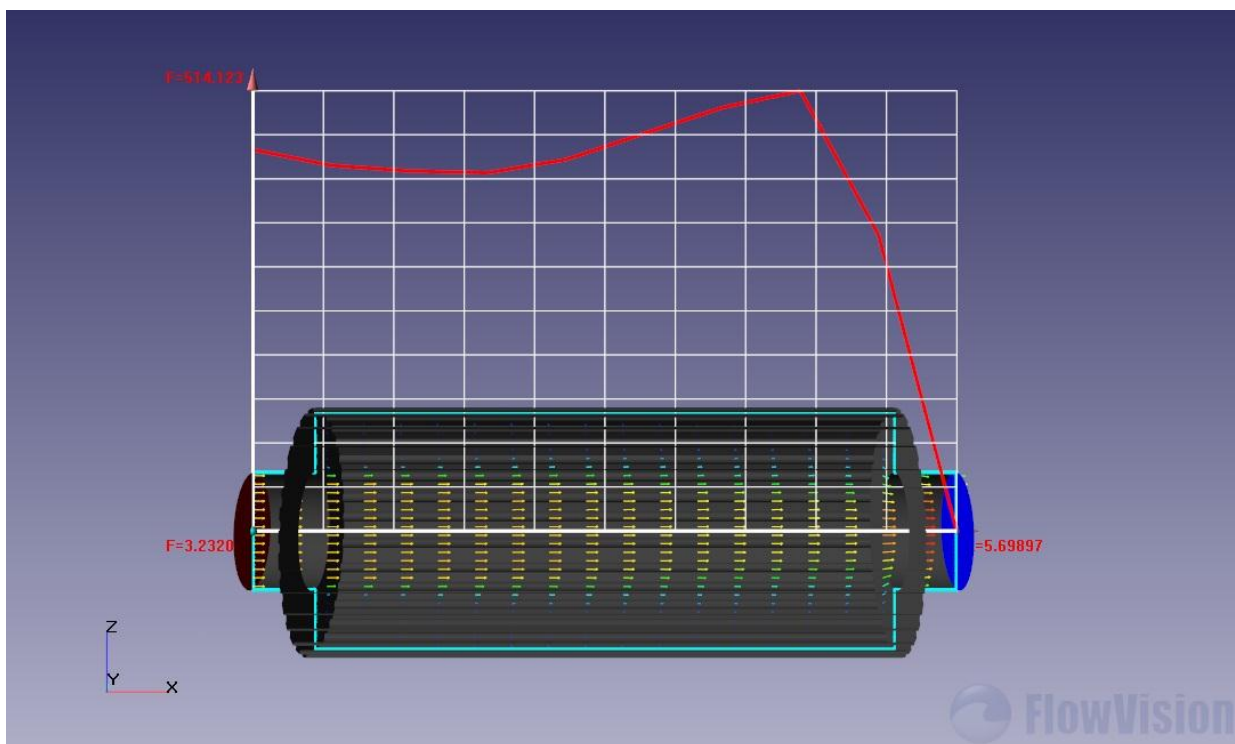


Рисунок 2.9 – Перепад давления и векторное поле скоростей в мельнице Ш-16 при  $\mu = 0,567$  и  $w_{см} = 3,51$  м/с

Данная зависимость представлена на рисунке 2.10 и имеет следующий функциональный вид:

$$\ln\left(\frac{\xi_{гом}}{k_L}\right) = 7,09 - 0,4 \ln \text{Re}_{см}, \quad (2.4)$$

где  $\xi_{гом} = \Delta P_{гом} / \Delta P_{см}$  – коэффициент сопротивления гомогенной смеси;  $k_L = \frac{L}{D}$  – коэффициент, учитывающий влияние линейных размеров барабана мельницы;  $\Delta P_{гом}$  – сопротивление ШБМ, смоделированное с помощью ППП FlowVision, Па;  $\Delta P_{см} = \rho_{см} w_{см}^2 / 2 = (1 + \mu) \rho_e w_e^2 / 2$  – динамическое давления потока смеси, Па;  $w_{см} = 4G_{см} / \pi D \rho_{см}$  – скорость гомогенной пылегазовой смеси, м/с;  $L$  – длина барабана мельницы, м.

В качестве определяющей температуры при расчете теплофизических параметров воздуха использовалась средняя температура  $t_m = 0,5(t_{гв} + t_2)$ , где  $t_{гв}$  – температура горячего воздуха на входе в ШБМ;  $t_2$  – температура воздуха на выходе из ШБМ.



Потери давления гомогенного потока пылегазовой смеси в ШБМ, определяемые из уравнения (2.4), равны

$$\xi_{\text{гом}} = \frac{\Delta P_{\text{гом}}}{\Delta P_{\text{г}}} = 1200 \frac{(1 + \mu)^{0,6}}{\text{Re}_{\text{г}}^{0,4}} k_L, \quad (2.5)$$

где  $\Delta P_{\text{г}} = \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2}$  – динамическое давления потока воздуха, Па;  $w_{\text{г}} = 4G_{\text{г}} / (\pi D \rho_{\text{г}})$  – скорость воздуха, м/с.

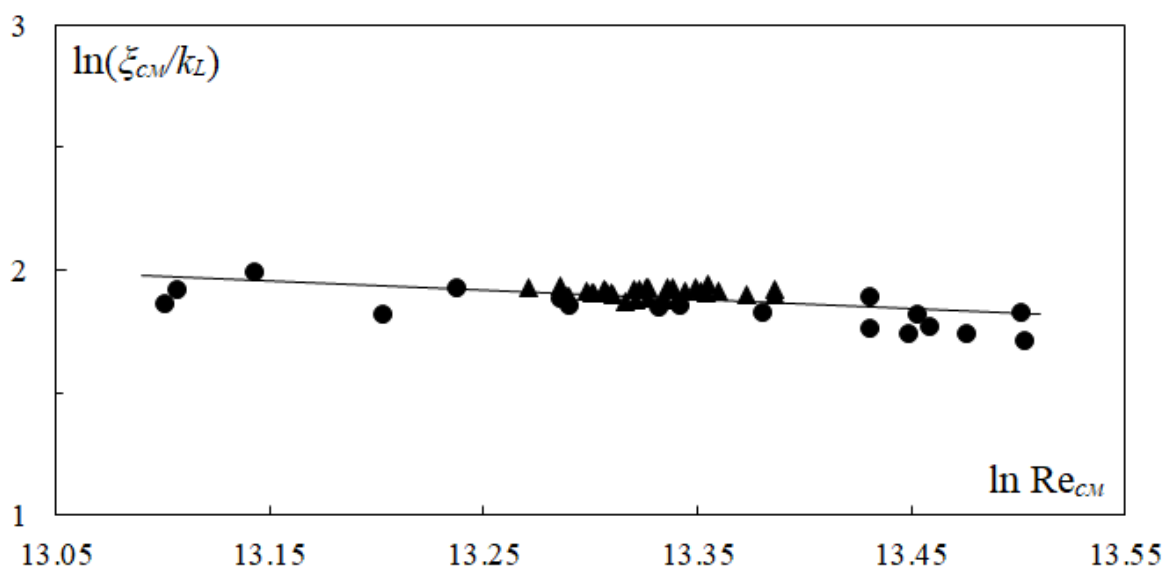


Рисунок 2.10 – Зависимость потерь давления гомогенного потока пылегазовой смеси от критерия Рейнольдса: ● – ШК-32; ▲ – Ш-16; сплошная линия – аппроксимация (2.4)

Среднее отклонение смоделированных данных от аппроксимирующей зависимости (2.5) составляет приблизительно 10%.

В результате численного эксперимента также были получены данные по перепаду давлений от входа до выхода сепаратора (потери сопротивления гомогенного потока смеси  $\Delta P_{\text{гом}}$ , рисунки 2.11-2.13, таблицы Г3-Г4 Приложения Г).

Полученные данные моделирования течения угольной газозвеси в сепараторах  $\Delta P_{\text{гом}}^{ce}$  были также обработаны, чтобы выявить их зависимость от критерия Рейнольдса  $\text{Re}_{\text{см}}^{ce}$ . Данная зависимость показана на рисунке 2.14.

Критерий Рейнольдса для смеси был вычислен следующим образом:

$$\text{Re}_{cm}^{ce} = 4G_{cm}/(\pi D_k \eta_{cm}) = (1 + \mu^{ce})\text{Re}_s^{ce} / (1 + 5,5\alpha^{ce}),$$

где  $D_k = 0,25D_{ce}$  – диаметр кольцевого канала в сепараторе, м;  $\mu^{ce} = \mu/K_y$  – массовая концентрация пыли после сепаратора, кг/кг;  $K_y$  – кратность циркуляции топлива в контуре мельница-сепаратор-мельница (в рассматриваемых случаях равна 2);  $\text{Re}_s^{ce} = 4G_s/(\pi D_k \eta_s)$  – критерий Рейнольдса по воздуху в сепараторе;  $\alpha^{ce} = \mu^{ce} \rho_s / \rho_a$  – объемная доля частиц в воздухе в сепараторе.

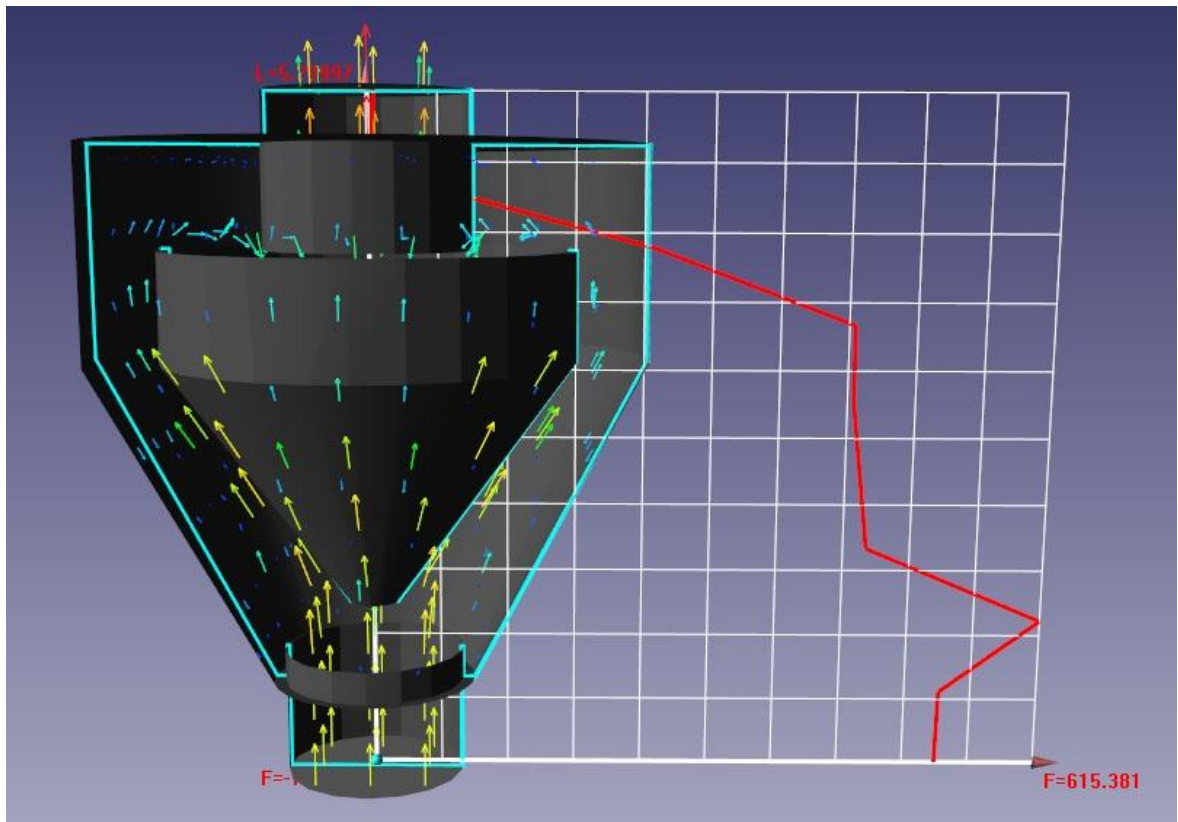


Рисунок 2.11 – Перепад давления и векторное поле скоростей в сепараторе диаметром  $D_{ce} = 3,42$  м при  $\mu_{ce} = 0,257$  и  $w_{cm} = 28,9$  м/с

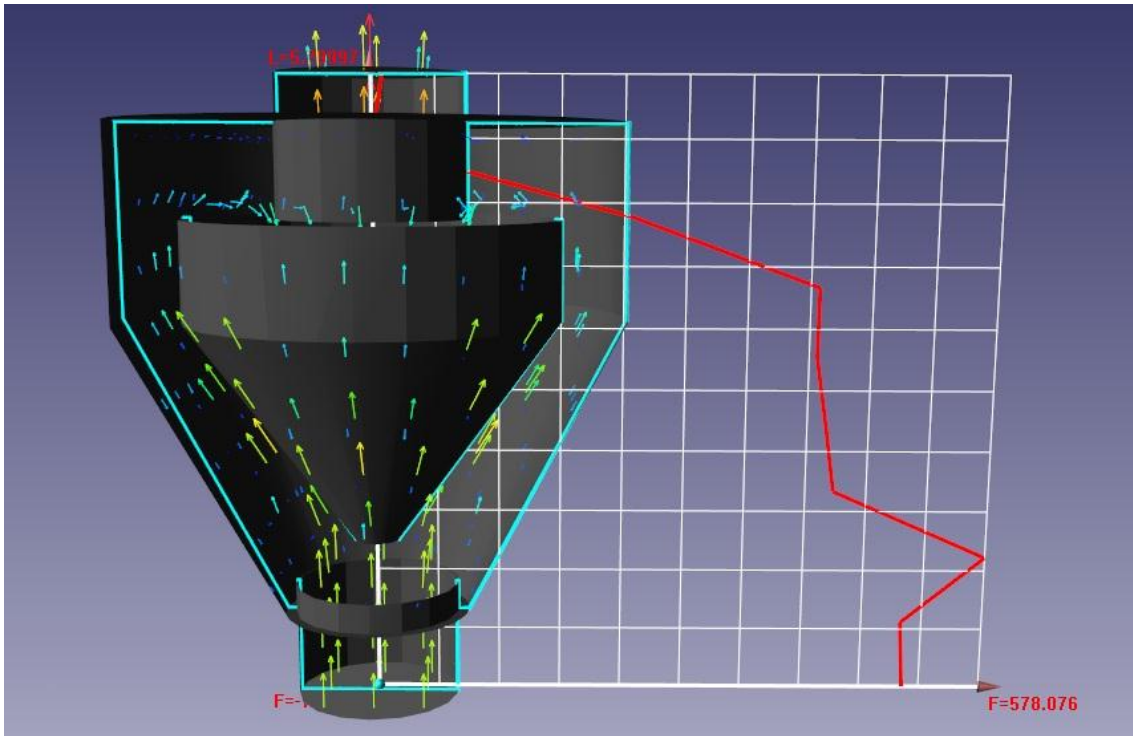


Рисунок 2.12 – Перепад давления и векторное поле скоростей в сепараторе диаметром  $D_{ce} = 3,42$  м при  $\mu_{ce} = 0,277$  и  $w_{cm} = 26$  м/с

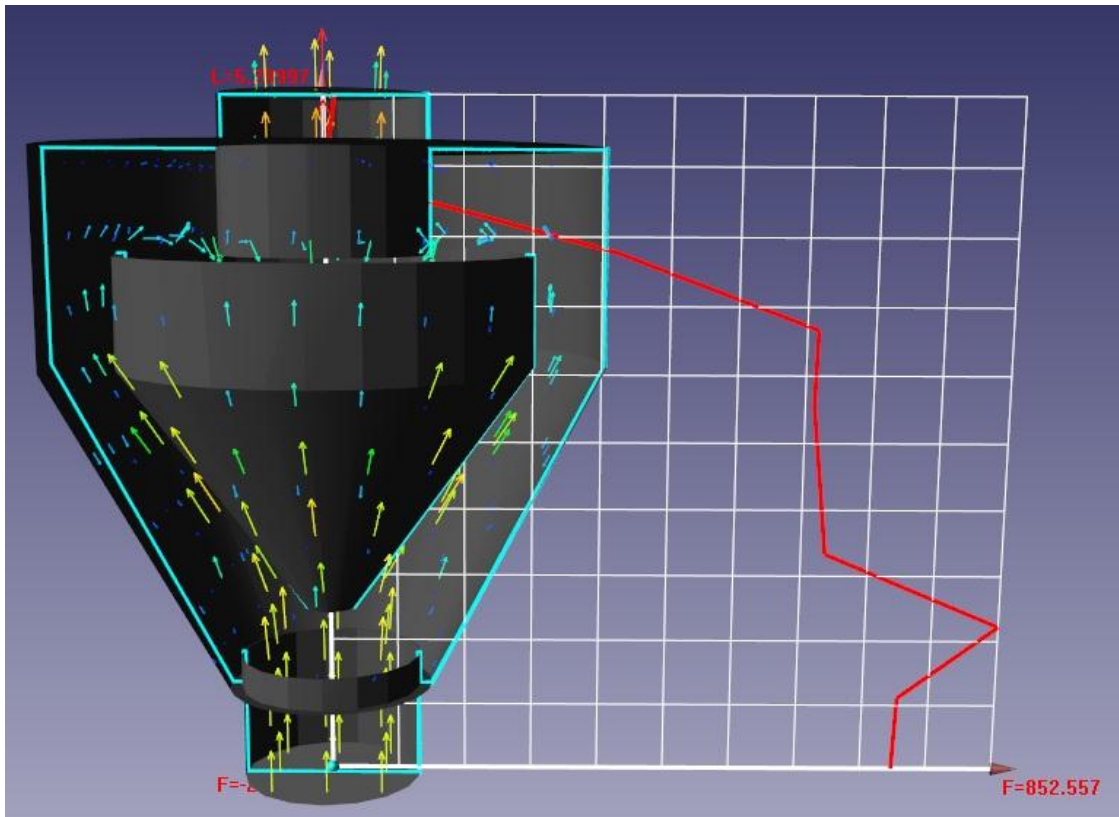


Рисунок 2.13 – Перепад давления и векторное поле скоростей в сепараторе диаметром  $D_{ce} = 3,42$  м при  $\mu_{ce} = 0,189$  и  $w_{cm} = 23,3$  м/с

Аппроксимация полученных точек линейной зависимостью (рисунок 2.14) дает следующее критериальное уравнение:

$$\ln\left(\frac{\Delta P_{\text{го.м}}^{ce}}{\mu^{ce} \Delta P_{\text{с.м}}}\right) = 0,657 \ln \text{Re}_{\text{с.м}}^{ce} - 7. \quad (2.6)$$

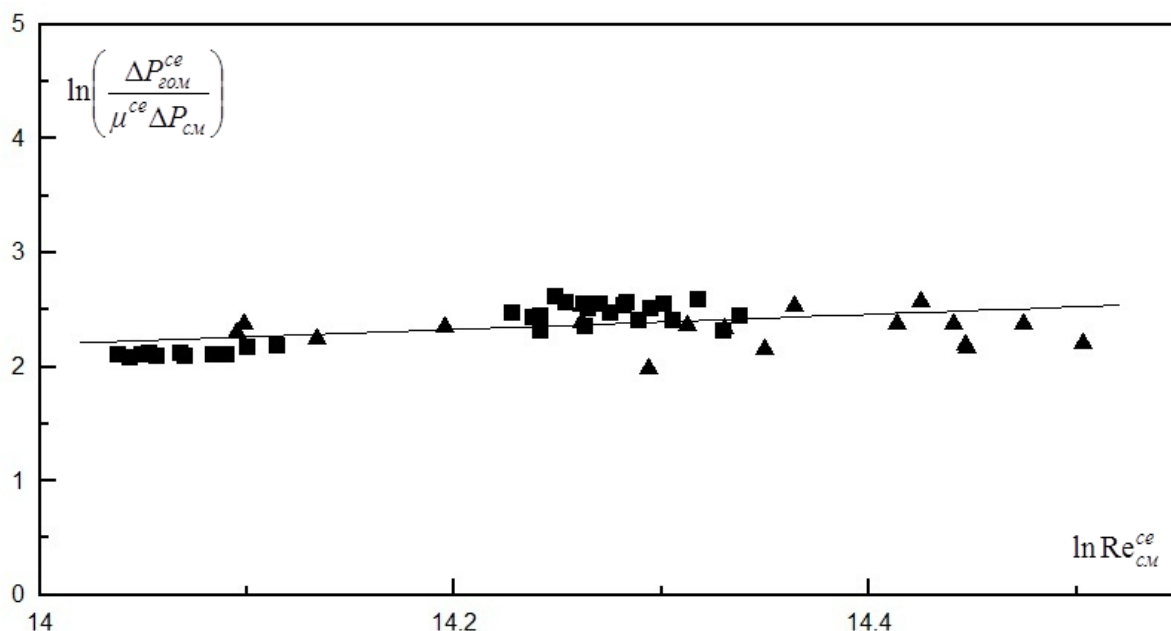


Рисунок 2.14 – Зависимость потерь давления гомогенного потока от критерия Рейнольдса: ▲ – сепаратор  $D_{ce} = 4,25$  м; ■ – сепаратор  $D_{ce} = 3,3$  м

Потери сопротивления трения пылевоздушной смеси в сепараторе, определяемые из уравнения (2.6), равны

$$\xi_{\text{го.м}}^{ce} = \frac{\Delta P_{\text{го.м}}^{ce}}{\Delta P_{\text{в}}} = 9,12 \cdot 10^{-4} \frac{\mu^{ce} (1 + \mu^{ce})^{0,343}}{(1 + 5,5\alpha^{ce})^{0,657}} \text{Re}_{\text{в}}^{0,657}. \quad (2.7)$$

## 2.6. Верификация результатов численного эксперимента

Проверить достоверность полученных результатов численного моделирования можно путем их сравнения с результатами расчетов по известным формулам.

Для определения потерь давления  $\Delta P$  используется формула Дарси-Вейсбаха [137]

$$\Delta P = \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi_m\right) \frac{\rho w^2}{2},$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\xi_m$  – коэффициент местных сопротивлений.

Коэффициент гидравлического сопротивления можно определить по формуле Блаузиуса [137]

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}.$$

Местные потери давления ШБМ  $\xi_m$  складываются из потерь при внезапном расширении  $\xi_{расш}$  (переход из входного патрубка в барабан) и потерь при внезапном сужении  $\xi_{суж}$  (переход из барабана в выходной патрубок)

$$\xi_m = \xi_{расш} + \xi_{суж}.$$

Коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении определяется из выражения [137]

$$\xi_{расш} = \left( \left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right)^2,$$

где  $D, d$  – диаметр широкого и узкого сечений канала.

Коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении [137]

$$\xi_{суж} = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2,$$

где  $\varepsilon = 0,57 + 0,043 / (1,1 - d / D)$  – коэффициент сжатия.

На рисунке 2.15 представлено сравнение потерь давления  $\Delta P_3$ , полученных в ходе численного эксперимента для мельницы ШК-32, и потерь давления  $\Delta P_T$ , рассчитанных по формуле Дарси-Вейсбаха. Из рисунка видно, что отклонение в основном не превышает 10%.

На рисунке 2.16 представлено сравнение потерь давления  $\Delta P_3$ , полученных в ходе численного эксперимента для мельницы Ш-16, и потерь давления  $\Delta P_T$ , рассчитанных по формуле Дарси-Вейсбаха. Из рисунка видно, что отклонение в основном не превышает 3%.

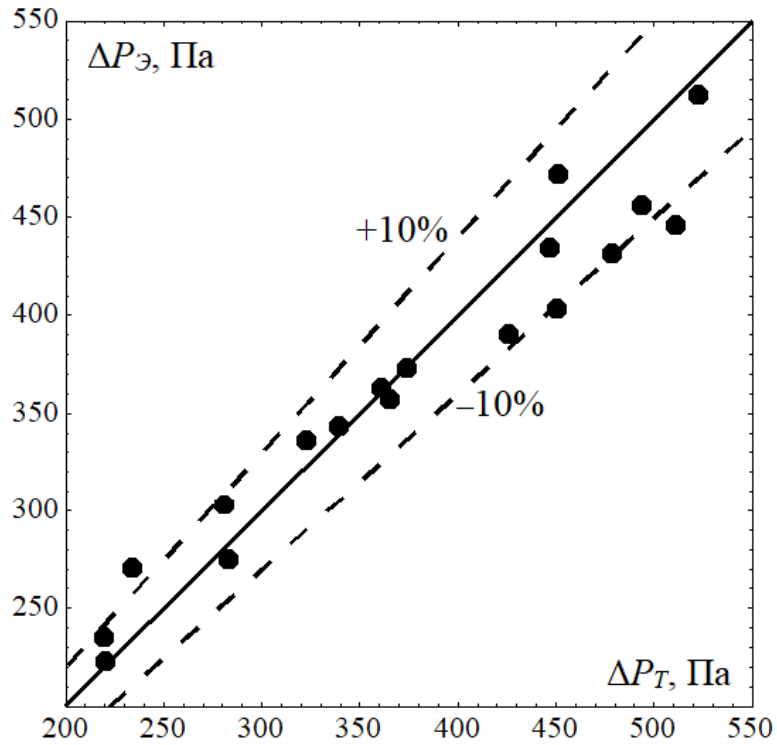


Рисунок 2.15 – Сравнение потерь давления мельницы ШК-32

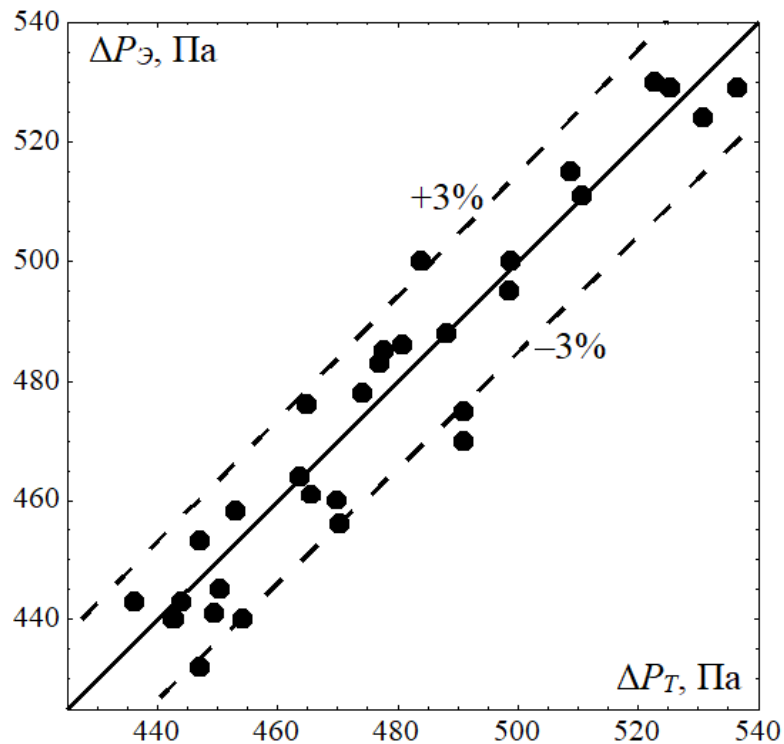


Рисунок 2.16 – Сравнение потерь давления мельницы Ш-16

## 2.7. Выводы по главе 2

В данной главе дана характеристика объектов исследования (шаровой барабанной мельницы и сепаратора), проведена физико-математическая постановка

задачи моделирования гомогенного потока газозвеси, в качестве инструмента численного моделирования выбран пакет прикладных программ FlowVision. В результате численного эксперимента получены данные по перепадам давления в шаровых барабанных мельницах и сепараторах  $\Delta P_{\text{гом}}$ .

1. Найдены зависимости потерь давления гомогенного потока газозвеси  $\Delta P_{\text{гом}}$  от критерия Рейнольдса, концентрации пыли и линейных размеров: критериальное уравнение (2.5) для ШБМ и критериальное уравнение (2.7) для сепараторов.

2. Найденные зависимости согласуются с формулой Дарси-Вейсбаха для определения потерь давления, но отличаются от аналогичных представленных в нормативных рекомендациях расчета пылесистем [6, 24], это, предположительно, объясняется тем, что модель Гастерштадта, предлагаемая нормативным методом для расчета полного сопротивлений элементов СПП, описывает гомогенный поток запыленного газа и не учитывает влияние полидисперсности угольной пыли. Кроме того, ШБМ рассчитаны на размол антрацитового штыба, но используются для измельчения бурого угля, уравнения их расчета остались прежними.

3. Полученная модель  $\Delta P_{\text{гом}}$  учитывает только потери сопротивления гомогенного потока газозвеси, т. е. на трение и на местные сопротивления. В этой связи было сделано предположение, что это только одна из составляющих общего сопротивления. Вторая составляющая может быть связана с инжекцией заторможенных частиц пыли в турбулентный горизонтальный поток воздуха [26], исследованию которой будет посвящена следующая глава.

### Глава 3. Моделирование аэродинамического сопротивления основных элементов пылесистем с учетом инъекции угольных частиц

#### 3.1. Скорость витания и средний диаметр частиц угольной пыли

При подаче предварительно размолотого угля в ШБМ мелкие частицы подхватываются потоком воздуха, а основная часть проваливается на дно мельницы. Для подъема (инъекции) частиц пыли, образовавшихся в результате измельчения крупных кусков угля, необходимо в вертикальном направлении сообщить частице топлива некоторую скорость, при которой эта частица будет инжектирована горизонтальным конвективным потоком. Эти вертикальные составляющие скорости существуют вследствие турбулентного характера движения воздуха. На инъекцию частиц затрачивается дополнительная энергия, которая увеличивает аэродинамическое сопротивление ШБМ.

Аэродинамическое сопротивление за счет захвата частиц в горизонтальный поток можно оценить по уравнению, представленном в [26]:

$$\Delta P_{инж} = f(\mu, \rho_{\text{ч}}, w_{инж}, w'_0),$$

где  $w'_0$  – начальная скорость частицы, равная нулю в рассматриваемом случае (полное торможение пыли при размоле в ШБМ), м/с.

Скорость, необходимая для инъекции частицы в горизонтальный поток, равна скорости витания  $w_{вит}$

$$w_{инж} = w_{вит}$$

Скорость витания одиночной сферической частицы в невозмущенном покоящемся потоке газа без влияния стенок канала определяется следующим образом [24]:

$$w_{вит} = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}}}{\xi_{\text{ч}} \rho_{\text{в}}}}, \quad (3.1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d_{\text{ч}}$  – диаметр частицы, м;  $\xi_{\text{ч}}$  – коэффициент сопротивления одиночной частицы.



Коэффициент сопротивления сферической частицы  $\zeta_q$  зависит от числа Рейнольдса [24]

$$\text{Re}_q = w_{\text{вум}} d_q / \nu_\epsilon,$$

где  $\nu_\epsilon = 0,0000133 + 8,916 \cdot 10^{-8} t_\epsilon + 9,605 \cdot 10^{-11} t_\epsilon^2 - 2,177 \cdot 10^{-14} t_\epsilon^3$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с, аппроксимация справочных данных [138].

Соотношения между коэффициентом сопротивления  $\zeta_q$  и числом Рейнольдса  $\text{Re}_q$  можно представить в виде следующих эмпирических уравнений:

$$\zeta_q = 24/\text{Re}_q \text{ при } \text{Re}_q \leq 0,2, \quad (3.2)$$

$$\zeta_q = \frac{21}{\text{Re}_q} + \frac{6}{\text{Re}_q^{0,5}} + 0,28 \text{ при } 0,1 \leq \text{Re}_q \leq 4000. \quad (3.3)$$

Подставив  $\zeta_q$  из (3.2) в уравнение (3.1), получим зависимость скорости витания в первой области (при  $\text{Re}_q \leq 0,2$ )

$$w_{\text{вум}} = \frac{1}{18} g d_q^2 \frac{\rho_q - \rho_\epsilon}{\rho_\epsilon \nu_\epsilon}.$$

Чтобы найти скорость витания во второй области (при  $0,1 \leq \text{Re}_q \leq 4 \cdot 10^3$ ), подставляем (3.2) в (3.3), возводим в квадрат и умножаем на  $d_q^2 / \nu_\epsilon^2$

$$\frac{w_{\text{вум}}^2 d_q^2}{\nu_\epsilon^2} = \text{Re}_q^2 = \frac{4}{3} g \frac{d_q^3}{\frac{21}{\text{Re}_q} + \frac{6}{\text{Re}_q^{0,5}} + 0,28} \frac{\rho_q - \rho_\epsilon}{\rho_\epsilon \nu_\epsilon^2}.$$

Отсюда имеем уравнение

$$21\text{Re}_{q2} + 6\text{Re}_{q2}^{1,5} + 0,28\text{Re}_{q2}^2 = \frac{4}{3} g \frac{d_q^3}{\nu_\epsilon^2} \frac{\rho_q - \rho_\epsilon}{\rho_\epsilon} = \frac{w_{\text{вум}0}^2 d_q^2}{\nu_\epsilon^2} = \text{Re}_{q0}^2, \quad (3.4)$$

где  $w_{\text{вум}0}^2 = \frac{4}{3} g d_q \frac{\rho_q - \rho_\epsilon}{\rho_\epsilon}$  – квадрат скорости витания при  $\zeta_q = 1$ ;  $\text{Re}_{q0}^2$  – критерий Рейнольдса по скорости витания  $w_{\text{вум}0}$ .

Принимаем

$$y = \sqrt{\text{Re}_{q2}}.$$

Тогда уравнение (3.4) примет следующий вид:

$$21y^2 + 6y^3 + 0,28y^4 = \text{Re}_{q0}^2. \quad (3.5)$$

Аппроксимация решения уравнения (3.5) имеет следующий вид (рисунок 3.1):

$$\text{Re}_{q2} = (0,00045\text{Re}_{q0}^4 + 0,133\text{Re}_{q0}^2 + 0,568)^2.$$

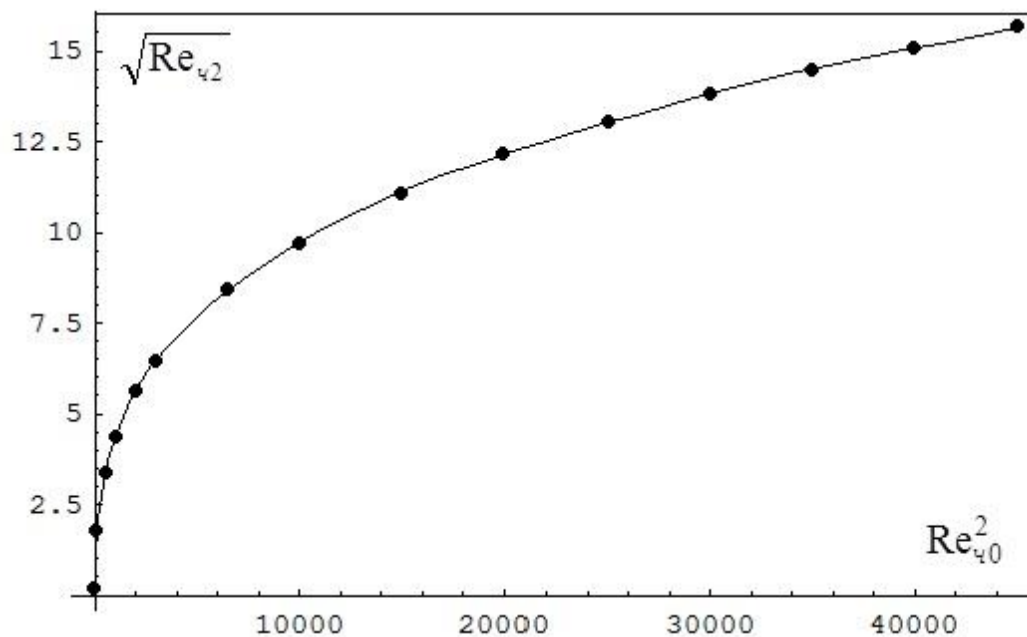


Рисунок 3.1 – Зависимость  $\text{Re}_{q2}$  от  $\text{Re}_{q0}$  (3.5)

Скорость витания во второй области равна

$$w_{\text{вум}2} = \text{Re}_{q2} v_g / d_q.$$

Ввиду полидисперсности угольной пыли необходимо определить средний диаметр частиц и их среднеквадратичную скорость витания. Для этого надо знать плотность распределения частиц по размерам. Анализ многочисленных зерновых характеристик размола различных видов топлив показал, что кривые распределения хорошо описываются следующим уравнением [5, 6]:

$$R_x = \exp(-bx^n), \quad (3.6)$$

где  $R_x$  – остаток на каком-либо сите;  $b$  и  $n$  – опытные коэффициенты, характеризующие соответственно тонкость помола и равномерность зернового состава (показатель полидисперсности), постоянные для данного топлива и данного метода

размола величины (определяются рассевом навесок пыли на двух ситах, чаще используют сита с размером ячеек 90 и 200 мкм);  $x$  – размер (диаметр) частиц, мкм.

Экспериментальные значения  $R_{90}$  и  $R_{200}$  после сепаратора представлены в [27, 28], поэтому легко можно определить соответствующие значения параметров  $n$  и  $b$ :

$$n = \frac{\ln \ln(100/R_{90}) - \ln \ln(100/R_{200})}{\ln 90 - \ln 200},$$

$$b = \frac{\ln(100/R_{90})}{90^n}.$$

Продифференцировав уравнение (3.6) по размерам частиц  $x$ , получим функцию плотности распределения частиц пыли по размерам

$$F(b, n, x) = -dR_x/dx = nbx^{n-1}e^{-bx^n}.$$

На рисунке 3.2 представлены дифференциальные кривые распределения при различных значениях коэффициента полидисперсности  $n$ .

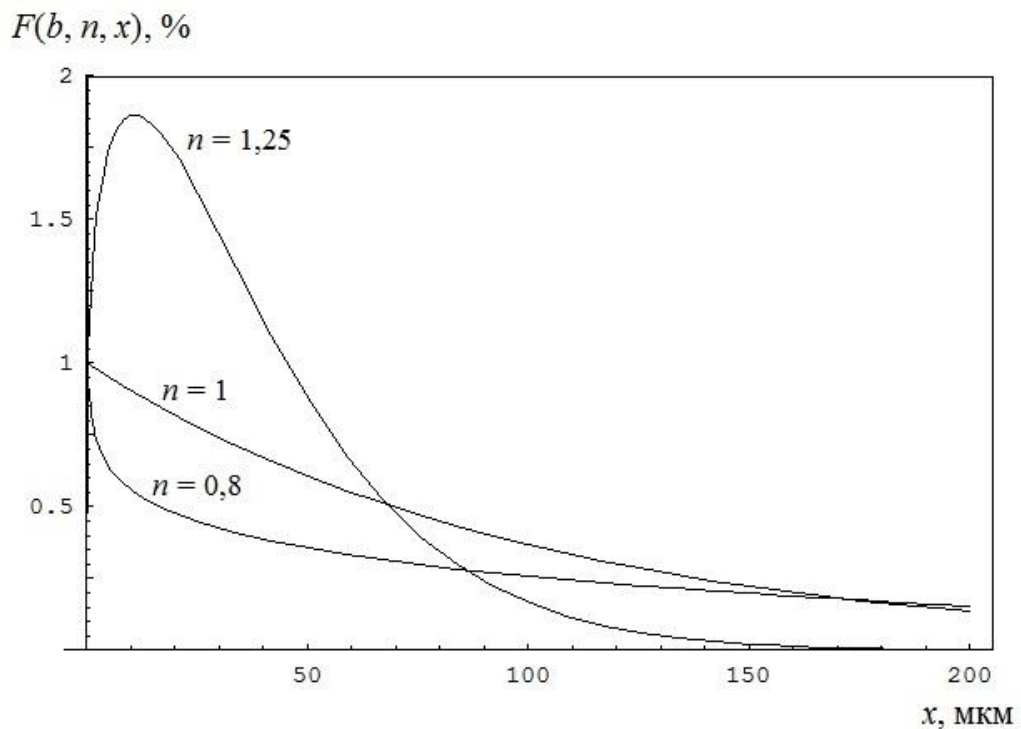


Рисунок 3.2 – Дифференциальные кривые распределения при различных значениях коэффициента полидисперсности  $n$  ( $b = 0,01$ )

При  $n > 1$  кривая распределения имеет максимум. Как видно из рисунка 3.2, кривая распределения для образца пыли с  $n = 1,25$  имеет максимум при  $x \approx 10$  мкм. При  $n \leq 1$  наибольшее количество частиц пыли приходится на очень малые значения  $x$ , т. е. пыль сильно переизмельчена.

Тогда средний диаметр частиц равен

$$\langle d_y \rangle = \int_0^{x_{\max}} x F(b, n, x) dx.$$

Зависимость среднего диаметра частиц  $\langle d_y \rangle$  от параметров  $b$  и  $n$  представлена на рисунке 3.3.

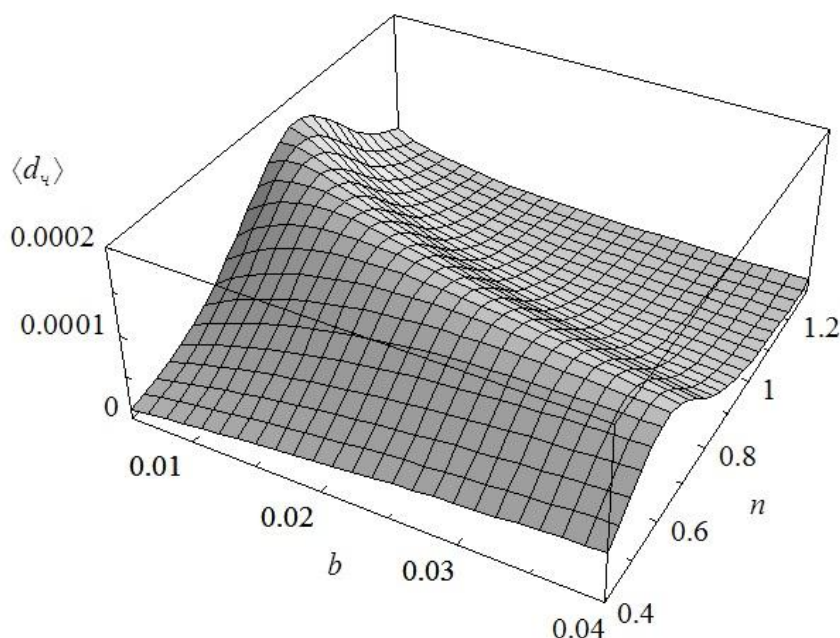


Рисунок 3.3 – Зависимость среднего диаметра частиц  $\langle d_y \rangle$  от параметров  $b$  и  $n$

Среднеквадратичная скорость витания частиц получается путем интегрирования скоростей витания в обеих областях

$$\langle w_{\text{вум}}^2 \rangle = \int_0^{x_1} w_{\text{вум1}}^2(x) F(b, n, x) dx + \int_{x_1}^{x_{\max}} w_{\text{вум2}}^2(x) F(b, n, x) dx,$$

где  $x_1 = (3,6\rho_g v_g^2 / (\rho_y g))^{0,33}$  – граничное значение диаметра частиц при  $Re_y = 0,2$ ;  $x_{\max}$  – максимальный диаметр частиц (в рассматриваемом случае 0,0005 м).

Зависимость среднеквадратичной скорости  $\langle w_{\text{вум}}^2 \rangle$  от параметров  $b$  и  $n$  представлена на рисунке 3.4.

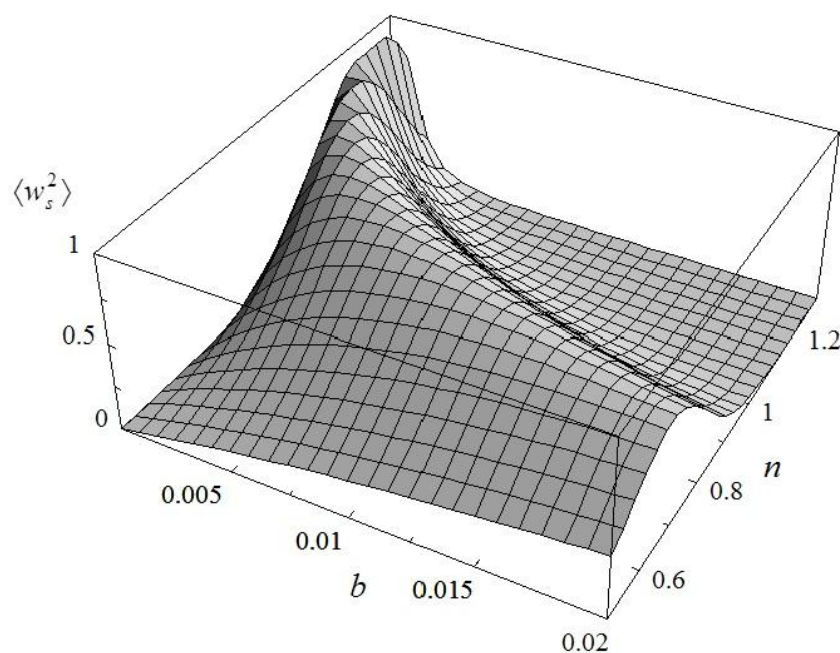


Рисунок 3.4 – Зависимость среднеквадратичной скорости витания  $\langle w_{вит}^2 \rangle$  от параметров  $b$  и  $n$

### 3.2. Аэродинамическое сопротивление, возникающее при инжекции угольных частиц в ШБМ

Данные по потерям сопротивления на инжекцию частиц пыли  $\Delta P_{инж}$  были получены из результатов режимных испытаний пылесистем

$$\Delta P_{инж} = \Delta P_{ШБМ} - \Delta P_{гом},$$

где  $\Delta P_{ШБМ}$  – сопротивления ШБМ, измеренные в ходе режимных испытаний;  $\Delta P_{гом}$  – потери сопротивления гомогенного потока газозвеси, полученные из численного эксперимента, описанного в главе 2.

Режимные испытания пылесистемы с мельницей ШК-32 проводились котельной группой службы наладки Иркутской ТЭЦ-9 в феврале-ноябре 1970 г. с целью определения оптимальных режимов работы по условиям шаровой загрузки, вентиляции, максимально устойчивой производительности. Результаты данных испытаний оформлены в отчет [27] и приведены в таблице Б1 Приложения Б.

В ходе испытаний были произведены измерения следующих величин:  $P_{м2}$  – разрежение аэросмеси за мельницей, кгс/м<sup>2</sup>;  $t_2$  – температура аэросмеси за мель-

ницей, °С;  $N_6$  – потребляемая мощность мельницы, кВт. Регистрация вышеуказанных параметров проводилась по предварительно поверенным штатным приборам. Мощность, потребляемая двигателем мельницы, определялась с помощью двух однофазных переносных ваттметров [27].

Приборами службы наладки дополнительно измерены:  $R_{90}$  – тонкость пыли за сепаратором, %;  $t_{гв}$  – температура горячего воздуха перед мельницей, °С;  $V_{гв}$  – объемный расход горячего воздуха, тыс. м<sup>3</sup>/ч;  $K_{прс}$  – присосы, отнесенные к расходу воздуха через мельничный вентилятор, %;  $P_{м1}$  – разрежение перед мельницей, кгс/м<sup>2</sup>;  $P_{сеп1}$  – разрежение перед сепаратором, кгс/м<sup>2</sup>;  $P_{сеп2}$  – разрежение за сепаратором, кгс/м<sup>2</sup>.

Для определения производительности мельницы  $B_m$ , т/ч, использовался перекидной шибер, вмонтированный в течку сырого угля к мельнице. Отсечка топлива продолжительностью 15 с производилась 5-7 раз за опыт.

Анализ проб на влажность рабочего топлива  $W_p$ , %, и влажность угольной пыли  $W_{шл}$ , %, выполнялся химлабораторией станции.

Опыты проводились при шаровых загрузках  $G_{ш} = 50; 57; 65; 69$  т, что соответствует степени заполнения барабана  $\psi_6 = 0,231; 0,263; 0,3; 0,32$ .

Статистическая обработка опытных данных показала, что 6 серий измерений можно исключить как сильно отклоняющихся от средних значений, не попадающих в доверительный интервал и имеющих низкий коэффициент корреляции (таблица В1 и рисунки В1-В10 Приложения В).

Результаты наладочных испытаний пылесистемы с мельницей Ш-16 Иркутской ТЭЦ-10 [28] приведены в таблицах Б2 и Б3 Приложения Б и в таблице В2 Приложения В.

Полученные данные по потерям сопротивления при инжекции частиц  $\Delta P_{инж}$  обрабатывались так, чтобы определить зависимость от среднеквадратичной скорости витания  $\langle w_{вит}^2 \rangle$  (рисунок 3.5) и среднего диаметра частиц  $\langle d_c \rangle$  (рисунок 3.6).

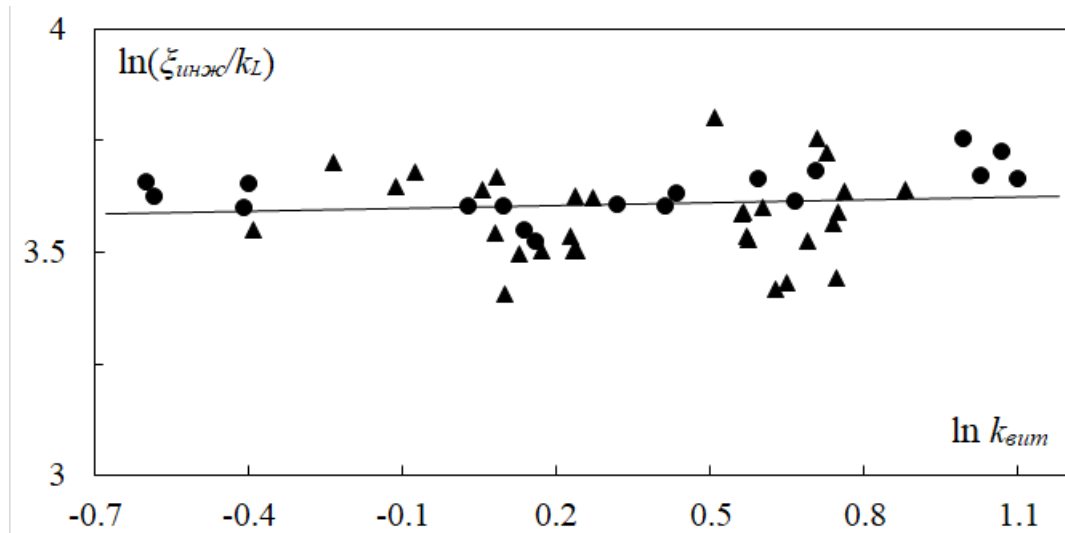


Рисунок 3.5 – Зависимость потерь давления  $\Delta P_{инж}$  от среднеквадратичной скорости витания частицы  $\langle w_{вит}^2 \rangle$ : ● – ШК-32; ▲ – Ш-16; сплошная линия – аппроксимация (3.7)

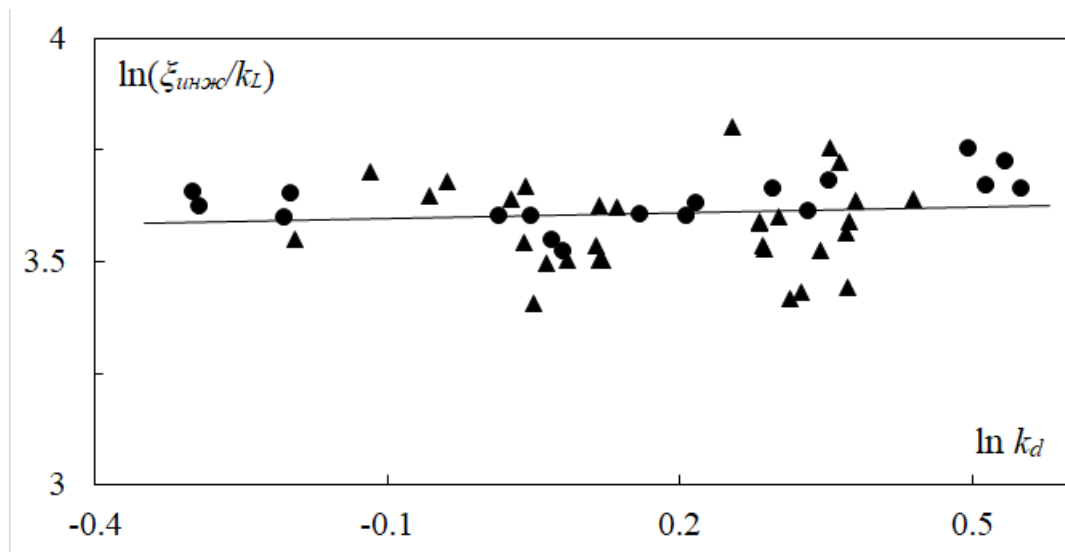


Рисунок 3.6 – Зависимость потерь давления  $\Delta P_{инж}$  от среднего диаметра частиц угольной пыли  $\langle d_p \rangle$ ; ● – ШК-32; ▲ – Ш-16; сплошная линия – аппроксимация (3.8)

Полученные зависимости имеют следующий вид:

$$\ln\left(\frac{\xi_{инж}}{k_L}\right) = 3,6 + 0,0216 \ln k_{вит}, \quad (3.7)$$

$$\ln\left(\frac{\xi_{инж}}{k_L}\right) = 3,6 + 0,0432 \ln k_d, \quad (3.8)$$

$$\xi_{инж} = \frac{\Delta P_{инж}}{\Delta P_6} = 36,6(1 + \mu)k_{вит}^{0,0216}k_L, \quad (3.9)$$

$$\xi_{инж} = \frac{\Delta P_{инж}}{\Delta P_6} = 36,6(1 + \mu)k_d^{0,0432}k_L, \quad (3.10)$$

где  $\xi_{инж}$  – коэффициент сопротивления при инъекции частиц;  $k_{вит} = \frac{\langle w_{вит}^2 \rangle}{\langle w_{вит}^2 \rangle^*}$  – ко-

эффициент, учитывающий влияние среднеквадратичной скорости витания;

$k_d = \frac{\langle d_u \rangle}{\langle d_u \rangle^*}$  – коэффициент, учитывающий влияние среднего диаметра частиц;

$\langle w_{вит}^2 \rangle^* = (v_6 / \langle d_u \rangle)^2$  – характерная среднеквадратичная скорость витания частицы

при  $Re_u^2 = 1$ ;  $\langle d_u \rangle^* = v_6 / \langle w_{вит} \rangle$  – характерный средний диаметр частиц при  $Re_u = 1$ .

Среднее отклонение экспериментальных данных от аппроксимирующих зависимостей (3.9) и (3.10) составляет приблизительно 8%.

На рисунке 3.7 приведены аэродинамическое сопротивление ШБМ  $\Delta P = \Delta P_{зом} + \Delta P_{инж}$ , рассчитанное по формулам (2.5) и (3.10), и экспериментальное сопротивление  $\Delta P_{экс}$ , измеренное в ходе наладочных испытаний. Они имеют достаточно хорошее совпадение, т. к. отклонение аппроксимации аэродинамического сопротивления ШБМ от экспериментальных данных в основном не превышает 10%. Статистический анализ представлен в таблице Д1 Приложения Д.



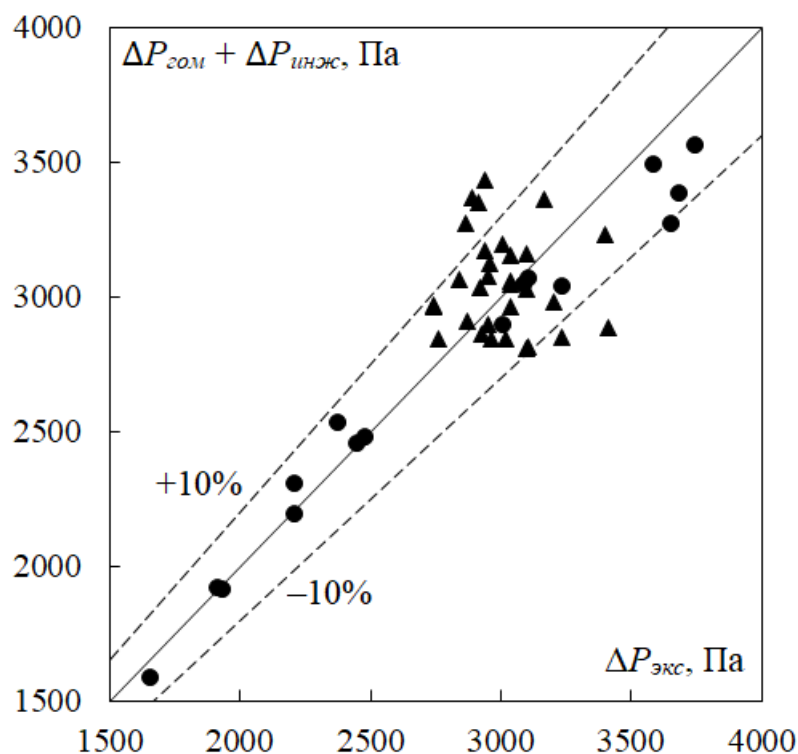


Рисунок 3.7 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных по потерям давления: ● – ШК-32; ▲ – Ш-16; сплошная линия – точное совпадение; пунктирные линии – отклонение  $\pm 10\%$

### 3.3. Аэродинамическое сопротивление, возникающее при инъекции частиц в центробежных сепараторах пыли

Моделирование производилось на основе обработки экспериментальных данных режимных испытаний пылесистем [27, 28]. При этом в [27] давление измерялось на отметках после шаровой барабанной мельницы и после сепаратора, т. е. показания включают перепад давления на сепаратор и на вертикальный пылепровод от мельницы до сепаратора. Чтобы выделить перепад давления пылепровода, воспользуемся формулой для восходящего пневмотранспорта частиц [26]

$$\frac{\xi_{см}}{\xi_г} = 1 + 1,7 \cdot 10^{-2} \mu \left( \frac{\rho_г}{\rho_ч} \right)^{0,33} \text{Re}_ч^{1,33} \text{Re}_г^{-0,81} \left( \frac{D}{\langle d_ч \rangle} \right)^{1,56} + \frac{2}{\xi_г} \mu \text{Fr},$$

где  $\xi_{см}$  – коэффициент гидравлического сопротивления пылевоздушной смеси;  $\xi_г = 0,316/\text{Re}_г^{0,25}$ ;  $\text{Fr} = gD/w_г^2$  – число Фруда.

Перепад давления на пылепровод был вычислен по формуле

$$\Delta P_{\text{пп}} = \xi_{\text{см}} \frac{l}{d} \frac{\rho w_{\text{см}}^2}{2}, \quad (3.11)$$

где  $l$  – длина пылепровода, м (в данном случае равна 30 м);  $d$  – диаметр пылепровода, м (1 м)

Чтобы найти сопротивление сепаратора  $\Delta P_{\text{се}}$ , из экспериментальных данных по перепаду давления на участке «после мельницы – после сепаратора»  $\Delta P_{\text{пп-се}}$  вычли найденный по формуле (3.11) перепад давления на пылепровод  $\Delta P_{\text{пп}}$ :

$$\Delta P_{\text{се}} = \Delta P_{\text{пп-се}} - \Delta P_{\text{пп}}.$$

В [28] приведены данные измерений сопротивления отдельного сепаратора.

Для исследования аэродинамического сопротивления сепаратора был использован пакет прикладных программ FlowVision HRC.

Вторая составляющая общего сопротивления состоит из потерь сопротивления на инъекцию частиц в поток  $\Delta P_{\text{инж}}$ . Частицы угольной пыли при движении ударяются о стенки сепаратора, теряют свою скорость и выпадают из основного потока. Для возврата (инъекции) частицы обратно в поток нужно затратить дополнительную энергию (сопротивление на инъекцию).

Потери сопротивления на инъекцию частиц пыли  $\Delta P_{\text{инж}}$  были получены путем вычитания из экспериментальных данных полного сопротивления сепаратора  $\Delta P_{\text{экс}}$  потерь сопротивления на трение  $\Delta P_{\text{гом}}$ :

$$\Delta P_{\text{инж}} = \Delta P_{\text{экс}} - \Delta P_{\text{гом}}.$$

Полученные данные обрабатывались таким образом, чтобы выявить функциональные зависимости от средней скорости витания частиц  $\langle w_{\text{вит}} \rangle$  (рисунок 3.8) и среднего диаметра частиц пыли  $\langle d_{\text{ч}} \rangle$  (рисунок 3.9):

$$\Delta P_{\text{инж}} = f(\langle w_{\text{вит}}^2 \rangle),$$

$$\Delta P_{\text{инж}} = f(\langle d_{\text{ч}} \rangle).$$

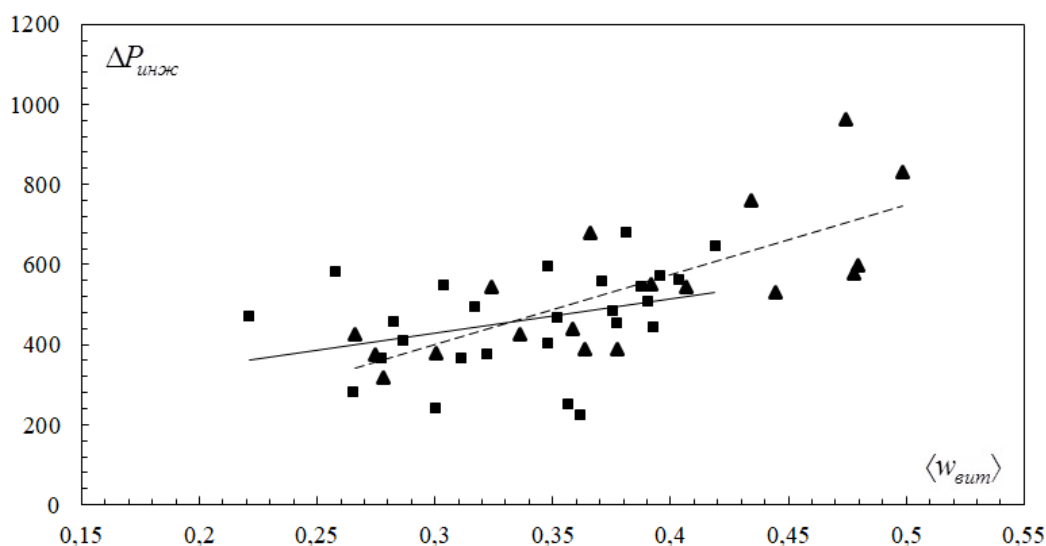


Рисунок 3.8 – Зависимость потерь давления на инъекцию  $\Delta P_{инж}$  от средней скорости витания  $\langle w_{вир} \rangle$ : ▲ – для сепаратора диаметром  $D_{се} = 4,25$  м; ■ – для сепаратора диаметром  $D_{се} = 3,42$  м

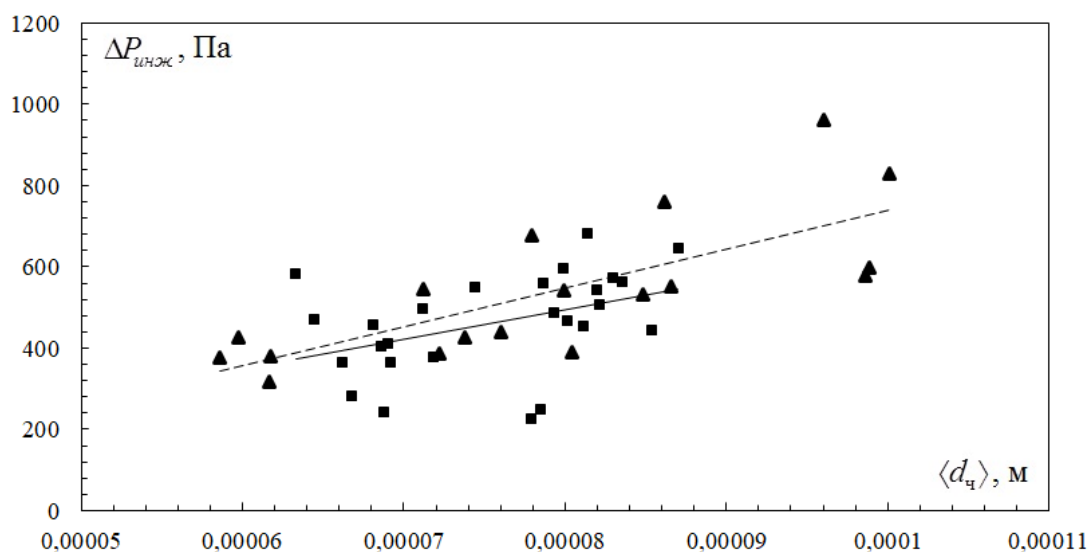


Рисунок 3.9 – Зависимость потерь давления на инъекцию  $\Delta P_{инж}$  от среднего диаметра частиц  $\langle d_ч \rangle$ : ▲ – для сепаратора диаметром  $D_{се} = 4,25$  м; ■ – для сепаратора диаметром  $D_{се} = 3,42$  м

Из рисунков 3.8 и 3.9 видно, что данные лежат в одной области значений, но имеют большой разброс по оси ординат. Чтобы уложить их на одну прямую, необходимо ввести в зависимости параметры, характеризующие различия сепараторов.

Найденные зависимости показаны на рисунках 3.10 и 3.11.

Аппроксимация точек линейной зависимостью дает следующие критериальные уравнения:

$$\ln\left(\frac{\Delta P_{инж}}{\mu_{ce}^{1,5} \Delta P_{см}}\right) = 2,816 + 0,159 \ln\left(\frac{\langle w_{вум}^2 \rangle}{\langle w_{вум}^2 \rangle^*}\right), \quad (3.12)$$

$$\ln\left(\frac{\Delta P_{инж}}{\mu_{ce}^{1,5} \Delta P_{см}}\right) = 2,816 + 0,317 \ln\left(\frac{\langle d_ч \rangle}{\langle d_ч \rangle^*}\right). \quad (3.13)$$

Потери давления на инъекцию заторможенных частиц в основной поток, определяемые уравнениями (3.12) и (3.13), равны

$$\xi_{инж}^{ce} = \frac{\Delta P_{инж}^{ce}}{\Delta P_г} = 16,7 \mu_{ce}^{1,5} (1 + \mu) k_{вум}^{0,16}, \quad (3.14)$$

$$\xi_{инж}^{ce} = \frac{\Delta P_{инж}^{ce}}{\Delta P_г} = 16,7 \mu_{ce}^{1,5} (1 + \mu) k_d^{0,317}. \quad (3.15)$$

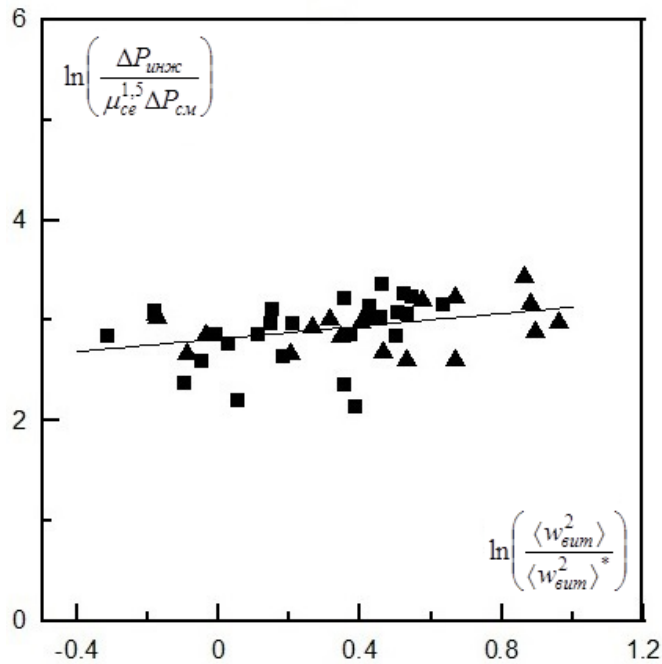


Рисунок 3.10 – Зависимость сопротивления инъекции частиц пыли  $\Delta P_{инж}$  от средней скорости витания частиц  $\langle w_{вум} \rangle$ ; ▲ – для сепаратора диаметром  $D_{ce} = 4,25$  м; ■ – для сепаратора диаметром  $D_{ce} = 3,42$  м

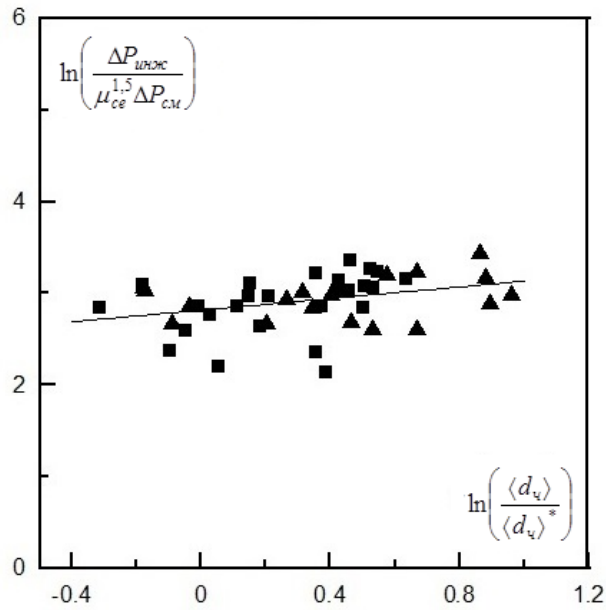


Рисунок 3.11 – Зависимость сопротивления инjection частиц пыли  $\Delta P_{инж}$  от среднего диаметра частиц угольной пыли  $\langle d_ч \rangle$ ; ▲ – для сепаратора диаметром  $D_{ce} = 4,25$  м; ■ – для сепаратора диаметром  $D_{ce} = 3,42$  м

Как видно из рисунка 3.12, полученные критериальные уравнения (2.7), (3.14) и (3.15) показывают удовлетворительную точность (отклонение в пределах  $\pm 20\%$ ).

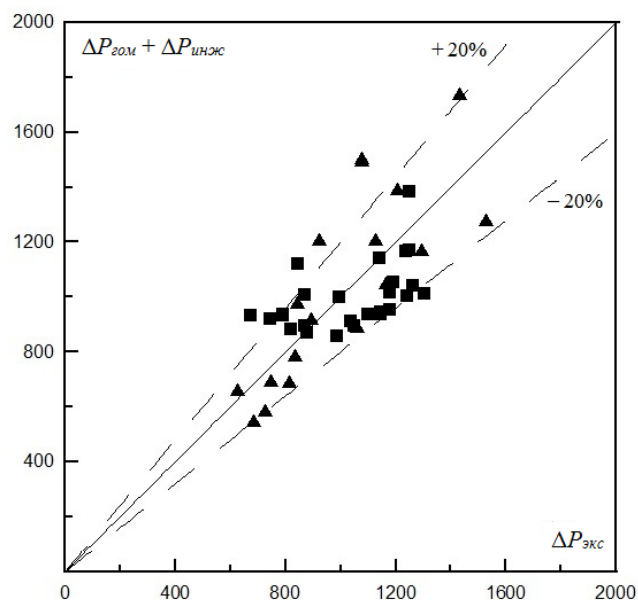


Рисунок 3.12 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных по потерям давления: ▲ – для сепаратора  $D_{ce} = 4,25$  м; ■ – для сепаратора  $D_{ce} = 3,42$  м

Статистический анализ полученных результатов представлен в таблице Д2 Приложения Д.

### 3.4. Выводы по главе 3

В данной главе показано, что аэродинамическое сопротивление мельниц и сепараторов складывается из двух составляющих:  $\Delta P_{инж}$  – потеря давления на инжекцию частиц пыли в основной поток после размола и  $\Delta P_{гом}$  – потеря давления потока гомогенного потока газозвеси на трение и местные потери. При этом доля  $\Delta P_{инж}$  от общего сопротивления составляет 80% в шаровых барабанных мельницах и 50% в центробежных сепараторах пыли. Большее значение  $\Delta P_{инж}$  в ШБМ можно объяснить тем, что частицы угольной пыли, включенные в воздушный поток, имеют больший размер, чем частицы, проходящие через сепаратор.

Потери давления потока газозвеси на трение были численно смоделированы с помощью ППП FlowVision.

Основные результаты, полученные в главе 3:

1. Найдены зависимости потерь давления  $\Delta P_{инж}$ , обусловленных инжекцией пылевых частиц в основной поток после размола, от средней скорости витания частиц – критериальное уравнение (3.9), их среднего диаметра и размеров ШБМ – критериальное уравнение (3.10). Отклонение от экспериментальных данных составило порядка 10%.

2. Получены критериальные зависимости потерь давления на инжекцию частиц пыли  $\Delta P_{инж}$  от средней скорости витания (3.14) и среднего диаметра частиц (3.15) для сепараторов диаметрами 4,25 и 3,42 м. Погрешность вычислений по данным уравнениям составляет порядка 20%.

## Глава 4. Анализ энергоэффективности шаровой барабанной мельницы

### 4.1. Сушильная производительность ШБМ

Эффективный режим работы пылесистемы достигается при равенстве размольной  $B_p$  и сушильной  $B_c$  производительностей мельницы [6, 24, 45]. Сушильная производительность определяется из уравнения теплового баланса пылесистемы [24]. Тепловой баланс составляется в виде уравнения, выражающего равенство прихода и расхода теплоты (рисунок 4.1).

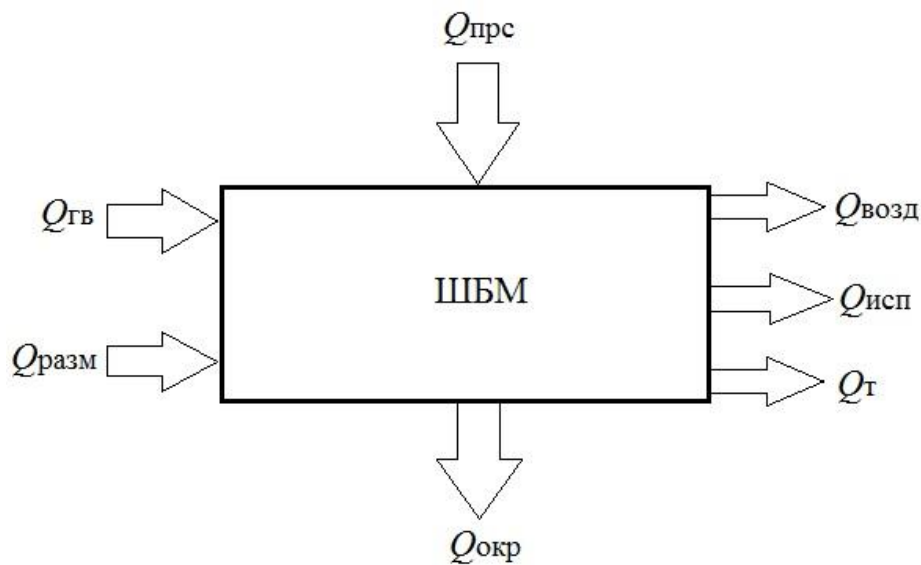


Рисунок 4.1 – Схема теплового баланса ШБМ:  $Q_{ГВ}$  – теплота, вносимая горячим воздухом;  $Q_{прс}$  – теплота, вносимая присосами холодного воздуха;  $Q_{разм}$  – теплота, выделяющаяся при размоле топлива;  $Q_{возд}$  – теплота, уносимая воздухом;  $Q_{исп}$  – теплота, затрачиваемая на испарение влаги топлива;  $Q_{т}$  – теплота, уносимая топливом;  $Q_{окр}$  – потери теплоты в окружающую среду

Статьи теплового баланса [24]

Приходные:

1. Теплота, вносимая горячим воздухом

$$Q_{ГВ} = V_B^{HFY} h_B(t_{ГВ}),$$

где  $h_B(t_{ГВ}) = 1,97 + 1,28(t_{ГВ}) + 0,000195(t_{ГВ})^2 - 4,05 \cdot 10^{-8}(t_{ГВ})^3 + 3,2 \cdot 10^{-12}(t_{ГВ})^4$  – энтальпия горячего воздуха при  $t_{ГВ}$ , кДж/м<sup>3</sup>, аппроксимация справочных данных [138].

## 2. Теплота, вносимая присосами

$$Q_{\text{прс}} = K_{\text{прс}} V_B^{\text{НФУ}} h_B(t_{\text{хв}}),$$

где  $h_B(t_{\text{хв}})$  – энтальпия присасываемого холодного воздуха при  $t_{\text{хв}}$ , кДж/м<sup>3</sup>.

## 3. Теплота, выделяющаяся при размоле топлива

$$Q_{\text{разм}} = 0,7N_6.$$

Расходные:

### 1. Теплота, затрачиваемая на испарение влаги топлива

$$Q_{\text{исп}} = B_c \Delta W (2493 + 1,97t_2 - t_T),$$

где  $\Delta W = (W^p - W^{nl}) / (100 - W^{nl})$  – доля испаренной влаги топлива в мельнице;  $t_T$  – температура топлива на входе в систему сушки, °С.

### 2. Теплота, уносимая воздухом из мельницы

$$Q_{\text{возд}} = (1 + K_{\text{прс}}) V_B^{\text{НФУ}} h_B(t_2),$$

где  $h_B(t_2)$  – энтальпия воздуха после мельницы при  $t_2$ , кДж/м<sup>3</sup>.

### 3. Теплота, уносимая угольной пылью из мельницы

$$Q_T = c_T t_2 B_c,$$

где  $c_T = 4,19 \frac{W^{nl}}{100} + c_{\text{бу}} \frac{100 - W^{nl}}{100}$  – теплоемкость угольной пыли при  $t_2$  и  $W^{nl}$ , кДж/кг·К;  $c_{\text{бу}}$  – теплоемкость бурого угля, кДж/кг·К.

3. Потери теплоты в окружающую среду  $Q_5$  зависят от типа мельницы (аппроксимация справочных данных [24])

$$Q_5 = 6.441(D_o L_o)^{0.7}.$$

Уравнение теплового баланса

$$Q_{ГВ} + Q_{\text{прс}} + Q_{\text{разм}} - Q_{\text{исп}}(B_c) - Q_{\text{возд}} - Q_T(B_c) - Q_{\text{окр}} = 0.$$

Выражаем сушильную производительность



$$B_c = \frac{V_{\epsilon}^{H\Phi Y} (h_{\epsilon}(t_{2\epsilon}) + K_{npc} h_{\epsilon}(t_{x\epsilon}) - (1 + K_{npc}) h_{\epsilon}(t_2)) + 0.7 N_{\epsilon} - Q_5}{\Delta W(2493 + 1.97t_2) + c_T t_2} \quad (4.1)$$

Объемный расход воздуха при НФУ вычисляется по формуле

$$V_{\epsilon}^{H\Phi Y} = V_{\Gamma B} \frac{273}{t_{\Gamma B} + 273},$$

где  $V_{\Gamma B}$  – объемный расход горячего воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $t_{\Gamma B}$  – температура горячего воздуха, °С.

#### 4.2. Расчет удельного расхода электроэнергии мельницы ШК-32

Мощность, потребляемая ШБМ  $N_{\epsilon}$ , складывается из следующих частей

$$N_{\epsilon} = N_p + N_{\epsilon p} + N_{\text{дон}},$$

где  $N_p$  – мощность, затрачиваемая на размол топлива;  $N_{\epsilon p}$  – мощность, затрачиваемая на вращение пустого барабана;  $N_{\text{дон}} = 50$  кВт – мощность, затрачиваемая на маслосистему [24].

В [24] при проектировании ШБМ для расчета  $N_{\epsilon}$  используется эмпирическая формула. Определим функциональную зависимость  $N_{\epsilon}$  от степени загрузки барабана мельницы  $\psi_{\epsilon}$  из данных режимно-наладочных испытаний (рисунок 5.1)

$$\ln(N_{\epsilon} - N_{\epsilon p} - N_{\text{дон}}) = 7.354 + 0.56 \ln \psi_{\epsilon}. \quad (4.2)$$

Тогда, приводя (5.2) к стандартному виду [24], получаем

$$N_{\epsilon} = \frac{1}{\eta_{\text{эл}} \eta_{\text{пр}}} \left( 0.0746 D_{\epsilon}^3 L_{\epsilon} n_{\epsilon} \psi_{\epsilon}^{0.56} \gamma_{\text{н.ш}} K_{\text{бр}} K_{\text{мл}} + 1.86 D_{\epsilon} L_{\epsilon} n_{\epsilon} S_{\epsilon} \right) + N_{\text{дон}}, \quad (4.3)$$

где  $\gamma_{\text{н.ш}} = 4.9$  т/м<sup>3</sup> – насыпной удельный вес шаров;  $n_{\epsilon}$ ,  $S_{\epsilon}$  – число оборотов барабана и толщина стенки барабана;  $K_{\text{бр}}$  – коэффициент, учитывающий форму брони;  $K_{\text{мл}}$  – коэффициент, учитывающий свойства разматываемого топлива;  $\eta_{\text{эл}} = 0.92$  – КПД электродвигателя [24];  $\eta_{\text{пр}}$  – КПД привода.

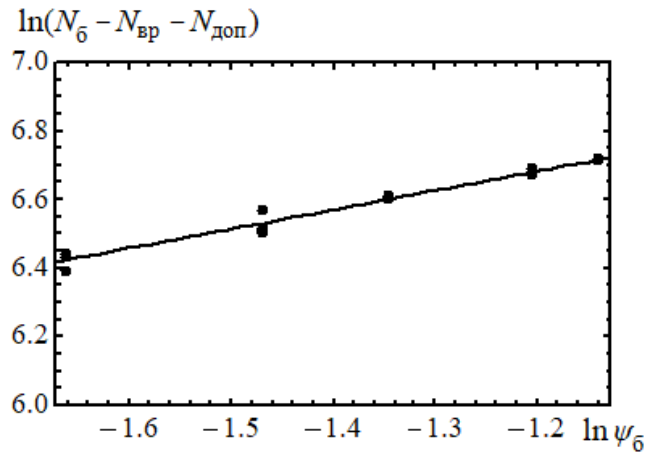


Рисунок 4.2 – Зависимость мощности, потребляемой мельницей ШК-32  $N_{\text{б}}$ , от степени загрузки барабана мельницы шарами  $\psi_{\text{б}}$

Оптимальный режим работы пылесистемы соответствует минимальному суммарному удельному расходу электроэнергии на размол  $\mathcal{E}_p$  и пневмотранспорта  $\mathcal{E}_{nm}$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_{nm} = \frac{N_{\text{б}}}{B_p} + \frac{N_{nm}}{B_p}, \quad (4.4)$$

где  $N_{nm}$  – мощность, затрачиваемая мельничным вентилятором на пневмотранспорт пыли;  $B_p$  – размольная производительность мельницы, определяемая из равенства (4.1).

Мощность, потребляемая мельничным вентилятором на пневмотранспорт в мельнице, в свою очередь зависит от расхода горячего воздуха  $V_{\text{г}}$  и сопротивления мельницы  $\Delta p_{\text{ШБМ}}$

$$N_{nm} = \frac{(1 + \mu)V_{\text{г}}\Delta p_{\text{ШБМ}}}{\eta_{\text{эл}}\eta_{\text{мг}}},$$

где  $\mu = B_c / (\rho_{\text{г}} V_{\text{г}}^{n_{\text{ф}}})$  – пылесодержание потока воздуха;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность воздуха при нормальных условиях;  $\eta_{\text{мг}}$  – КПД мельничного вентилятора.

Перепад давлений в мельнице состоит из двух частей: перепада давления  $\Delta p_{\text{гом}}$  при транспорте гомогенной пылевоздушной смеси и перепада давления  $\Delta p_{\text{инж}}$  за счет инъекции измельченных частиц в основной поток

$$\Delta p_{ШБМ} = \Delta p_{зол} + \Delta p_{инж}.$$

В предыдущих главах получены критериальные уравнения для этих составляющих перепада давлений в ШБМ.

Удельный расход энергии на пневмотранспорт угольной пыли равен

$$\mathcal{E}_{nm} = \frac{N_{nm}}{B_p} = \frac{(1 + \mu)V_g(\Delta p_{зол} + \Delta p_{инж})}{\eta_{эл}\eta_{мв}B_c}. \quad (4.5)$$

Тогда полные удельные энергозатраты на размол и транспорт угля в мельнице ШК-32 (уравнения (4.3)-(4.5)) равны

$$\mathcal{E}_{ШБМ} = \frac{0.0746D_\delta^3L_\delta n_\delta \psi_\delta^{0.56} \gamma_{н.ш} K_{бр} K_{мл} + 1.86D_\delta L_\delta n_\delta S_\delta + \eta_{эл}\eta_{пр}N_{дон}}{\eta_{эл}\eta_{пр}B_c} + \frac{(1 + \mu)V_g(\Delta p_{зол} + \Delta p_{инж})}{\eta_{эл}\eta_{мв}B_c}. \quad (4.6)$$

На рисунке 4.3 представлены зависимости, построенные по уравнению (4.6). Видно, что удельные затраты энергии на размол обратно пропорциональны расходу сушильного агента  $\mathcal{E}_p \propto (V_g^{нфв})^{-1}$ , а удельные затраты на транспорт пылегазового потока прямо пропорциональны квадрату расхода сушильного агента  $\mathcal{E}_{nm} \propto (V_g^{нфв})^2$ . Это обстоятельство обеспечивает наличие минимума удельных затрат энергии на пылеприготовление в ШК-32 при определенном значении  $V_g^{нфв}$ .

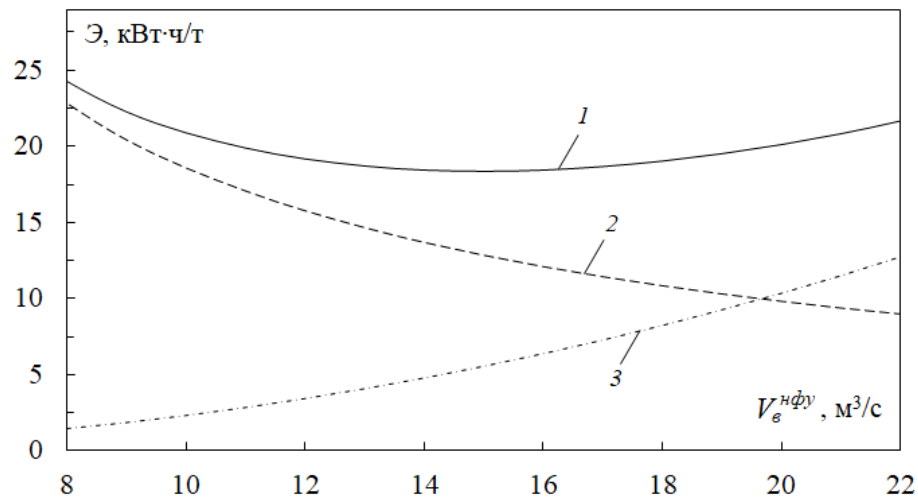


Рисунок 4.3. – Удельные энергозатраты мельницы ШК-32 на размол (1), пневмотранспорт (2), суммарные на пылеприготовление (3), рассчитанные по уравнению

(4.6) при  $\psi_{\sigma} = 0.23$ ,  $W^p = 25\%$ ,  $W^{nl} = 14\%$  и различных расходах воздуха через ШБМ при НФУ

### 4.3. Верификация полученных уравнений

На рисунке 4.4 показано сравнение экспериментальных и расчетных данных по уравнениям (4.1) и (4.6) удельных расходов энергии на пылеприготовление в мельнице ШК-32. Видно, что расчеты по уравнениям (4.1) и (4.6) согласуются с соответствующими экспериментальными данными  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{экс}$ , т.к. практически все точки лежат между пунктирными линиями  $0.95\mathcal{E}_{ШБМ}^{экс}$  и  $1.05\mathcal{E}_{ШБМ}^{экс}$ . Сплошная линия соответствует  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{экс} = \mathcal{E}_{ШБМ}$ . Отклонение аппроксимации энергозатрат ШБМ от эксперимента в основном не превышает 5%.

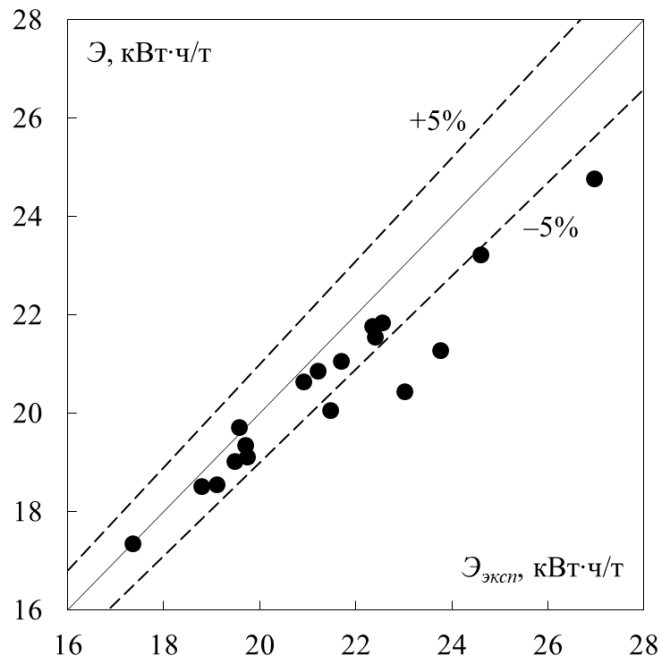


Рисунок 4.4 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных по удельным расходам электроэнергии на пылеприготовление мельницы ШК-32

На рисунке 4.5 изображено распределение относительной погрешности  $\Delta\mathcal{E}$  по количеству случаев  $n$  при сравнении расчетов по уравнениям (4.1) и (4.6) и экспериментальных данных. Относительная погрешность рассчитывалась, как  $\Delta\mathcal{E} = (\mathcal{E}_{ШБМ}^{экс} - \mathcal{E}_{ШБМ})100\% / \mathcal{E}_{ШБМ}^{экс}$ .

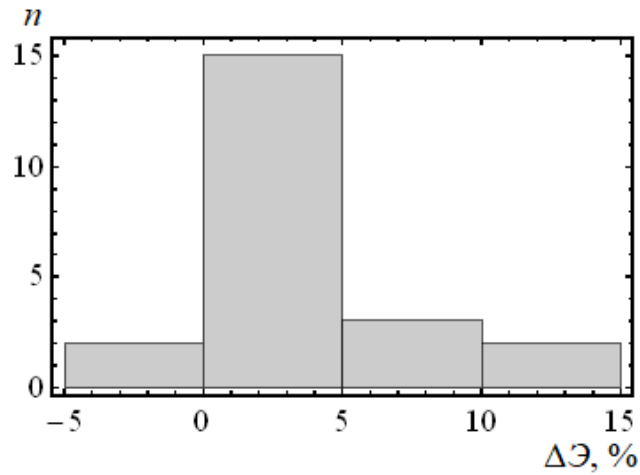
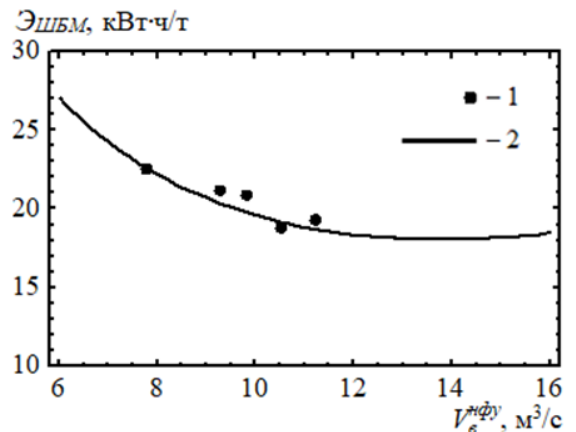
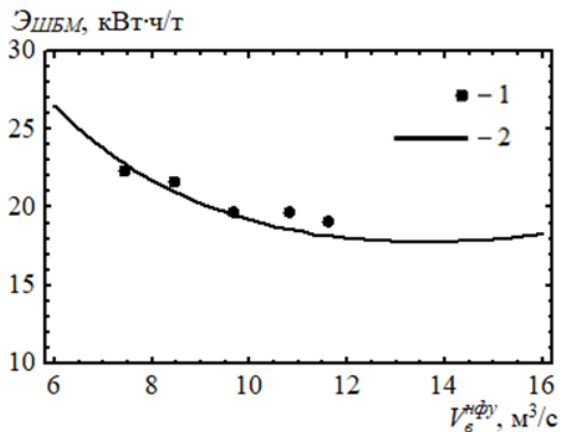
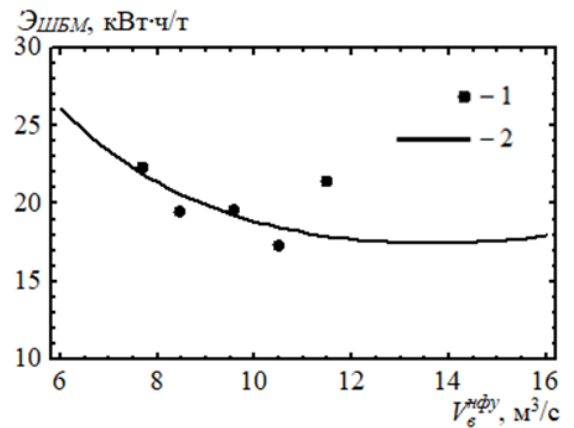
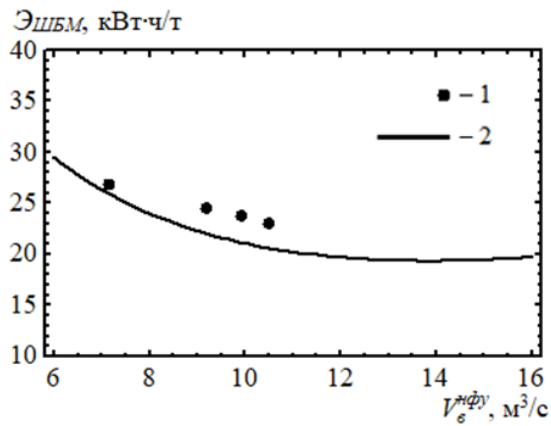
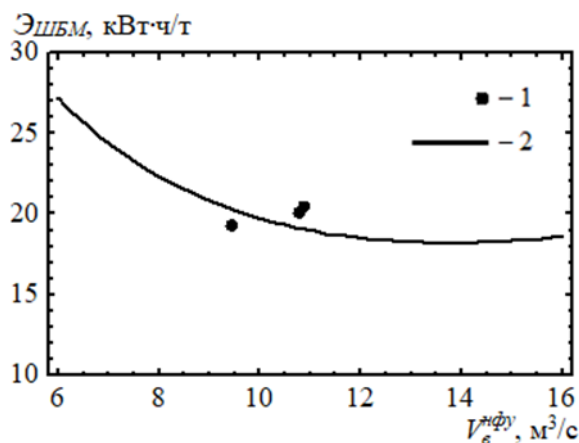


Рисунок 4.5 – Диаграмма распределения относительной погрешности  $\Delta Э$  по количеству случаев  $n$

На рисунках 4.6а-д представлены удельные энергозатраты, полученные из эксперимента (точки) и рассчитанные по уравнению (4.6) (линии) при различных степенях загрузки, расходах воздуха. Внешние параметры при расчетах по формулам (4.1) и (4.6) были усреднены для данных по каждому  $\psi_{\theta}$ .





Д

Рисунок 4.6 – Энергозатраты мельницы ШК-32 при различных расходах воздуха через ШБМ при НФУ и степени загрузки при размоле азейского бурого угля: 1 – опытные данные, 2 – расчет по (4.6) при средних значениях внешних параметров в серии экспериментов по  $\psi_{\delta}$ : а)  $\psi_{\delta} = 0.19$ ; б)  $\psi_{\delta} = 0.23$ ; в)  $\psi_{\delta} = 0.26$ ; г)  $\psi_{\delta} = 0.3$ ; д)  $\psi_{\delta} = 0.32$

На рисунках 4.6б-г видно, что энергозатраты на пылеприготовление в ШБМ, рассчитанные по уравнениям (4.1) и (4.6), с хорошей точностью совпадают с соответствующими экспериментальными данными. При этом энергозатраты минимальны при расходе воздуха в диапазоне  $V_{\text{с}}^{\text{нфy}} = 12 \div 15 \text{ м}^3/\text{с}$ , что соответствует оптимальному режиму работы мельницы. Основным показателем качества пыли в этом диапазоне изменения расхода воздуха  $R_{90} = 41 \div 57\%$  соответствует нормативным требованиям [24]. В ходе наладочных испытаний режим  $K_{\text{вен}} \approx 1$  не был реализован из-за недостаточной производительности мельничного вентилятора. На рисунках 4.6а и 4.6д экспериментальные и расчетные энергозатраты плохо согласуются, так как мельница в данных режимах работала, по-видимому, в условиях, близких к завалу [139, 140].

#### 4.4. Анализ влияния режимных и внешних параметров на энергоэффективность мельницы ШК-32

Уравнение (4.6) показывает, что удельный расход электроэнергии на пылеприготовление ШБМ с пылевым бункером зависит от степени шаровой загрузки

$\psi_{\sigma}$ , сушильной производительности  $B_c$  и расхода воздуха  $V_g$ . Сушильная производительность  $B_c$  определяется расходом воздуха через мельницу  $V_g^{н\phi y}$ , температурами воздуха  $t_{2\sigma}$  и  $t_{x\sigma}$ , температурой аэросмеси  $t_2$ , влажностью топлива  $W^p$ , влажностью пыли  $W^{nl}$ , степенью шаровой загрузки  $\psi_{\sigma}$  (уравнение 4.1). При этом величины  $t_2$  и  $W^{nl}$  нормированы:  $t_2 = 60 \div 65^\circ\text{C}$  и  $W^{nl} = 12 \div 14\%$  для ШБМ с пылевым бункером при сушке азейского угля воздухом [24, 141]. Оптимальной степенью загрузки барабана шарами, при которой энергия размола максимальна, для ШБМ с волнистой броней считается  $\psi_{\sigma} = 0.2$ . Таким образом, основными параметрами, влияющими на энергоэффективность ШБМ, являются  $V_g^{н\phi y}$ ,  $W^p$  и  $t_{2\sigma}$ .

Зависимость энергозатрат мельницы ШК-32 от влажности сырого угля и расхода воздуха через ШБМ, показанная на рисунке 4.7, рассчитана по формуле (4.6) при  $\psi_{\sigma} = 0.2$ ,  $t_{2\sigma} = 400^\circ\text{C}$ ,  $t_{x\sigma} = 30^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ ,  $W^{nl} = 14\%$  и  $W_1^p = 30\%$ ,  $W_2^p = 25\%$ ,  $W_3^p = 20\%$ . При влажности сырого угля  $W_1^p = 30\%$  минимум энергозатрат достигается при расходе воздуха через ШБМ  $V_{g,онт}^{н\phi y} = 14.8 \text{ м}^3/\text{с}$ , которому соответствует сушильная производительность  $B_c = 12.5 \text{ т/ч}$ , и составляет  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 23.96 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ ; при  $W_2^p = 25\%$  –  $V_{g,онт}^{н\phi y} = 13.8 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $B_c = 15.8 \text{ т/ч}$  и  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 18.9 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ ; при  $W_3^p = 20\%$  –  $V_{g,онт}^{н\phi y} = 12.2 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $B_c = 21.7 \text{ т/ч}$  и  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 13.75 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ . То есть при снижении влажности сырого угля снижаются энергозатраты и оптимальный расход воздуха через ШБМ, а производительность мельницы растет.

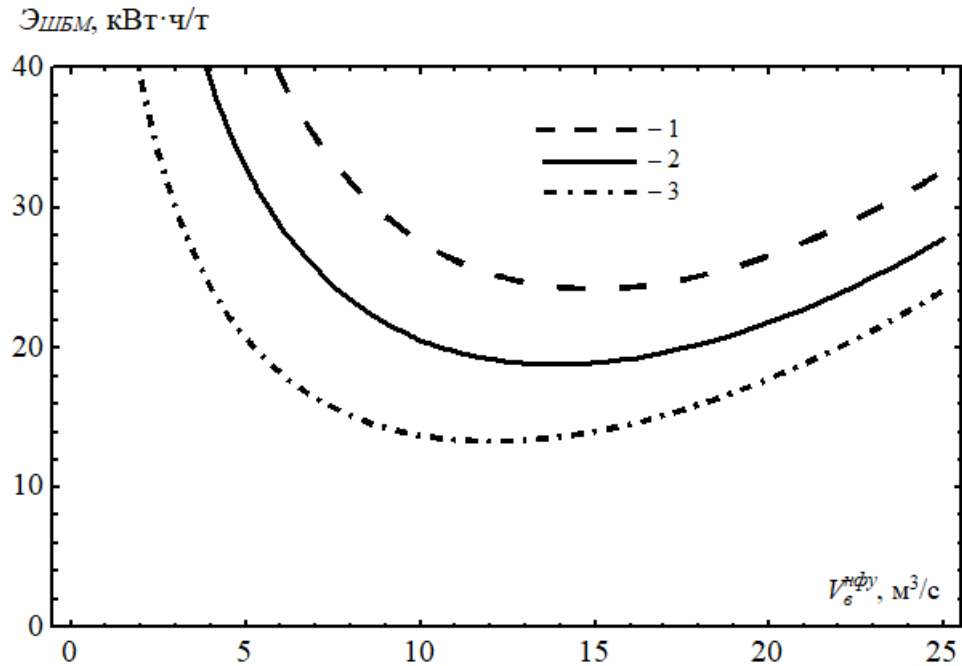


Рисунок 4.7 – Удельные энергозатраты мельницы ШК-32 при различных расходах воздуха через ШБМ при НФУ и влажности сырого угля на размол азейского бурого угля: 1 – при  $W^P = 30\%$ ; 2 – при  $W^P = 25\%$ ; 3 – при  $W^P = 20\%$

На рисунке 4.8 представлена зависимость энергозатрат мельницы ШК-32 от температуры горячего воздуха перед ШБМ и расхода воздуха через ШБМ. Она рассчитана по формуле (4.6) при  $\psi_{\phi} = 0.2$ ,  $W^P = 24\%$ ,  $W^{nl} = 14\%$ ,  $t_{x\phi} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\phi 1} = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\phi 2} = 350^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\phi 3} = 400^{\circ}\text{C}$ . При температуре горячего воздуха  $t_{\phi 1} = 300^{\circ}\text{C}$  минимум энергозатрат достигается при расходе воздуха через ШБМ  $V_{\phi,онт}^{нфy} = 15.6 \text{ м}^3/\text{с}$ , которому соответствует сушильная производительность  $B_c = 13.4 \text{ т/ч}$ , и составляет  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 22.1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ ; при  $t_{\phi 2} = 350^{\circ}\text{C}$  –  $V_{\phi,онт}^{нфy} = 14.5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $B_c = 15.2 \text{ т/ч}$  и  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 19.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ ; при  $t_{\phi 3} = 400^{\circ}\text{C}$  –  $V_{\phi,онт}^{нфy} = 13.6 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $B_c = 16.7 \text{ т/ч}$  и  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 17.87 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ . То есть при повышении температуры горячего воздуха снижаются энергозатраты и оптимальный расход воздуха через ШБМ, а производительность мельницы растет.



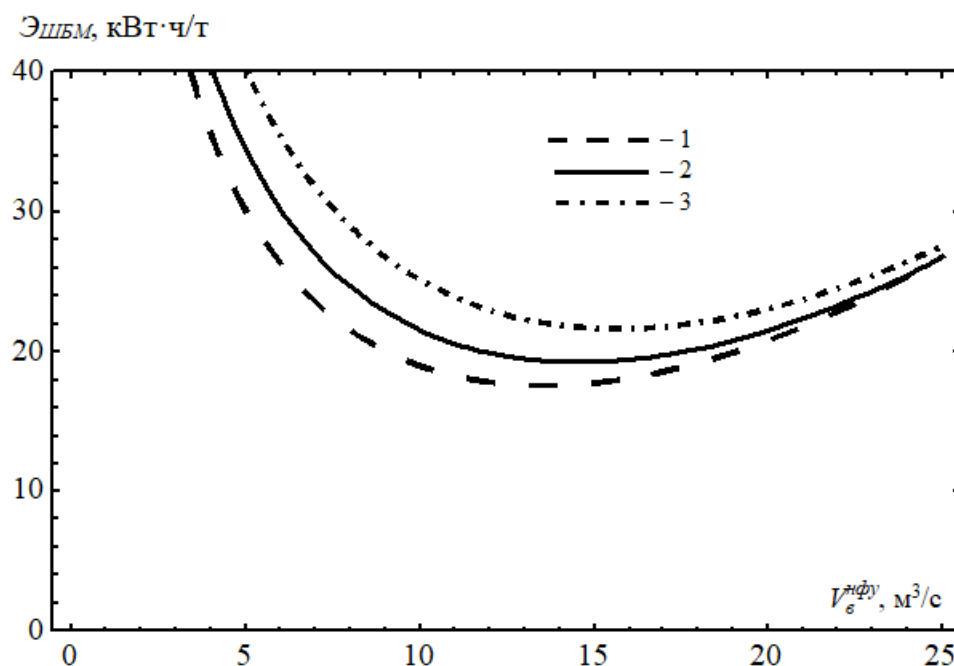


Рисунок 4.8 – Удельные энергозатраты мельницы ШК-32 при различных расходах воздуха через ШБМ при НФУ и температурах горячего воздуха на размол азейского бурого угля: 1 – при  $t_{гв} = 300^{\circ}\text{C}$ ; 2 – при  $t_{гв} = 350^{\circ}\text{C}$ ; 3 – при  $t_{гв} = 400^{\circ}\text{C}$

#### 4.5. Определение оптимальной производительности мельницы ШК-32 при размоле мугунского угля

Шаровая мельница с коническим барабаном ШК-32 Новокраматорского завода тяжелого машиностроения рассчитана на номинальную производительность 32 т/ч при шаровой загрузке 70 т и скорости вращения барабана 18 об/мин для размола АШ с коэффициентом размолоспособности  $k_{лo} = 0,95$ , глубиной предварительного дробления  $R_5 = 20\%$  и тониной помола пыли  $R_{90} = 7\%$ . В настоящее время на ТЭЦ-9 ПАО «Иркутскэнерго» мельница ШК-32 размалывает мугунский бурый уголь марки ЗБ. Тонина помола данного угля должна соответствовать  $R_{90} = 35\%$  и  $R_{200} = 12\%$  для обеспечения минимальных потерь с механическим недожогом [24, 141]. То есть, необходим пересчет производительности мельницы ШК-32 и затрат электроэнергии на пылеприготовление.

На рисунке 4.9 показаны суммарные энергозатраты мельницы ШК-32 при размоле мугунского угля, рассчитанные по уравнению (4.6) при различных расхо-

дах воздуха через ШБМ  $V_e^{нф\у}$ ,  $\psi_{\sigma} = 0.2$ ,  $W^P = 22\%$ ,  $W^{nl} = 14\%$ ,  $t_{x\sigma} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\sigma} = 400^{\circ}\text{C}$ .

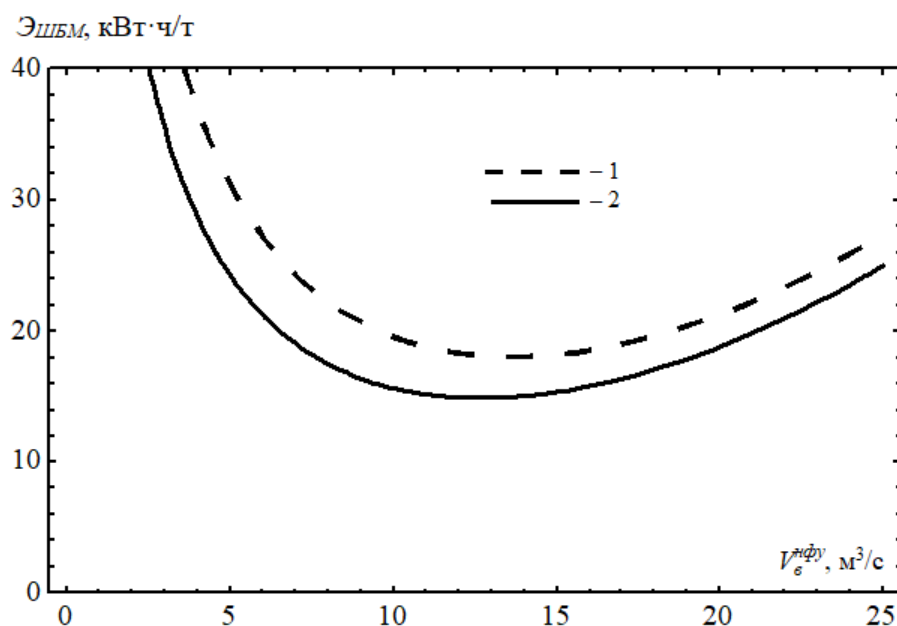


Рисунок 4.9 – Удельные энергозатраты мельницы ШК-32 при различных расходах воздуха через ШБМ при НФУ на размол: 1 – азейского бурого угля; 2 – мугунского бурого угля

Из рисунка 4.9 видно, что минимум энергозатрат на размол мугунского угля достигается при расходе воздуха через ШБМ  $V_{e,опт}^{нф\у} = 12.9 \text{ м}^3/\text{с}$ , которому соответствует сушильная производительность  $B_c = 68 \text{ т/ч}$ , и составляет  $\mathcal{E}_{ШБМ}^{мин} = 15.82 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ , что примерно на 20% меньше, чем при размолу азейского угля.

#### 4.6. Выводы по главе 4

Получено уравнение (4.6), которое позволяет рассмотреть минимизацию энергии, затрачиваемой на размол и транспорт угольной пыли в ШБМ ШК-32. Анализ этого выражения показывает, что удельные затраты энергии на размол обратно пропорциональны расходу сушильного агента  $\mathcal{E}_p \propto (V_e^{нф\у})^{-1}$ , а удельные затраты на транспорт пылегазового потока прямо пропорциональны квадрату рас-

хода сушильного агента  $\mathcal{E}_{nm} \propto (V_e^{нфy})^2$ . Это обстоятельство обеспечивает наличие минимума удельных затрат энергии на пылеприготовление в ШК-32.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает, что математическая модель режима равенства размольной и сушильной производительности ШБМ адекватно описывает процессы, протекающие при подготовке топлива к сжиганию.

Показано, что повышение эффективности пылесистем с шаровой барабанной мельницей можно осуществить при подробном исследовании транспорта угольной пыли. Снижение удельных затрат энергии даже на 1-3 кВт·ч/т позволит добиться значительной суммарной годовой экономии электроэнергии.

## Заключение

Данная работа посвящена повышению энергоэффективности систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами при работе на непроектных углях с использованием методов численного моделирования.

Основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Разработан подход к решению проблемы повышения энергоэффективности систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами при работе на непроектных углях, основанный на моделировании пневмотранспорта угольной пыли.

2. Предложена математическая модель аэродинамического сопротивления шаровых барабанных мельниц и центробежных сепараторов пыли, согласно которой полное аэродинамическое сопротивление складывается из  $\Delta P_{гом}$  – потерь давления гомогенного потока газовзвеси, вызванных трением и местными потерями, и  $\Delta P_{инж}$  – потерь давления, обусловленных инжекцией угольных частиц в поток воздуха.

Установлено, что аэродинамическое сопротивление шаровых барабанных мельниц состоит на 80% из  $\Delta P_{инж}$  и на 20% из  $\Delta P_{гом}$ , аэродинамическое сопротивление центробежных сепараторов – на 50% из  $\Delta P_{инж}$  и на 50% из  $\Delta P_{гом}$ .

3. Получены критериальные уравнения, описывающие зависимость аэродинамического сопротивления элементов пылесистем от средней скорости витания и среднего диаметра частиц угольной пыли.

Коэффициент сопротивления гомогенного потока угольной газовзвеси для шаровых барабанных мельниц

$$\xi_{гом} = 1200 \frac{(1 + \mu)^{0,6}}{Re_g^{0,4}} k_L$$

Коэффициент сопротивления, вызванного инжекцией частиц, для шаровых барабанных мельниц

$$\xi_{инж} = 36,6(1 + \mu) k_{вит}^{0,0216} k_L,$$

$$\xi_{инж} = 36,6(1 + \mu)k_d^{0,0432}k_L.$$

Коэффициент сопротивления гомогенного потока угольной газозвеси для центробежных сепараторов пыли

$$\xi_{гом}^{ce} = 9,12 \cdot 10^{-4} \mu^{ce} (1 + \mu^{ce})^{0,343} \text{Re}_e^{0,657}.$$

Коэффициент сопротивления, вызванного инжекцией частиц, для центробежных сепараторов пыли

$$\xi_{инж}^{ce} = 16,7 \mu_{ce}^{1,5} (1 + \mu) k_{вум}^{0,16},$$

$$\xi_{инж}^{ce} = 16,7 \mu_{ce}^{1,5} (1 + \mu) k_d^{0,317}.$$

Пределы применимости полученных уравнений:

$$\text{Re}_e = 3 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6,$$

$$\mu = 0,16 \div 0,76,$$

$$k_{вум} = 0,6 \div 6,8,$$

$$k_d = 0,8 \div 2,6.$$

Полученные уравнения согласуются с известными формулами для определения потерь давления и с экспериментальными данными.

4. Предложена формула, позволяющая найти минимальный удельный расход электроэнергии на пылесистему с мельницей ШК-32, исходя из режима равенства сушильной и размольной производительностей

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ШБМ} = & \frac{0.0746 D_{\sigma}^3 L_{\sigma} n_{\sigma} \psi_{\sigma}^{0,56} \gamma_{н.ш} K_{\sigma p} K_{мл} + 1.86 D_{\sigma} L_{\sigma} n_{\sigma} S_{\sigma} + \eta_{эл} \eta_{пр} N_{дон}}{\eta_{эл} \eta_{пр} B_c} + \\ & + \frac{(1 + \mu) V_e (\xi_{гом} + \xi_{инж}) \Delta p_e}{\eta_{эл} \eta_{мс} B_c}. \end{aligned}$$

Так минимальные затраты на размол азейского угля влажностью  $W^p = 25\%$  с шаровой загрузкой  $\psi_{\sigma} = 0,2$  достигаются при  $V_{e,опт}^{нфу} = 13,8 \text{ м}^3/\text{с}$  (что соответствует производительности мельницы  $B = 57 \text{ т/ч}$ ) и составляют  $\mathcal{E}_{ШБМ} = 18,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ ; при размолу мугунского угля ( $W^p = 22\%$ ,  $\psi_{\sigma} = 0,2$ ) минимум энергозатрат получается при  $V_{e,опт}^{нфу} = 12,9 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $B = 68 \text{ т/ч}$ ) и равен  $15,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ .

Средние отклонения результатов расчетов по предложенной формуле от аналогичных экспериментальных данных находятся в диапазоне  $\pm 5\%$ .

5. Полученные результаты внедрены в ПАО «Иркутскэнерго» для определения энергозатрат пылесистемы с мельницей ШК-32 при размоле мугунского бурого угля до тонины помола  $R_{90} = 35\%$  (Приложение А).

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/node/1026>
2. Потапов, Ф.П. Интенсификация процесса помола в шаровых барабанных мельницах / Ф.П. Потапов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2011.
3. Пистун, Е. Автоматизация шаровых барабанных мельниц для ТЭС / Е. Пистун, В. Заграй, Г. Николин // Разработки электроэнергетики. – 1997. – № 3. – С. 50-54.
4. Втюрин, Ю.Н. Повышение надежности и улучшение технико-экономических показателей углеразмольного оборудования и пылесистем ТЭС / Ю.Н. Втюрин, Л.А. Летин, А.М. Бычков, В.М. Шенаев, А.Б. Волков // Теплоэнергетика. – 2000. – № 7. – С. 44-51.
5. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства: учебное пособие / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган; под ред. Д.М. Хзмаляна. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
6. Левит, Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях / Г.Т. Левит. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 384 с.
7. Лебедев, А.Н. Подготовка и размол топлива на электростанциях / А.Н. Лебедев. – М.: Энергия, 1969. – 520 с.
8. Назмеев, Ю.Г. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: справочное пособие / Ю.Г. Назмеев, М.: МЭИ, 2005. – 480 с.
9. Назмеев, Ю.Г. Оценка эффективности работы системы пылеприготовления при использовании углей ухудшенного качества/ Ю.Г. Назмеев, Г.Р. Мингалеева. // Уголь, 2006. – № 9 (967). – С. 50-51.
10. Мингалеева, Г.Р. Эффективность работы промышленных теплоэнергетических систем при увеличении доли использования твердого топлива / Г.Р. Мингалеева: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Казань, 2010. – 32 с.
11. Богданов, В.С. Оптимизация мелющей загрузки барабанных мельниц: монография / В.С. Богданов, Ф.П. Потапов. – Белгород: БГТУ, 2012. – 104 с.

12. Голышев, Л.В. Определение режимов эффективного размола угля в шаровой барабанной мельнице / Л.В. Голышев, Ф.Е. Гут // Энергетик. – 2013. – № 4. – С. 66-69.

13. Голышев, Л.В. Метод определения шаровой загрузки и производительности мельницы по мощности, потребляемой электродвигателем ШБМ / Л.В. Голышев, И.С. Мысак // Теплоэнергетика. – 2012. – № 8. – С. 19-22.

14. Голышев, Л.В. Определение шаровой загрузки мельницы типа ШБМ с учетом износа брони / Л.В. Голышев, И.С. Мысак // Энергетик. – 2013. – № 2. – С. 60-61.

15. Шувалов, С.И. Влияние структуры пылесистемы на ее производительность / С.И. Шувалов, А.А. Веренин, О.А. Ворошилов // Теплоэнергетика. – 2018. – № 11. – С. 54-61.

16. Шувалов, С.И. Математическая модель пылесистемы с шаровой барабанной мельницей для анализа схем классификации / С.И. Шувалов, С.С. Новосильцева, А.А. Веренин, О.А. Ворошилов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 8. – С. 10-18.

17. Вараксин, А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / А. Ю. Вараксин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.

18. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу; под ред. М.Е. Дейча. – М.: Мир, 1971. – 536 с.

19. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис; под ред. И.Т. Аладьева. – М.: Мир, 1972. – 440 с.

20. Нигматулин, Р.И. Основы механики гетерогенных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

21. Зайчик, Л.И. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости / Л.И. Зайчик, В.М. Алипченков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 312 с.

22. Деревич, И.В. Статистическое описание турбулентного потока газозвеси крупных частиц, соударяющихся со стенками канала / И.В. Деревич // Инженерно-физический журнал. – 1994. – № 4. – С. 387.



23. Дзядзио, А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А.М. Дзядзио, А.С. Кеммер. – М.: Колос, 1967. – 295 с.

24. Соколов, Н.В. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (Нормативные материалы) / Н.В. Соколов, М.Л. Кисельгоф. – Л.: ОНТИ ЦКТИ, 1971. – 312 с.

25. Вебер, М. Потоки газа с частицами: справочник по теплообменникам: в 2 т. / М. Вебер, У. Стегмайер; под общ. ред. О. Г. Мартыненко. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 1 т.

26. Сукомел, А.С. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах / А.С. Сукомел, Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.

27. Елизаров, В.В. Отчет по тепловым испытаниям котла ТП-81 и пылесистемы 5А Иркутской ТЭЦ 9 / В.В. Елизаров, В.П. Сеннов. – Иркутск: РЭУ «Иркутскэнерго», 1970. – 234 с.

28. Елизаров, В.В. Отчет по тепловым испытаниям котла ПК-24 ст. №7 Иркутской ТЭЦ-10 при сжигании азейского угля / В.В. Елизаров, Б.А. Александров, В.Б. Александров. – Иркутск: РЭУ «Иркутскэнерго», 1975. – 112 с.

29. Иванов, С.Д. Определение параметров аэродинамического сопротивления элементов оборудования систем пылеприготовления котельных агрегатов по экспериментальным данным / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 199-206.

30. Иванов, С.Д. Моделирование аэродинамического сопротивления мельницы ШК-32 пылесистемы 5А котла ТП-81 ИТЭЦ-9 / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 т. / под общ. ред. В.В. Федчишина. – 2015. – Т. 1. – С. 210-212.

31. Ощепков, В.В. Моделирование аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы (ШБМ) / В.В. Ощепков // Системные исследования в

энергетике: тезисы статей XLV конференции-конкурса молодых ученых. – 2015. – С. 36.

32. Ощепков, В.В. Моделирование аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы (ШБМ) / В.В. Ощепков // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых. – 2015. – Вып. 45. – С. 98-101.

33. Ощепков, В.В. Математическая модель аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы при транспорте угольной газозвеси / В.В. Ощепков, С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: тезисы докладов IX Всерос. конф. с междунар. участием. – 2015. – С. 106.

34. Ощепков, В.В. Математическая модель аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы при транспорте угольной газозвеси / В.В. Ощепков, С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: материалы IX Всерос. конф. с междунар. участием. – 2015. – С. 106-110.

35. Иванов, С.Д. Определение оптимальных рабочих параметров шаровой барабанной мельницы ШК-32 / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 т. / под общ. ред. В.В. Федчишина. – 2016. – Т. 1. – С. 170-172.

36. Ощепков, В.В. Оптимизация рабочих параметров шаровой барабанной мельницы ШК-32 / В.В. Ощепков // Системные исследования в энергетике: тезисы статей XLV конференции-конкурса молодых ученых. – 2016. – С. 39.

37. Ощепков, В.В. Оптимизация рабочих параметров шаровой барабанной мельницы ШК-32 / В.В. Ощепков // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых. – 2016. – Вып. 45. – С. 86-90.

38. Иванов, С.Д. Моделирование аэродинамического сопротивления сепараторов пылесистем котлов ПК-24 и ТП-81 / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 9 (116). – С. 95-102.

39. Иванов, С.Д. Модель оптимизации параметров размола шаровой барабанной мельницы ШК-32 / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 10 (117). – С. 128-134.

40. Ощепков, В.В. Оптимизация рабочих параметров шаровой барабанной мельницы Ш-16 / В.В. Ощепков, М.С. Ганюшкин, С.Д. Иванов // Теплоэнергетика. Энергия-2017. Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 04-06 апреля 2017 г., г. Иваново: материалы конференции. – Иваново: ИГЭУ, 2017. – В 6 т. Т. 1. – С. 12-13.

41. Иванов, С.Д. Аэродинамическое сопротивление шаровой барабанной мельницы при транспорте полидисперсной угольной газозвеси / С.Д. Иванов, А.Н. Кудряшов, В.В. Ощепков // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91. – № 2. – С. 371-376.

42. Ivanov, S.D. Aerodynamic resistance of a ball-tube mill during transport of a polydisperse coal gas suspension / S.D. Ivanov, A.N. Kudryashov, V.V. Oshchepkov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Т. 91. – № 2. – P. 349-354.

43. Иванов, С.Д. Определение оптимальной производительности шаровой барабанной мельницы при размоле бурых углей / С. Д. Иванов, А. Н. Кудряшов, В. В. Ощепков // Теплоэнергетика. – 2021. – № 2. – С. 61-67.

44. Oshchepkov, V.V. Determining optimum productivity of a ball drum mill when milling brown coals / S.D. Ivanov, A.N. Kudryashov, V.V. Oshchepkov // Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 68. – № 2. – P. 136-141.

45. Ромадин, В.П. Пылеприготовление / В.П. Ромадин. – Л.: ГЭИ, 1953. – 519 с.

46. Толчинский, Е.Н. Выбор тонкости помола угольной пыли / Е.Н. Толчинский, А.Ю. Лаврентьев // Электрические станции. – 2002. – № 12. – С. 17-20.

47. Мысак, С.И. Метод определения шаровой загрузки и удельного расхода мелющих шаров мельницы ШБМ 370/850 (Ш-50А) пылеугольных котлов энерго-

блоков ТЭС / С.И. Мысак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3 (134). – С. 41-48.

48. Лейкин, В.З. Основные закономерности процессов и действие принципа минимальных затрат энергии при пневмотранспорте и распределении мелкодисперсной пыли в пылесистемах с прямым вдуванием / В.З. Лейкин // Теплоэнергетика. – 2015. – №8. – С. 28-35.

49. Лейкин, В.З. Анализ и расчёт эффективности сепаратора мельницы при его работе в замкнутом цикле / В.З. Лейкин // Электрические станции. – 2015. – № 9. – С. 25-29.

50. Улитенко, К.Я. Оптимизация шаровой загрузки барабанных мельниц по потребляемой нагрузке / К.Я. Улитенко // Обогащение руд. – 2008. – № 5. – С. 42-44.

51. Андреев, Е.Е. О модели процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице / Е.Е. Андреев, А.Г. Кулаков // Обогащение руд. – 2009. – № 4. – С. 3-7.

52. Ястребов, К.Л. Расчет мощности, потребляемой барабанными мельницами / К.Л. Ястребов, М.Д. Николаев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 56-59.

53. D.W. Fuerstenau, A.-Z.M. Abouzeid. The energy efficiency of ball milling in comminution // Int. J. Miner. Process. 2002. V. 67. P. 161-185.

54. W. Xie, Y. He, Z. Ge et al. An analysis of the energy split for grinding coal/calcite mixture in a ball-and-race mill // Minerals Engineering. 2016. V. 93. P. 1-9.

55. S. Nkwanyana, B. Loveday. Addition of pebbles to a ball-mill to improve grinding efficiency – Part 2 // Minerals Engineering. 2018. V. 128. P. 115-122.

56. M. Broseghini, M. D’Incau, L. Gelisio et al. Numerical and experimental investigations on new jar designs for high efficiency planetary ball milling // Advanced Powder Technology. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.04.027>.

57. Догин, М.Е. Зависимость сопротивления пневмотранспортных трубопроводов от основных параметров двухфазного потока / М.Е. Догин, В.П. Лебедев // Инженерно-физический журнал. – 1961. – Т. 4. – №8. – С. 93-99.

58. Карпов, А.И. Сопротивление труб при пневмотранспорте зерновых продуктов / А.И. Карпов // Изв. Вузов. Сер. Пищевая технология. – 1961. – № 1. – С. 30-35.

59. Сукомел, А.С. Экспериментальное исследование сопротивления при движении воздушно-графитовой взвеси в трубах / А.С. Сукомел, Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. 22. – № 4. – С. 597-602.

60. Керимов, Р.В. Экспериментальное исследование влияния различных факторов на местную теплоотдачу при турбулентном движении запыленного воздуха в круглой трубе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.274 / Керимов Расул Валиевич. – М., 1970. – 24 с.

61. Muschelknautz, E. Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die druckverluste pneumatische Forderungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht / E. Muschelknautz // VDI-For. 476. – 1959. – S. 32.

62. Вараксин, А.Ю. Экспериментальное исследование влияния твердых частиц на турбулентное течение воздуха в трубе / А.Ю. Вараксин, Ю.В. Полежаев, А.Ф. Поляков // Теплофизика высоких температур. – 2000. – Т. 38. – № 5. – С. 792-798.

63. Алипченков, В.М. Моделирование турбулентного движения частиц в вертикальном канале / В.М. Алипченков, Л.И. Зайчик // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2006. – № 4. – С 50-65.

64. Зайчик, Л.И. Моделирование движения частиц в неоднородном турбулентном потоке на основе функции плотности вероятности / Л.И. Зайчик // Прикладная математика и механика. – 1997. – Т. 61. – Вып. 1. – С. 132-138.

65. Картушинский, А.И. Моделирование движения концентрированного газодисперсного потока в горизонтальном канале / А.И. Картушинский, Э.Э. Михаэлидес, Ю.А. Руди // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2006. – № 2. – С. 76-87.

66. Кондратьев, Л. В. Моделирование двухфазного турбулентного течения на стабилизированном участке трубы / Л.В. Кондратьев // Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента. Ч. 2. – 1985. – С. 144-148.

67. Тайлашева, Т.С. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования / Т.С. Тайлашева, А.В. Гиль, Е.С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 121-127.

68. Гастерштадт, И. Пневматический транспорт / И. Гастерштадт. – Л.: Изд-во сев.-зап. обл. промбюро ВСНХ, 1927. – 119 с.

69. Цветков, Ф.Ф. Результаты измерений гидравлического сопротивления при движении в трубах запыленного воздуха / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов // Труды МЭИ. – 1971. – Вып. 81. – С. 27-32.

70. Сукомел, А.С. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления при турбулентном движении газовой взвеси в вертикальной трубе / А.С. Сукомел, Ю.В. Клименко, Н.В. Булычева // Труды МЭИ. – 1974. – Вып. 177. – С. 15-20.

71. Сукомел, А.С. Результаты измерений локальных значений коэффициентов гидравлического сопротивления при турбулентном движении газовой взвеси в круглой трубе / А.С. Сукомел, Ю.В. Клименко, Ф.Ф. Цветков // Труды МЭИ. – 1975. – Вып. 235. – С. 100-107.

72. Richardson, J.F. Pressure drop in gas-solid system flowing in one-inch pipe / J.F. Richardson, M. McLeman // Trans. Instn Chem. Engrs. – 1960. Vol. 38. – P. 257.

73. Шрайбер, А.А. Турбулентные течения газовой взвеси / А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 240 с.

74. Zhou, L. Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion / L. Zhou. – Florida: CRC Press, 1993. – 210 p.

75. Волков, Э.П. Моделирование горения твердого топлива / Э.П. Волков, Л.И. Зайчик, В.А. Першуков. – М.: Наука, 1994. – 320 с.

76. Gorbis, Z.R. Momentum and Heat Transfer in Turbulent Gas-Solid Flows / Z.R. Gorbis, E.E. Spokoyny. – New York: Begell House Inc., 1995. – 210 p.

77. Crowe, C. Multiphase flows with droplets and particles / C. Crowe, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. – Boca Raton: CRS Press, 1998. – 210 p.
78. Eaton, J.K. Preferential concentration of particles by turbulence / J.K. Eaton, J.R. Fessler // *Int. J. Multiphase Flow*. – 1994. – Vol. 20. – P. 169.
79. Elghobashi, S.E. On predicting particle-laden turbulent flows / S.E. Elghobashi // *Appl. Sci. Res.* – 1994. – Vol. 52. – P. 309.
80. McLaughlin, J.B. Aerosol particle deposition in numerically simulated channel flow / J.B. McLaughlin // *Phys. Fluids*. – 1989. – № 7. – P. 1211.
81. Crowe, C. Numerical models for two-phase turbulent flows / C. Crowe, T. Troutt, J. Chung // *Annual Review Fluid Mech.* – 1996. – Vol. 28. – P. 11.
82. Simonin, O. Second-moment prediction of dispersed-phase turbulence in particle-laden flows / O. Simonin // 8<sup>th</sup> Symp. on Turbulent Shear Flows – 1991. – P. 741.
83. Зайчик, Л.И. Проблемы моделирования газодисперсных турбулентных течений с горением и фазовыми переходами / Л.И. Зайчик, В.А. Першуков. – 1996. – № 5. – С. 3.
84. Loth, E. Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles / E. Loth // *Progress in Energy and Combust. Sci.* – 2000. – Vol. 26. – P. 161.
85. Sommerfeld, M. Numerical simulation of the particle dispersion in turbulent flow: the importance of particle lift forces and different particle/wall collision models / M. Sommerfeld // *Numerical Methods for Multiphase Flows*. ASME. – 1990. – Vol. 91. – P. 11.
86. Mashayek, F. Analytical description of particle/droplet-laden turbulent flows / F. Mashayek, R.V.R Pandya // *Progress in Energy and Combust. Sci.* – 2003. – Vol. 29. – P. 329.
87. Dalla Valle, J. M. Micromeritics, the technology of fine particles / J. M. Dalla Valle. – New York: Pitman, 1948. – 555 p.
88. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
89. Green, H.L. Particle Clouds, Dusts, Smokes and Mists / H. L. Green, W. R. Lane. – London: E. and F. N. Spon Ltd., 1957. – 210 p.

90. Паттерсон, Г. Н. Молекулярное течение газов / Г. Н. Паттерсон. – М.: Физматгиз, 1960. – 252 с.
91. Кляцкин, В.И. Стохастические уравнения и волны в случайно-неоднородных средах / В.И. Кляцкин. – М.: Наука, 1980. – 336 с.
92. Кляцкин, В.И. Кластеризация поля плотности числа малоинерционных частиц в случайных бездивергентных гидродинамических потоках / В.И. Кляцкин, Т. Эльперин // Журнал эксперимент. и теорет. физики. – 2002. – Вып. 2. – С. 689-710.
93. Reeks, M.W. On model equations for particle dispersion in inhomogeneous turbulence / M.W. Reeks // Int. J. Multiphase Flow. – 2005. – Vol. 31 – P. 93-114.
94. Hyland, K.E. Derivation of a pdf kinetic equation for the transport of particles in turbulent flows / K.E. Hyland, S. McKee, M.W. Reeks // G. Phys. A: Math. Gen. – 1999. – Vol. 32. – P. 6169-6190.
95. Swailes, D.C. A generalized Fokker-Plank equation for particle transport in random media / D.C. Swailes, K.F.F. Darbyshire // Physica A. – 1997. Vol. 24. – P. 38-48.
96. Pozorski, J. Derivation of a kinetic equation for dispersed particles in turbulent flows / J. Pozorski // J. Theor. Appl. Mech. - 1998. – Vol. 36. – № 1. – P. 31-46.
97. Minier, J.-P. PDF model based on Langevin equation for polydispersed two-phase flows applied to bluff-body gas-solid flow / J.-P. Minier, E. Peirano // Phys. Fluids. – 2004. – Vol. 16. – № 7. – P. 2419-2431.
98. Pandya, R.V.R. Non-isothermal dispersed phase of particles in turbulent flow / R.V.R Pandya, F. Mashayek // J. Fluid Mech. – 2003. – Vol. 475. – P. 205-245.
99. Zhou, L.X. Particle turbulent energy transport equation in suspension two-phase flow / L.X. Zhou, X. Huang // Fluid Mech.: Proc. Beijing Int. Conf. on fluid Mech. – 1988. – P. 791-793.
100. Simonin, O. Combustion and turbulence in two-phase flows: continuum modelling of two-phase flows / O. Simonin // Lecture series. – 2002.
101. Зайчик, Л.И. Моделирование вторых моментов пульсаций скорости и температуры частиц в равновесных турбулентных течениях / Л.И. Зайчик, В.М.



Алипченков // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т. 39. – № 5. – С. 426-441.

102. Деревич, И.В. Гидродинамика и тепломассоперенос частиц при турбулентном течении газозвеси в осесимметричной трубе / И.В. Деревич // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40. – № 1. – С. 86-99.

103. Pialat, X. Direct coupling between Lagrangian and Eulerian approaches in turbulent gas-particle flows / X. Pialat, O. Simonin, P. Villedieu // ASME Fluids Eng. Summer Conf. – 2006. – DOI: 10.1115/FEDSM2006-98122.

104. Барановский, С.И. Особенности высокоскоростных двухфазных газожидкостных струй / С.И. Барановский // Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента. – 1985. – С. 60-65.

105. Зайчик, Л.И. Проблемы моделирования газодисперсных турбулентных течений с горением или фазовыми переходами (обзор) / Л.И. Зайчик, В.А. Першуков // Изв. РАН. МЖГ. – 1996. – № 5. – С. 3-19.

106. Crowe, C.T. Review-numerical models for dilute gas-particles flows / C.T. Crowe // Trans. ASME. J. Fluids Eng. – 1982. – Vol. 104. – № 3. – P. 297-303.

107. Elghobashi, S. Particle-laden turbulent flows: direct simulation and closure models / S. Elghobashi // Appl. Sci. Res. – 1991. – Vol. 48. – P. 301-314.

108. Owen, P.R. Pneumatic transport / P.R. Owen // J. Fluid Mech. – 1969. – Vol. 39. – Pt. 2. – P. 407-432.

109. Gore, R.A. Effect of particle size on modulating turbulent intensity / R.A. Gore, C.T. Crowe // Int. J. Multiphase Flow. – 1989. – Vol. 15. – № 2. – P. 279-285.

110. Gore, R.A. Modulation of turbulence by a dispersed phase / R.A. Gore, C.T. Crowe // Trans. ASME. J. Fluids Eng. – 1991. – Vol. 113. – № 2. – P. 304-307.

111. Varaksin, A.Y. Review: turbulence modification in gas-solid two-phase wall-bounded flows / A.Y. Varaksin, Y. Kurosaki, I. Satoh // Thermal Science and Engineering. – 1995. – Vol. 3. – № 2. – P. 1-8.

112. Хаустов, С.А. Совершенствование конструктивных схем жаротрубных котлов на основе численного моделирования процессов горения и тепломассообмена: дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2016.

113. Фрост, У. Турбулентность. Принципы и применение / У. Фрост, Т. Моулден. – М.: Мир, 1980. – 220 с.
114. Снегирев, А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие / А.Ю. Снегирев. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – 143 с.
115. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. – 108 с.
116. Cebeci, T. Analysis of Turbulent Boundary Layers / T. Cebeci, A.M.O. Smith. – New York: Academic Press, 1974. – 418 p.
117. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 728 с.
118. Шумихин, А.А. Численное моделирование турбулентного диффузионного пламени на основе метода крупных вихрей / А.А. Шумихин, А.И. Карпов // Ижевск: Изд-во УрО РАН. – 2012. – Т. 5. – № 2. – С. 199-207.
119. Yakhot, V. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique / V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, C.G. Speziale // Physics of Fluids A. – 1992. – Vol. 4. – № 7. – P. 1510-1520.
120. Волков, К.Н. Течение и теплообмен в каналах и вращающихся полостях / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. – 488 с.
121. Bardina, J.E. Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development / J.E. Bardina, P.G. Huang, T.J. Coakley // NASA Technical Memorandum. – 1997. – P. 110446.
122. Юрченко, Д.Д. Моделирование теплообмена в каналах с интенсификаторами / Д.Д. Юрченко // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2009. – Т. 10. – С. 32-34.
123. Nicklin, G.J.E. Augmented heat transfer in a square channel with asymmetrical turbulence promotion / G.J.E. Nicklin // Final year project report, Dept. of Mech. Eng., UMIST, Manchester. – 1998.
124. Окулов, В.Л. Вихревой триплет / В.Л. Окулов, И.В. Наумов, Ж.Н. Соренсен // ДАН. – 2006. – Т. 409. – № 3. – С. 333-337.

125. Grotjans, H. Wall Functions for General Application CFD Codes / H. Grotjans, F.R. Menter // In ECCOMAS 98 Proceedings of the Fourth European Computational Fluid Dynamics Conference: John Wiley & Sons. – 1998. – P. 1112-1117.

126. Wilcox, D.C. Multiscale Model for Turbulent Flows / D.C. Wilcox // In AIAA 24th Aerospace Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 1986. – 15 p.

127. Menter, F.R. Multiscale Model for Turbulent Flows // In 24th Fluid Dynamic Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 1993.

128. Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32. – № 8. – P. 1598-1605.

129. Lampart P., Swirydczuk J., Gardzilewicz A., Yershov S., Rusanov A. The Comparison of Performance of the Menter Shear Stress Transport and Baldwin-Lomax Models with Respect to CFD Prediction of Losses in HP Axial Turbine Stages // Technologies for Fluid/Thermal/Structural/Chemical Systems with Industrial Applications, ASME. – 2001. – Vol. 424. – № 2. – P. 1-12.

130. Menter, F.R. Zonal Two Equation  $k$ - $\epsilon$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA. – 1993. – P. 9332906.

131. Menter F.R., Kuntz M., and Langtry R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 4. – P. 625- 632.

132. Patel V.C., Rodi W., Scheuerer G. Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows: A Review // AIAA Journal. – 1985. – Vol. 23. – № 9. – P. 1308-1319.

133. Субботина, П.Н. Решение задач внешнего обтекания с использованием различных моделей турбулентности в FlowVision / П.Н. Субботина // [Электронный ресурс]: Программное обеспечение. Инженерный консалтинг. Вычислительная техника. Измерительное оборудование. – Режим доступа: [https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv\\_turb\\_sub07.pdf](https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_turb_sub07.pdf) (дата обращения: 11.11.2018).

134. Бабин, В.А. Опыт применения FlowVision для оптимизации геометрии реакторной установки ВБЭР-300 / В.А. Брусин, Д.Н. Свешников // [Электронный ресурс]: САПР и графика. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/7831#1> (дата обращения: 11.11.2018).

135. [Электронный ресурс]: Опыт использования FlowVision на ТАНТК им. Г.М. Бериева для моделирования различных гидродинамических задач. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/42348371-Opyt-ispolzovaniya-flowvision-na-tantk-im-g-m-berieva-dlya-modelirovaniya-razlichnyh-gidrodinamicheskikh-zadach.html> (дата обращения: 11.11.2018).

136. Аксенов, А.А. FlowVision: индустриальная вычислительная гидродинамика / А.А. Аксенов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 5-20.

137. Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике / А.Д. Альтшуль, В.И. Калицун, Ф.Г. Майрановский, П.П. Пальгунов. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.

138. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства газов / С.Л. Ривкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.

139. Левит, Г.Т. Испытание пылеприготовительных установок / Г.Т. Левит. – М.: Энергия, 1977. – 185 с.

140. Брусин, М.А. Наладка и исследование шаровой барабанной мельницы Ш-25 с фрикционным приводом / М.А. Брусин, А.В. Гофайзен // Теплоэнергетика. – 1969. – № 11. – С. 46-50.

141. Производственная инструкция по эксплуатации котлов и вспомогательного котельного оборудования ТЭЦ-9. – Ангарск: ПАО «Иркутскэнерго», 2016. – 134 с.

## Приложение А

### Материалы по использованию результатов работы

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе  
Иркутского национального  
исследовательского технического  
университета



Д.В. Огнев

2017 г.

### СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе

Результаты диссертационной работы «Повышение энергоэффективности основных элементов систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами при работе на непроектных углях», выполненной в рамках реализации Приоритетного направления развития университета «Наукоемкие системы жизнеобеспечения урбанизированных и малонаселенных территорий», включены в дисциплины «Котельные установки и парогенераторы» и «Подготовка топлива к сжиганию» по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и используются в учебном процессе на кафедре теплоэнергетики Иркутского национального исследовательского технического университета (протокол заседания кафедры теплоэнергетики № 1 от 4 сентября 2017 года).

И.о. заведующего кафедрой теплоэнергетики

В.А. Бочкарев

9 октября 2017 г.





**ИРКУТСКЭНЕРГО**

ЭНЕРГОУГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ

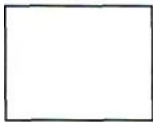
**ИРКУТСКОЕ ПУБЛИЧНОЕ  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ  
(ПАО «ИРКУТСКЭНЕРГО»)**

**Ф И Л И А Л  
ТЭЦ - 9**

а/я 5572, Ангарск, Иркутская область, 665821  
Тел. (395-5)503-359, факс: (395-5)503-300  
E-mail: post@tec9.irkutskenergo.ru  
http://www.irkutskenergo.ru  
ОКПО 00105182, ОГРН 1023801003313,  
ИНН/КПП 3800000220/380102006



№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы

Ощепкова Василия Владимировича

**«ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ  
ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ С ШАРОВЫМИ БАРАБАНЫМИ МЕЛЬНИЦАМИ ПРИ  
РАБОТЕ НА НЕПРОЕКТНЫХ УГЛЯХ»**

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Ощепкова В.В. «Повышение энергоэффективности основных элементов систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами при работе на непроектных углях», представленной на соискание научной степени кандидата технических наук, использованы на ТЭЦ-9 ПАО «Иркутскэнерго» при эксплуатации пылесистемы 5А котла ТП-81 ст.№5.

Использование результатов позволило:

1. Установить, что для снижения удельного расхода электроэнергии на размол топлива и улучшения фракционного состава пыли необходимо загружать мельницу ШК-32 шарами массой 50т при работе на смеси бурых углей марок 2Б и 3Б;
2. Составить проект Программы развития Производственной системы по повышению энергоэффективности систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами.

Директор



Дата

М.п.

А.Н. Цветков

**БАЙКАЛЬСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ**

Общество с ограниченной ответственностью «Байкальская энергетическая компания»

филиал ТЭЦ-10

АКТ

№ \_\_\_\_\_



ПТВЕРЖДАЮ

Директор ТЭЦ-10

И.Г. Одяков

2021 г.

Об использовании результатов  
диссертационной работы  
Ощепкова В.В.

По итогам рассмотрения материалов и результатов диссертационной работы Ощепкова В.В. «Повышение энергоэффективности систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами при работе на непроектных углях», представленной на соискание научной степени кандидата технических наук, комиссией в составе А.В. Мурашева – начальника котлотурбинного цеха, М.А. Кириченко – начальника производственно-технического отдела составлен настоящий акт, свидетельствующий о следующем:

1. результаты диссертационной работы Ощепкова В.В. признать актуальными с точки зрения повышения энергоэффективности индивидуальных систем пылеприготовления с промежуточным бункером пыли с шаровыми барабанными мельницами (Ш-16);

2. предлагаемая в диссертации методика апробирована и рекомендуется для расчетов оптимальных режимов работы ШБМ, установленных на ТЭЦ-10, с целью снижения расхода электроэнергии на пылеприготовление.

Члены комиссии:

А.В. Мурашев

М.А. Кириченко

## Приложение Б

### Результаты испытаний пылесистем

Таблица Б1 – Данные тепловых испытаний пылесистемы 5А котла ТП-81

| № опыта                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $B_M$ , т/ч                          | 30,3 | 34,2 | 38,8 | 41,6 | 38,4 | 45,4 | 45,3 | 54,5 | 48   | 41,3 | 43,3 |
| $W_p$ , %                            | 24,2 | 24,4 | 25,2 | 24,3 | 23,4 | 21,1 | 26,3 | 25,8 | 22,8 | 23,7 | 23,6 |
| $W_{пл}$ , %                         | 14,8 | 9,36 | 12   | 12,5 | 15,2 | 14,7 | 14,4 | 14   | 10   | 14,6 | 13,6 |
| $R_{90}$ , %                         | 39,2 | 38,2 | 43,7 | 46,1 | 23,1 | 28,1 | 27,9 | 36,1 | 40,6 | 22,1 | 22,9 |
| $t_{ГВ}$ , °С                        | 376  | 400  | 401  | 407  | 386  | 391  | 402  | 395  | 393  | 408  | 410  |
| $t_2$ , °С                           | 56,1 | 66,5 | 64   | 64,1 | 57,4 | 58,3 | 61,1 | 60,5 | 64,7 | 60   | 62   |
| $V_{ГВ}$ , ТЫС.<br>М <sup>3</sup> /ч | 64,5 | 86,2 | 93   | 99,2 | 70,5 | 78   | 90   | 97,5 | 107  | 70,5 | 80,5 |
| $K_{прс}$ , %                        | 0,49 | 0,5  | 0,53 | 0,53 | 0,47 | 0,49 | 0,48 | 0,51 | 0,5  | 0,48 | 0,49 |
| $G_{ш}$ , т                          | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 41,3 | 50   | 50   | 50   | 50   | 50   | 57   | 57   |
| $\psi_6$                             | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,26 | 0,26 |
| $N_6$ , кВт                          | 716  | 741  | 746  | 747  | 791  | 792  | 788  | 797  | 831  | 860  | 856  |
| $P_{M1}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>     | 69   | 44   | 48   | 38   | 55   | 45   | 46   | 43   | 26   | 36   | 29   |
| $P_{M2}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>     | 281  | 279  | 407  | 432  | 215  | 242  | 271  | 350  | 402  | 196  | 224  |
| $P_{ce1}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>    | 325  | 286  | 411  | 437  | 225  | 248  | 274  | 352  | 403  | 204  | 228  |
| $P_{ce2}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>    | 486  | 367  | 536  | 551  | 289  | 342  | 357  | 460  | 522  | 278  | 304  |



Окончание таблицы Б1

| <b>№ опыта</b>  | <b>12</b> | <b>13</b> | <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> | <b>17</b> | <b>18</b> | <b>19</b> | <b>20</b> | <b>21</b> | <b>22</b> |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b><math>B_M</math>, т/ч</b>                            | 49,6      | 52,2      | 56,4      | 43,8      | 47,7      | 49,1      | 57,4      | 58,8      | 56,1      | 55,4      | 55,4      |
| <b><math>W_p</math>, %</b>                              | 23,7      | 22        | 23,6      | 23,7      | 25,6      | 25,4      | 22,7      | 22,9      | 24,1      | 24,3      | 22,1      |
| <b><math>W_{пл}</math>, %</b>                           | 12,9      | 13,1      | 12,7      | 13,5      | 15,1      | 15,6      | 14        | 13,8      | 13,7      | 13,9      | 13,9      |
| <b><math>R_{90}</math>, %</b>                           | 30,3      | 33,3      | 40,7      | 21,4      | 29,5      | 32,5      | 31,4      | 40,7      | 39,1      | 34,4      | 31,3      |
| <b><math>t_{ГВ}</math>, °С</b>                          | 417       | 404       | 407       | 403       | 401       | 395       | 410       | 409       | 400       | 395       | 395       |
| <b><math>t_2</math>, °С</b>                             | 63,1      | 63,1      | 63,8      | 60,9      | 60        | 60        | 61        | 61        | 62        | 61        | 61        |
| <b><math>V_{ГВ}</math>, тыс.<br/><math>M^3/ч</math></b> | 93        | 102       | 110       | 73,4      | 87        | 91,4      | 100       | 107       | 102       | 100       | 88        |
| <b><math>K_{прс}</math>, %</b>                          | 0,49      | 0,48      | 0,49      | 0,45      | 0,47      | 0,48      | 0,5       | 0,51      | 0,53      | 0,49      | 0,5       |
| <b><math>G_{ш}</math>, т</b>                            | 57        | 57        | 57        | 65        | 65        | 65        | 65        | 65        | 69        | 69        | 69        |
| <b><math>\psi_6</math></b>                              | 0,26      | 0,26      | 0,26      | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,3       | 0,32      | 0,32      | 0,32      |
| <b><math>N_6</math>, кВт</b>                            | 861       | 858       | 864       | 913       | 909       | 911       | 910       | 925       | 946       | 943       | 946       |
| <b><math>P_{M1}</math>,<br/><math>кгс/м^2</math></b>    | 20        | 29        | 23        | 45        | 21        | 35        | 30        | 28        | 23        | 22        | 31        |
| <b><math>P_{M2}</math>,<br/><math>кгс/м^2</math></b>    | 262       | 346       | 405       | 214       | 246       | 285       | 345       | 394       | 396       | 352       | 284       |
| <b><math>P_{ce1}</math>,<br/><math>кгс/м^2</math></b>   | 267       | 347       | 403       | 230       | 252       | 284       | 345       | 397       | 400       | 354       | 288       |
| <b><math>P_{ce2}</math>,<br/><math>кгс/м^2</math></b>   | 358       | 457       | 536       | 300       | 337       | 380       | 465       | 543       | 556       | 486       | 403       |

Таблица Б2 – Данные тепловых испытаний пылесистемы 7А котла ПК-24

| № опыта                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $B_m$ , т/ч                          | 43,6 | 41,4 | 40,9 | 45,8 | 44,8 | 49,1 | 45,3 | 43,4 | 50,6 | 50,5 | 46   |
| $W_p$ , %                            | 24,1 | 24,5 | 24,6 | 24,7 | 23,7 | 23,4 | 23   | 24,7 | 23,3 | 25,2 | 24,6 |
| $W_{пл}$ , %                         | 9,15 | 10,7 | 9,7  | 11,3 | 9,2  | 11,6 | 11,5 | 12   | 12   | 11,2 | 12,3 |
| $R_{90}$ , %                         | 26,3 | 26,9 | 27,4 | 27   | 24,2 | 25,8 | 28,6 | 28,5 | 30,6 | 27,3 | 25   |
| $t_{гв}$ , °С                        | 330  | 315  | 319  | 328  | 326  | 330  | 322  | 322  | 332  | 332  | 332  |
| $t_2$ , °С                           | 65   | 64   | 62   | 66   | 65   | 63   | 64   | 63   | 65   | 66   | 65   |
| $V_{гв}$ , тыс.<br>м <sup>3</sup> /ч | 98   | 91   | 93   | 93,5 | 91   | 94,5 | 94   | 93   | 94   | 98   | 93   |
| $Q_{ен}^H$ ,<br>нм <sup>3</sup> /ч   | 5,67 | 5,75 | 6    | 5,58 | 5,88 | 5,25 | 4,9  | 5,4  | 4,78 | 5,85 | 5,22 |
| $K_{прс}$ , %                        | 14   | 12   | 9,9  | 14,6 | 12,5 | 12,2 | 14,1 | 11   | 17,3 | 17   | 11,3 |
| $N_6$ , кВт                          | 430  | 450  | 441  | 445  | 447  | 441  | 479  | 458  | 453  | 458  | 464  |
| $P_{м1}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>     | 48   | 73,3 | 90   | 90   | 80   | 49   | 90   | 90   | 50   | 60   | 40   |
| $P_{м2}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>     | 395  | 376  | 398  | 388  | 396  | 376  | 391  | 391  | 350  | 355  | 322  |
| $P_{се2}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>    | 484  | 478  | 495  | 470  | 510  | 470  | 455  | 485  | 465  | 434  | 425  |

Таблица Б3 – Данные тепловых испытаний пылесистемы 7Б котла ПК-24

| № опыта                              | 1    | 2    | 3     | 4    | 5     | 6    | 7    | 8     | 9    | 10   |
|--------------------------------------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| $B_m$ , т/ч                          | 41,4 | 39,7 | 40,9  | 45,8 | 44,8  | 49,7 | 51,2 | 47    | 49,1 | 45,3 |
| $W_p$ , %                            | 24,5 | 23,6 | 24,6  | 24,7 | 23,7  | 23,9 | 24,7 | 22,5  | 23,4 | 23   |
| $W_{пл}$ , %                         | 11,6 | 8    | 10,1  | 11,6 | 12,1  | 10,7 | 10,7 | 12,5  | 12   | 12   |
| $R_{90}$ , %                         | 33,2 | 27,1 | 28,2  | 33,6 | 35,4  | 33,7 | 35,2 | 33,2  | 31,6 | 31,4 |
| $t_{гв}$ , °C                        | 319  | 320  | 320   | 330  | 330   | 332  | 332  | 330   | 328  | 320  |
| $t_2$ , °C                           | 63   | 63   | 64    | 64   | 63    | 65   | 67   | 62    | 61   | 61   |
| $V_{гв}$ , тыс.<br>м <sup>3</sup> /ч | 83,5 | 90   | 89,5  | 81,5 | 83,5  | 81   | 84   | 79,5  | 80   | 79   |
| $Q_{гв}^H$ ,<br>нм <sup>3</sup> /ч   | 5,55 | 6,3  | 6     | 5,5  | 4,9   | 5,5  | 5,85 | 4,26  | 5,1  | 4,7  |
| $K_{прс}$ , %                        | 33,7 | 22,9 | 20,7  | 29,4 | 24,3  | 40,6 | 32,3 | 44,3  | 40,8 | 33,4 |
| $N_6$ , кВт                          | 447  | 437  | 446   | 451  | 442   | 444  | 445  | 439,2 | 443  | 440  |
| $P_{м1}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>     | 100  | 108  | 123,3 | 70   | 106,2 | 74   | 70   | 73    | 88   | 92   |
| $P_{м2}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>     | 410  | 398  | 403   | 387  | 405   | 390  | 386  | 396   | 395  | 385  |
| $P_{се2}$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup>    | 545  | 517  | 533   | 520  | 546   | 530  | 511  | 538   | 535  | 485  |

Окончание таблицы Б3

| № опыта                              | 11   | 12   | 13   | 14   | 15    | 16   | 17   | 18    | 19    | 20   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|------|
| $B_M$ , т/ч                          | 43,4 | 41,6 | 43   | 41,4 | 51    | 50,6 | 52,2 | 50,5  | 45,2  | 46   |
| $W_p$ , %                            | 24,7 | 24,8 | 23,5 | 24,5 | 24,3  | 23,3 | 23,2 | 25,2  | 23,4  | 24,6 |
| $W_{пл}$ , %                         | 11,2 | 11,3 | 8,8  | 12,8 | 11,1  | 11   | 11,2 | 11,25 | 11,75 | 10,6 |
| $R_{90}$ , %                         | 33   | 31,9 | 27,6 | 32,3 | 35,2  | 33,1 | 31,9 | 33    | 33,1  | 26,1 |
| $t_{ГВ}$ , °С                        | 315  | 326  | 325  | 324  | 328   | 320  | 330  | 327   | 323   | 325  |
| $t_2$ , °С                           | 65   | 64   | 68   | 63   | 65    | 65   | 66   | 64    | 64    | 63   |
| $V_{ГВ}$ , тыс.<br>м <sup>3</sup> /ч | 90,5 | 82   | 84   | 85,5 | 84    | 83   | 80   | 86,5  | 83,5  | 83,5 |
| $Q_{вн}^H$ , нм <sup>3</sup> /ч      | 5,7  | 5,7  | 6    | 4,98 | 5,52  | 5,15 | 5,45 | 5,83  | 5,34  | 5,83 |
| $K_{прс}$ , %                        | 14,4 | 35,6 | 31,4 | 36,5 | 37,5  | 32,2 | 33,6 | 35,8  | 32,2  | 31,2 |
| $N_6$ , кВт                          | 440  | 435  | 429  | 447  | 427   | 440  | 446  | 432   | 444   | 448  |
| $P_{M1}$ , кгс/м <sup>2</sup>        | 80   | 100  | 120  | 112  | 90    | 90   | 72   | 93,3  | 128   | 90   |
| $P_{M2}$ , кгс/м <sup>2</sup>        | 410  | 410  | 400  | 412  | 382,5 | 400  | 420  | 391   | 430   | 400  |
| $P_{сe2}$ , кгс/м <sup>2</sup>       | 556  | 540  | 495  | 430  | 465   | 542  | 440  | 525   | 560   | 520  |

## Приложение В

Статистическая обработка результатов испытаний пылесистем

Таблица В1 – Статистическая обработка результатов испытаний пылесистемы 5А котла ТП-81

| Вентиляция пылесистемы $V_{гв}$ , тыс. м <sup>3</sup> /ч | Опыты 1-4 при $G_{ш} = 41,3$ т |             |                                   | Опыты 5-9 при $G_{ш} = 50$ т |             |                                   |
|--|--------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|
|  | $R_{90}$ , %                   | $N_6$ , кВт | $\Delta P_m$ , кгс/м <sup>2</sup> | $R_{90}$ , %                 | $N_6$ , кВт | $\Delta P_m$ , кгс/м <sup>2</sup> |
| 65   | 39,2                           | 716,4       | 212                               | 23,1                         | 791,1       | 160                               |
| 75   | -                              | -           | -                                 | 28,13                        | 792         | 197                               |
| 85   | 38,2                           | 740,7       | 235                               | 27,9                         | 787,5       | 225                               |
| 95   | 43,7                           | 746,1       | 359                               | 36,1                         | 796,5       | 307                               |
| 105  | 46,1                           | 747         | 394                               | 40,6                         | 830,7       | 376                               |
| Среднее значение   | 41,8                           | 737,55      | 300                               | 31,166                       | 799,56      | 253                               |
| Среднеквадратичное отклонение                            | 3,734                          | 14,372      | 77,92                             | 7,0408                       | 17,701      | 78,25                             |
| Доверительная вероятность                                | 0,95                           | 0,95        | 0,95                              | 0,95                         | 0,95        | 0,95                              |
| Коэффициент Стьюдента                                    | 3,2                            | 3,2         | 3,2                               | 2,8                          | 2,8         | 2,8                               |
| Доверительный интервал                                   | 11,84                          | 46,1        | 249,344                           | 19,7                         | 49,56       | 219,1                             |
| Относительная погрешность                                | 0,26                           | 0,062       | 0,83                              | 0,63                         | 0,062       | 0,87                              |

Окончание таблицы В1

| Вентиляция пыле-<br>системы $V_{гв}$ , тыс.<br>$м^3/ч$ | Опыты 10-14 при<br>$G_{ш} = 57$ т |                |                                      | Опыты 15-19 при<br>$G_{ш} = 60$ т |                |                                      | Опыты 20-22 при<br>$G_{ш} = 65$ т |                |                                      |
|--|-----------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------------------|
|  | $R_{90}$ ,<br>%                   | $N_6$ ,<br>кВт | $\Delta P_m$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup> | $R_{90}$ ,<br>%                   | $N_6$ ,<br>кВт | $\Delta P_m$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup> | $R_{90}$ ,<br>%                   | $N_6$ ,<br>кВт | $\Delta P_m$ ,<br>кгс/м <sup>2</sup> |
| 65   | 22                                | 860            | 160                                  | 21                                | 913            | 169                                  | -                                 | -              | -                                    |
| 75   | 23                                | 856            | 195                                  | 29                                | 909            | 225                                  | -                                 | -              | -                                    |
| 85   | 30                                | 861            | 242                                  | 33                                | 911            | 250                                  | 39                                | 946            | 253                                  |
| 95   | 33                                | 858            | 317                                  | 31                                | 910            | 315                                  | 34                                | 943            | 330                                  |
| 105  | 41                                | 864            | 382                                  | 41                                | 925            | 366                                  | 31                                | 946            | 373                                  |
| Среднее значение                                       | 30                                | 860            | 259,2                                | 31                                | 914            | 265                                  | 35                                | 945            | 318,7                                |
| Среднеквадратичное<br>отклонение                       | 8                                 | 3              | 80,84                                | 7                                 | 7              | 68,92                                | 4                                 | 2              | 49,64                                |
| Доверительная ве-<br>роятность                         | 0,95                              | 0,95           | 0,95                                 | 0,95                              | 0,95           | 0,95                                 | 0,95                              | 0,95           | 0,95                                 |
| Коэффициент Стью-<br>дента                             | 2,8                               | 2,8            | 2,8                                  | 2,8                               | 2,8            | 2,8                                  | 4,3                               | 4,3            | 4,3                                  |
| Доверительный ин-<br>тервал                            | 22,4                              | 8,4            | 226,35                               | 9                                 | 19,6           | 192,98                               | 17,2                              | 8,6            | 213,5                                |
| Относительная по-<br>грешность                         | 0,75                              | 0,01           | 0,87                                 | 0,28                              | 0,63           | 0,73                                 | 0,49                              | 0,01           | 0,67                                 |

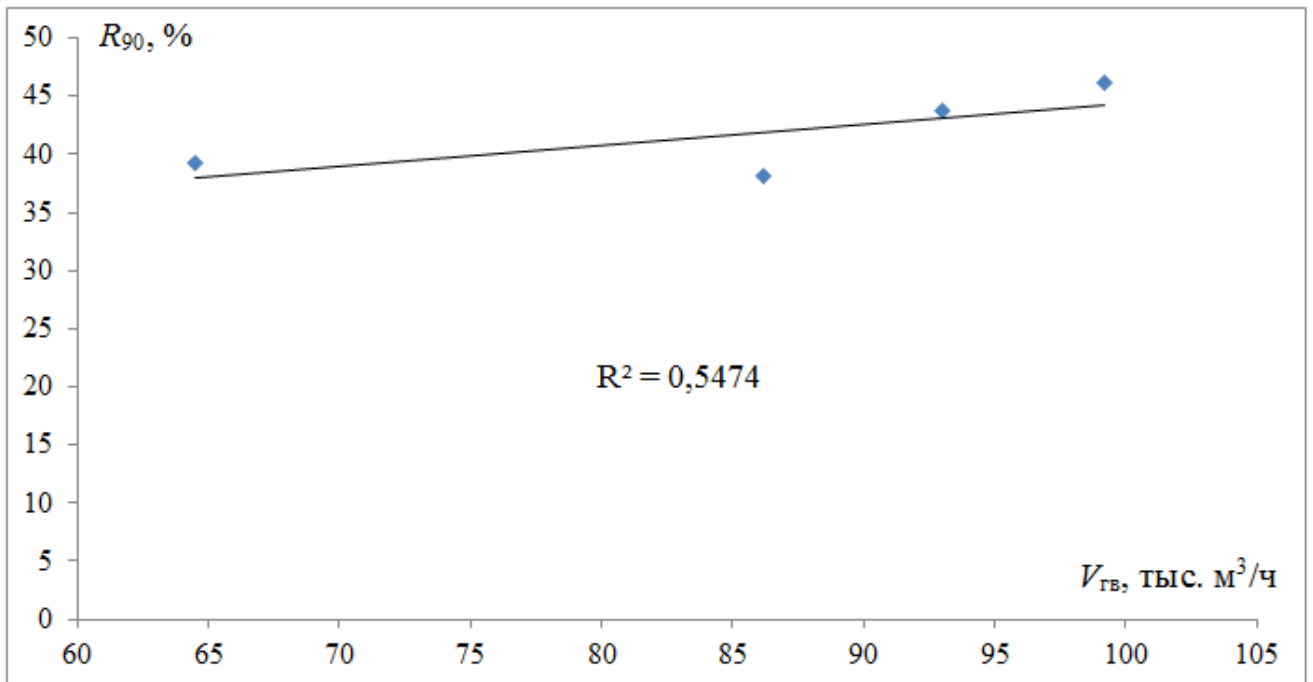


Рисунок В1 – Зависимость тонины помола угольной пыли  $R_{90}$  от расхода воздуха  $V_{ГВ}$  через мельницу ШК-32 при шаровой загрузке  $G_{ш} = 41,3$  т

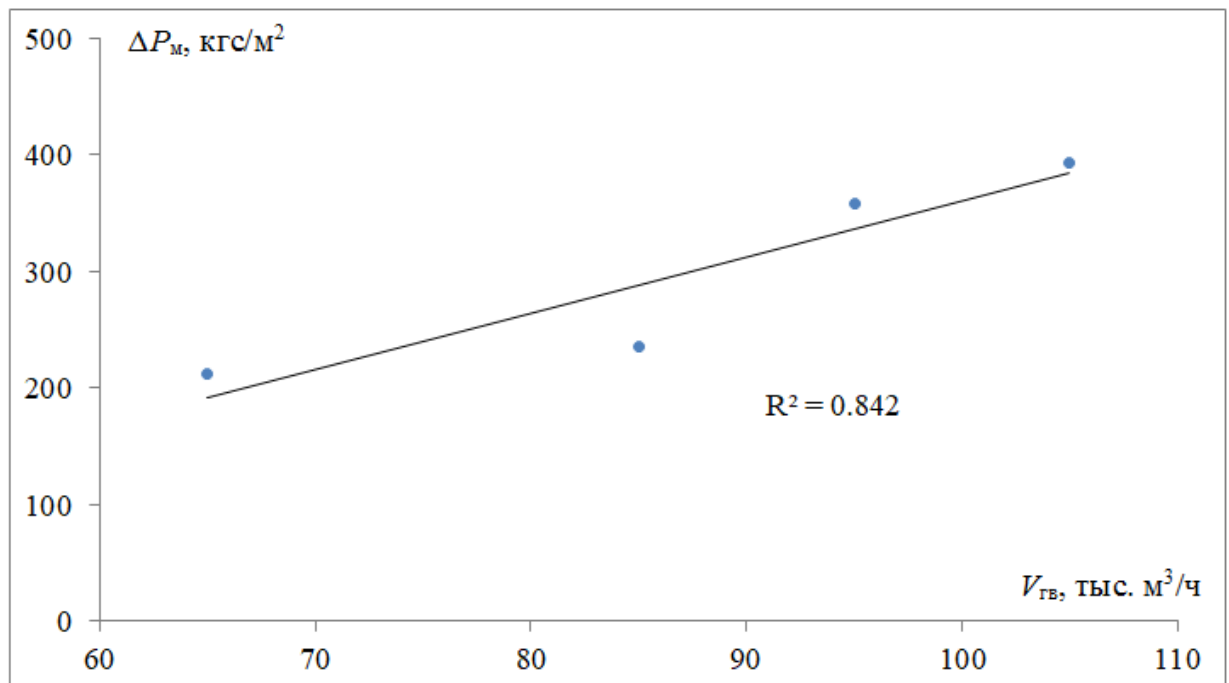


Рисунок В2 – Зависимость аэродинамического сопротивления мельницы ШК-32  $\Delta P_m$  от расхода воздуха  $V_{ГВ}$  через нее при шаровой загрузке  $G_{ш} = 41,3$  т

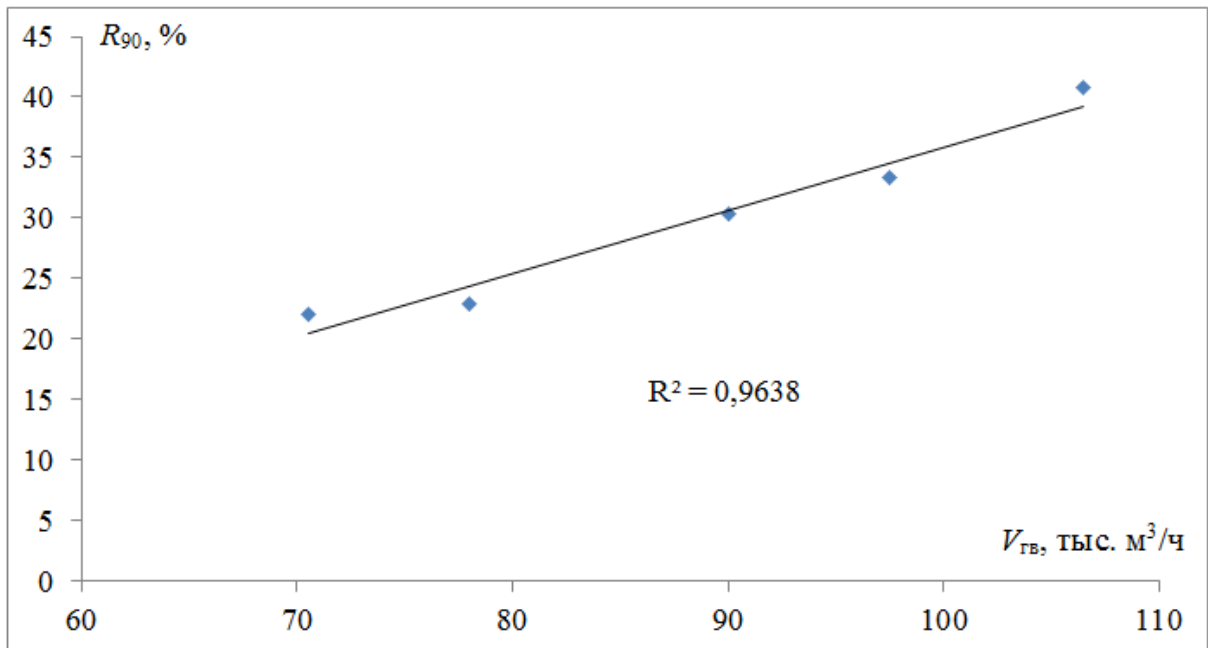


Рисунок В3 – Зависимость тонины помола угольной пыли  $R_{90}$  от расхода воздуха  $V_{gb}$  через мельницу ШК-32 при шаровой загрузке  $G_{ш} = 50$  т

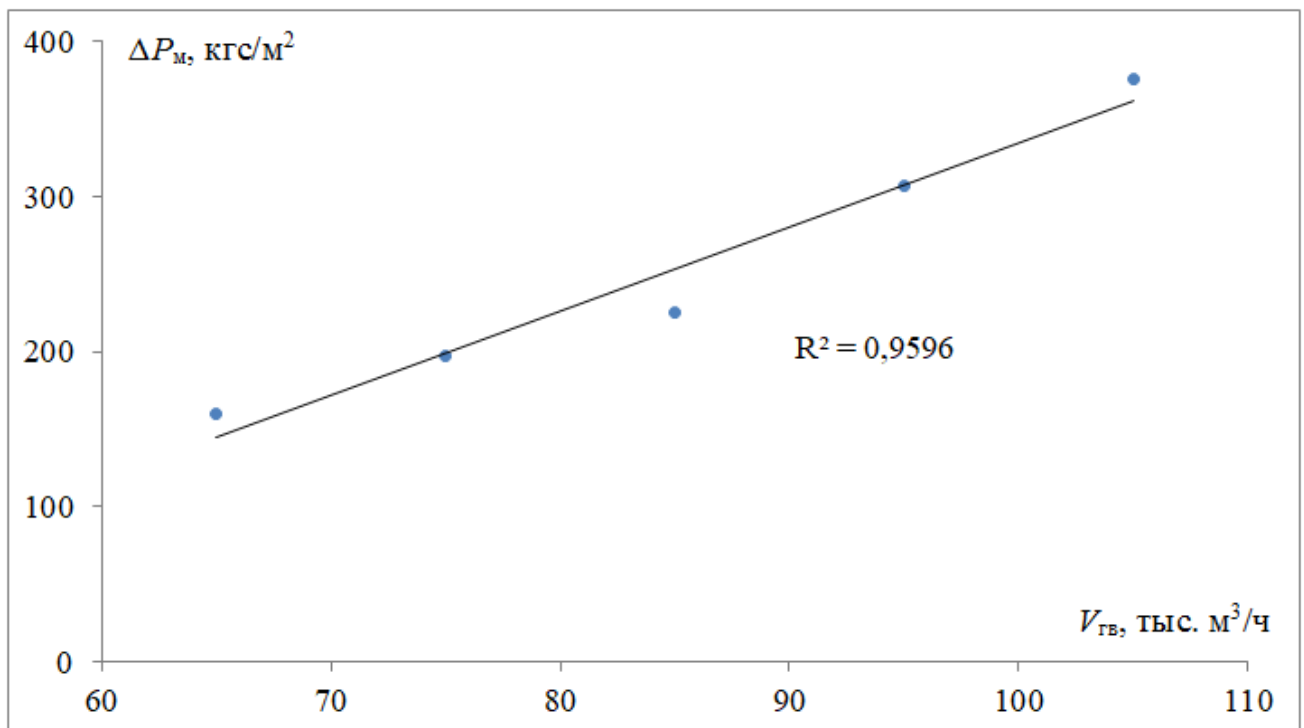


Рисунок В4 – Зависимость аэродинамического сопротивления мельницы ШК-32  $\Delta P_m$  от расхода воздуха  $V_{gb}$  через нее при шаровой загрузке  $G_{ш} = 50$  т



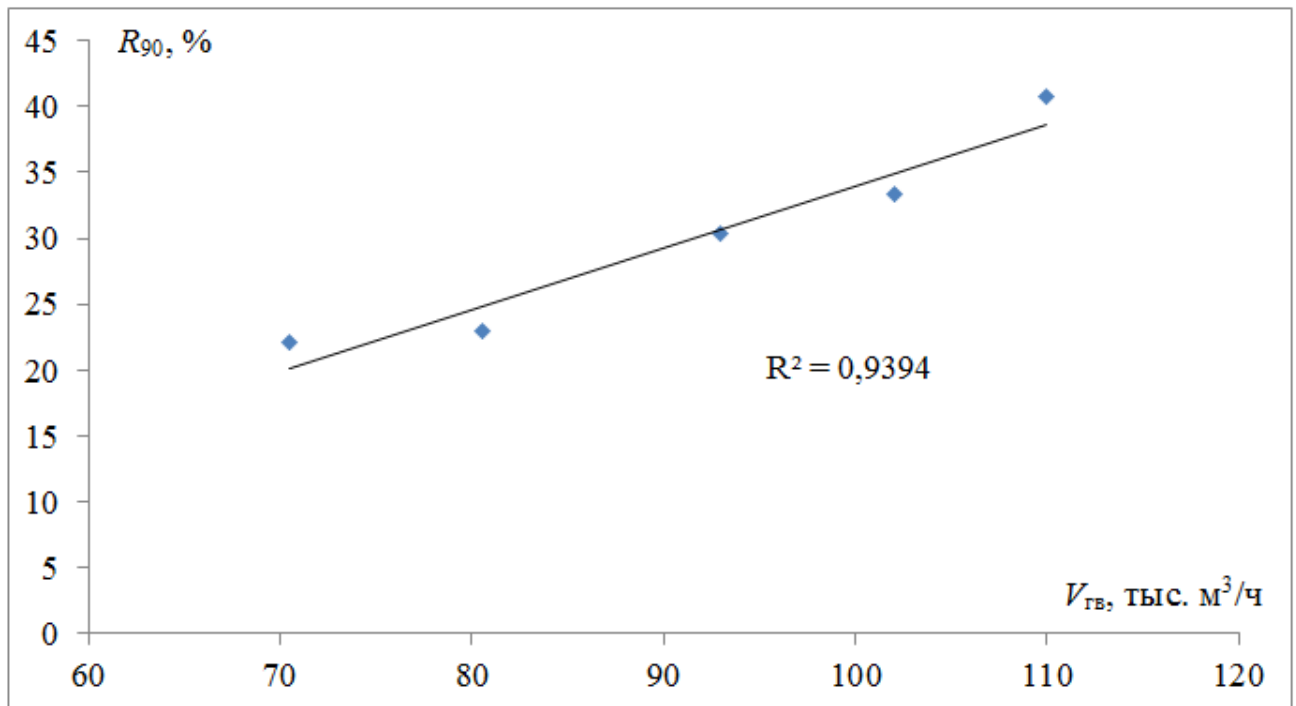


Рисунок В5 – Зависимость тонины помола угольной пыли  $R_{90}$  от расхода воздуха  $V_{гв}$  через мельницу ШК-32 при шаровой загрузке  $G_{ш} = 57$  т

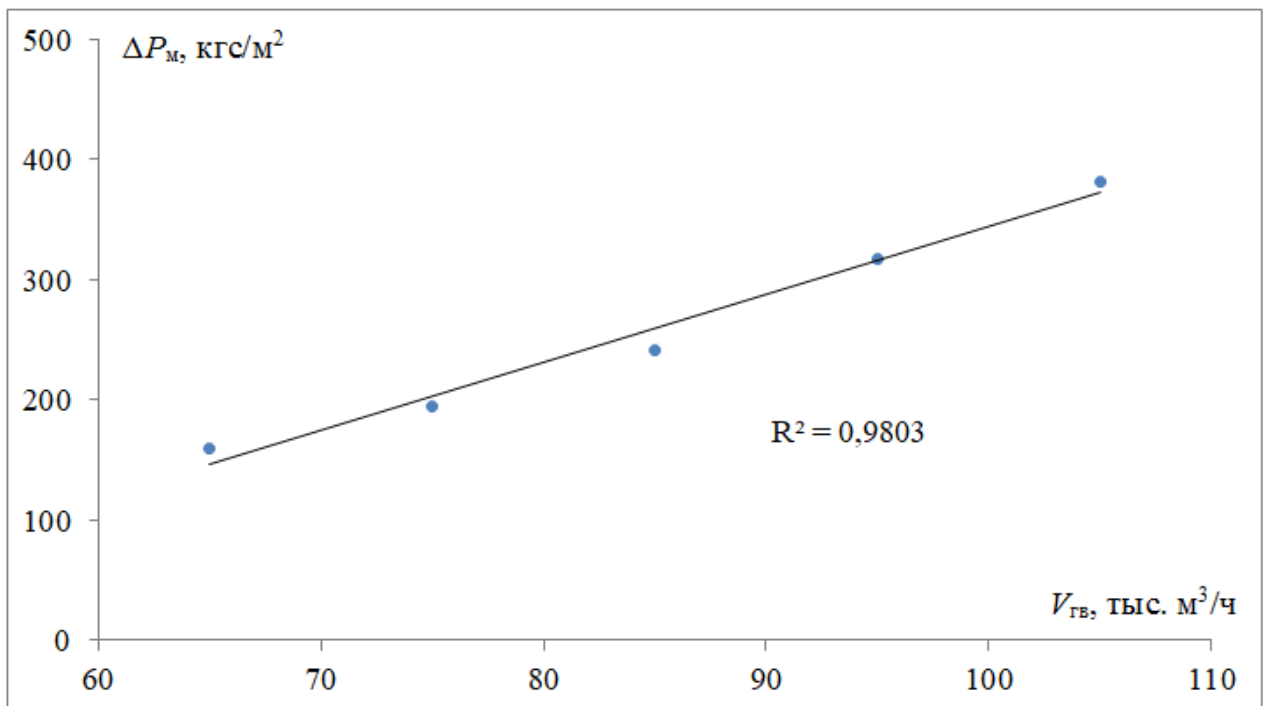


Рисунок В6 – Зависимость аэродинамического сопротивления мельницы ШК-32  $\Delta P_m$  от расхода воздуха  $V_{гв}$  через нее при шаровой загрузке  $G_{ш} = 57$  т

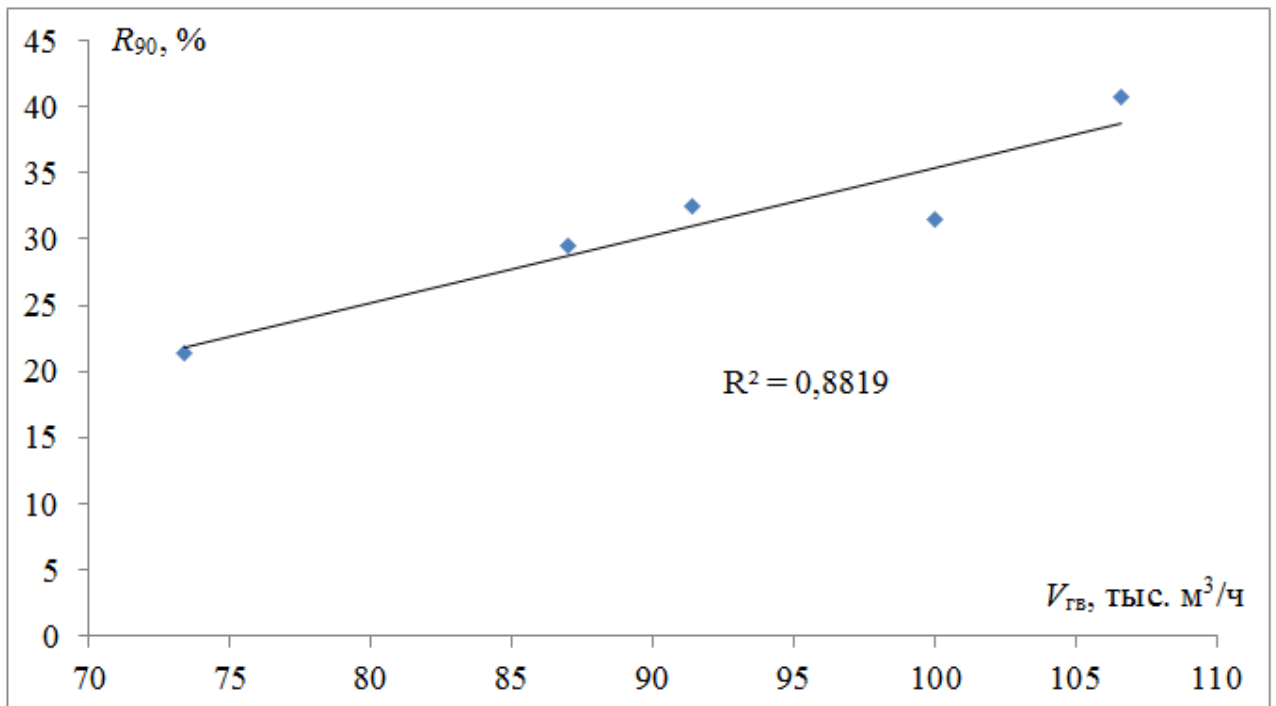


Рисунок В7 – Зависимость тонины помола угольной пыли  $R_{90}$  от расхода воздуха  $V_{ГВ}$  через мельницу ШК-32 при шаровой загрузке  $G_{ш} = 60 \text{ т}$

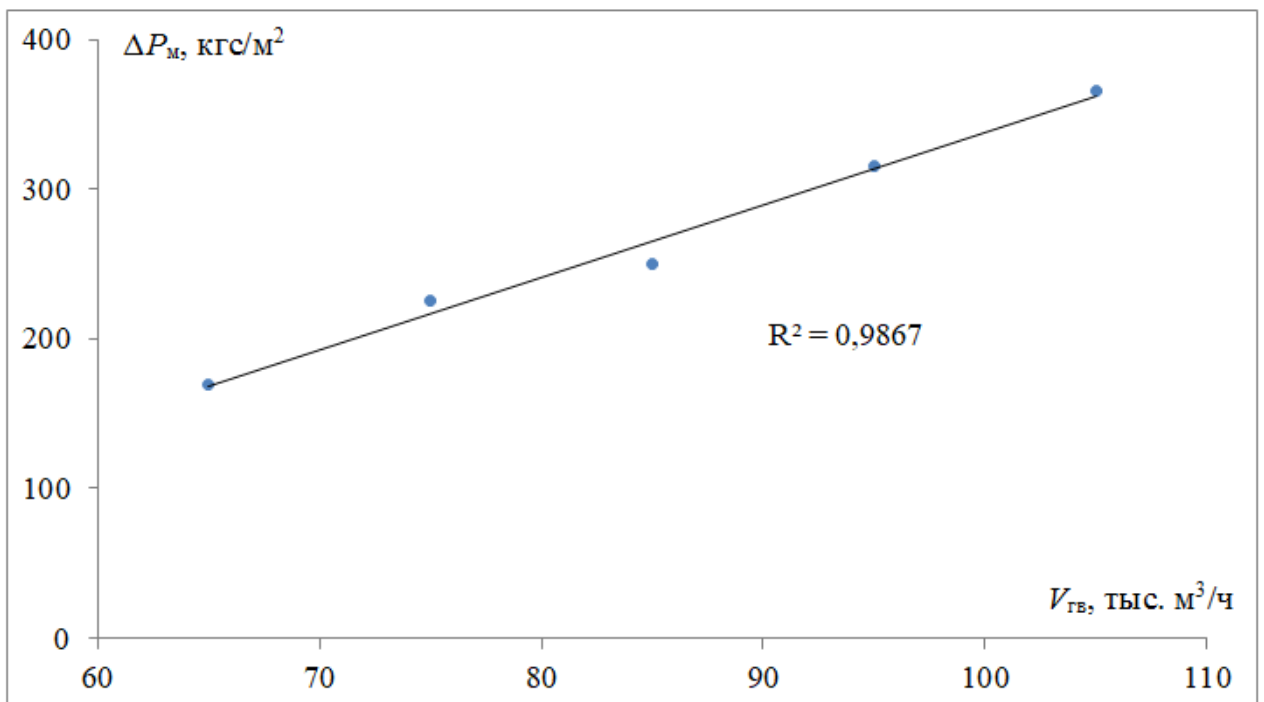


Рисунок В8 – Зависимость аэродинамического сопротивления мельницы ШК-32  $\Delta P_m$  от расхода воздуха  $V_{ГВ}$  через нее при шаровой загрузке  $G_{ш} = 60 \text{ т}$

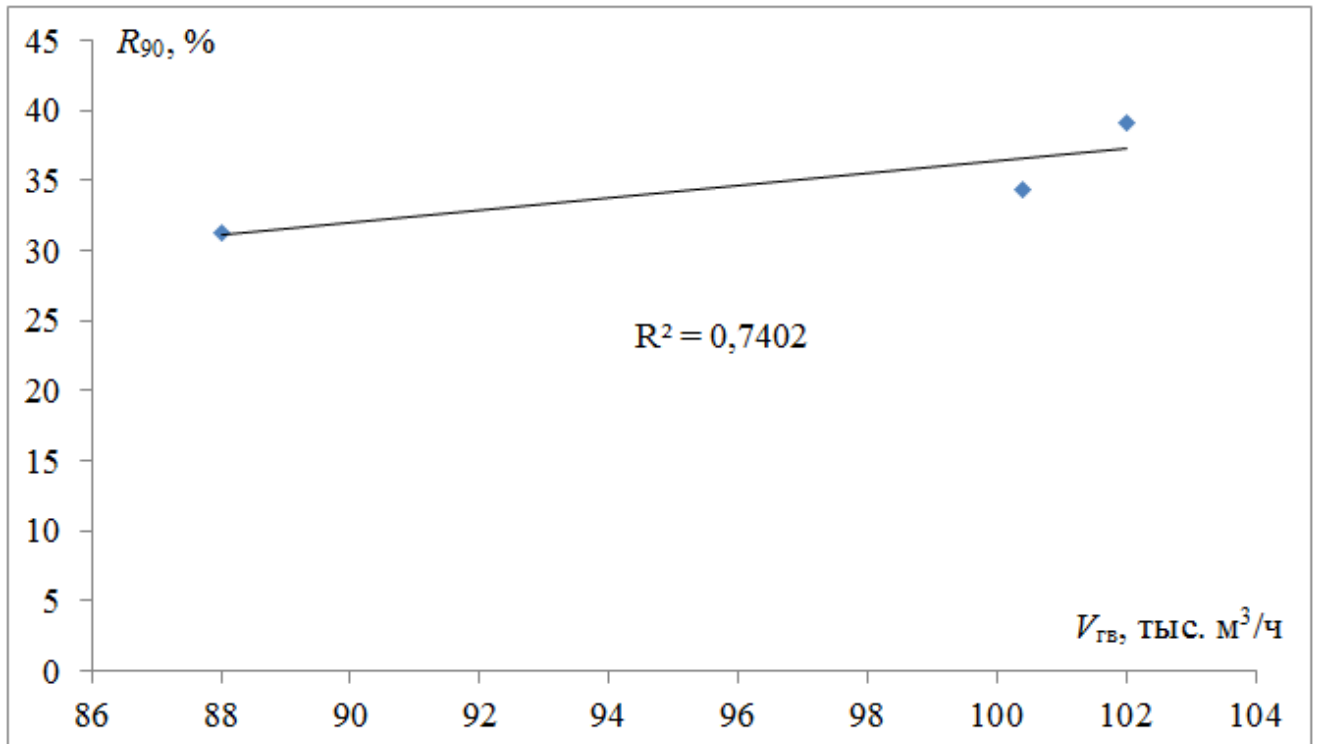


Рисунок В9 – Зависимость тонины помола угольной пыли  $R_{90}$  от расхода воздуха  $V_{ГВ}$  через мельницу ШК-32 при шаровой загрузке  $G_{ш} = 65$  т

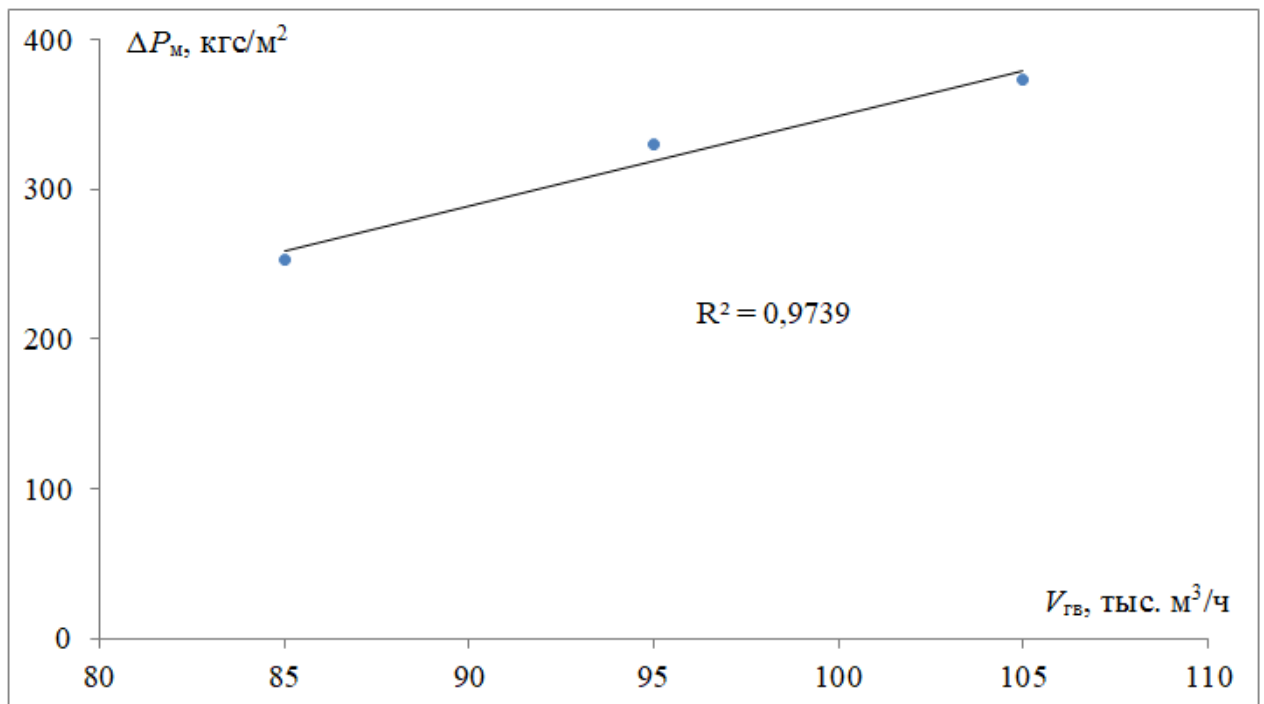


Рисунок В10 – Зависимость аэродинамического сопротивления мельницы ШК-32  $\Delta P_m$  от расхода воздуха  $V_{ГВ}$  через нее при шаровой загрузке  $G_{ш} = 65$  т

Коэффициент корреляции определялся следующим образом:

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}},$$

где  $SS_{reg} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  – объясненная сумма квадратов;  $\hat{y}_i$  – расчетные значения

объясняемой переменной;  $\bar{y}$  – среднее значение переменной;  $SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$  –

общая сумма квадратов;  $y_i$  – фактические значения объясняемой переменной.

Таблица В2 – Статистическая обработка результатов испытаний пылесистем 7А и 7Б котла ПК-24

| Номер опыта | $B_m$ , т/ч | $R_{90}$ , % | $N_6$ , кВт | $\Delta P_m$ , Па |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------------|
| 1           | 46,3        | 26,3         | 429,6       | 3400,6            |
| 2           | 41,4        | 26,9         | 450         | 2966,46           |
| 3           | 40,9        | 27,4         | 441         | 3018,4            |
| 4           | 45,8        | 27           | 445         | 2920,4            |
| 5           | 44,8        | 24,2         | 447         | 3096,8            |
| 6           | 49,1        | 25,8         | 441         | 3204,6            |
| 7           | 45,3        | 28,6         | 479         | 2949,8            |
| 8           | 43,4        | 28,5         | 458         | 2949,8            |
| 9           | 50,6        | 30,6         | 453         | 2940              |
| 10          | 50,5        | 27,3         | 458         | 2891              |
| 11          | 46          | 24,96        | 464         | 2763,6            |
| 12          | 41,4        | 33,2         | 447         | 3038              |
| 13          | 39,7        | 27,1         | 437         | 2842              |

Продолжение таблицы В2

| <b>Номер опыта</b> | <b><math>B_m</math>, т/ч</b> | <b><math>R_{90}</math>, %</b> | <b><math>N_6</math>, кВт</b> | <b><math>\Delta P_m</math>, Па</b> |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| <b>14</b>          | <b>40,9</b>                  | <b>28,2</b>                   | <b>446</b>                   | <b>2741,06</b>                     |
| <b>15</b>          | 45,8                         | 33,6                          | 451                          | 3106,6                             |
| <b>16</b>          | 44,8                         | 35,4                          | 442                          | 2928,24                            |
| <b>17</b>          | 49,7                         | 33,7                          | 444                          | 3096,8                             |
| <b>18</b>          | 51,2                         | 35,2                          | 445                          | 3096,8                             |
| <b>19</b>          | 47                           | 33,2                          | 439,2                        | 3165,4                             |
| <b>20</b>          | 49,1                         | 31,6                          | 443                          | 3008,6                             |
| <b>21</b>          | 45,3                         | 31,4                          | 440                          | 2871,4                             |
| <b>22</b>          | 43,4                         | 33                            | 440                          | 3234                               |
| <b>23</b>          | 41,6                         | 31,9                          | 435                          | 3038                               |
| <b>24</b>          | 43                           | 27,6                          | 429                          | 2744                               |
| <b>25</b>          | 41,4                         | 32,3                          | 447                          | 2940                               |
| <b>26</b>          | 51                           | 35,2                          | 427                          | 2866,5                             |
| <b>27</b>          | 50,6                         | 33,1                          | 440                          | 3038                               |
| <b>28</b>          | 52,2                         | 31,9                          | 446                          | 3410,4                             |
| <b>29</b>          | 50,5                         | 33                            | 432                          | 2917,46                            |
| <b>30</b>          | 45,2                         | 33,1                          | 444                          | 2959,6                             |
| <b>31</b>          | 46                           | 26,1                          | 448                          | 3038                               |

Продолжение таблицы В2

| <b>Статистические показатели</b>           | <b><math>B_m</math>, т/ч</b> | <b><math>R_{90}</math>, %</b> | <b><math>N_6</math>, кВт</b> | <b><math>\Delta P_m</math>, Па</b> |
|--|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| <b>Среднее значение</b>                    | 45,93                        | 30,24                         | 444,77                       | 3005,88                            |
| <b>Среднеквадратичное отклонение (СКО)</b> | 3,69                         | 3,38                          | 10,50                        | 162,32                             |
| <b>Доверительная вероятность</b>           | 0,95                         | 0,95                          | 0,95                         | 0,95                               |
| <b>Коэффициент Стьюдента</b>               | 2,04                         | 2,04                          | 2,04                         | 2,04                               |
| <b>Доверительный интервал</b>              | 7,53                         | 6,9                           | 21,42                        | 59,47                              |
| <b>Относительная погрешность</b>           | 0,16                         | 0,23                          | 0,05                         | 0,11                               |

## Приложение Г

### Результаты численного эксперимента

Таблица Г1 – Данные по мельнице ШК-32

| Номер<br>опыта | Исходные данные |                            |                              |                      | Результат<br>расчета        |
|----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
|                | $\mu$           | $\rho_{см}, \text{кг/м}^3$ | $\eta_{см}, 10^{-5}$<br>Па·с | $w_{см}, \text{м/с}$ | $\Delta p_{гол}, \text{Па}$ |
| 1              | 0,632           | 1,164                      | 2,69                         | 2,78                 | 235                         |
| 2              | 0,761           | 1,249                      | 2,7                          | 3,09                 | 303                         |
| 3              | 0,445           | 1,011                      | 2,726                        | 3,57                 | 343                         |
| 4              | 0,434           | 1,11                       | 2,711                        | 3,95                 | 390                         |
| 5              | 0,41            | 0,99                       | 2,715                        | 4,3                  | 456                         |
| 6              | 0,608           | 1,12                       | 2,737                        | 2,79                 | 223                         |
| 7              | 0,547           | 1,073                      | 2,744                        | 3,2                  | 275                         |
| 8              | 0,516           | 1,043                      | 2,759                        | 3,7                  | 373                         |
| 9              | 0,586           | 1,105                      | 2,735                        | 4                    | 472                         |
| 10             | 0,486           | 1,032                      | 2,74                         | 4,39                 | 512                         |
| 11             | 0,559           | 1,09                       | 2,728                        | 2,86                 | 270                         |
| 12             | 0,514           | 1,061                      | 2,722                        | 3,43                 | 336                         |
| 13             | 0,527           | 1,077                      | 2,711                        | 3,63                 | 363                         |
| 14             | 0,605           | 1,114                      | 2,742                        | 4                    | 403                         |
| 15             | 0,574           | 1,094                      | 2,74                         | 4,28                 | 446                         |
| 16             | 0,492           | 1,045                      | 2,724                        | 4,17                 | 431                         |
| 17             | 0,499           | 1,056                      | 2,712                        | 4                    | 434                         |
| 18             | 0,627           | 1,146                      | 2,714                        | 3,53                 | 357                         |

Таблица Г2 – Данные по мельницам Ш-16

| Номер опыта | Исходные данные |                            |   |                      | Результат расчета           |
|-------------|-----------------|----------------------------|---|----------------------|-----------------------------|
|             | $\mu$           | $\rho_{см}, \text{кг/м}^3$ | $\eta_{см}, 10^{-5} \text{Па}\cdot\text{с}$ | $w_{см}, \text{м/с}$ | $\Delta p_{гом}, \text{Па}$ |
| 1           | 0,403           | 1,052                      | 2,593                                       | 3,79                 | 511                         |
| 2           | 0,437           | 1,097                      | 2,562                                       | 3,48                 | 453                         |
| 3           | 0,431           | 1,09                       | 2,566                                       | 3,49                 | 432                         |
| 4           | 0,427           | 1,071                      | 2,591                                       | 3,63                 | 485                         |
| 5           | 0,439           | 1,084                      | 2,586                                       | 3,48                 | 443                         |
| 6           | 0,441           | 1,083                      | 2,590                                       | 3,59                 | 456                         |
| 7           | 0,433           | 1,0858                     | 2,576                                       | 3,63                 | 500                         |
| 8           | 0,441           | 1,093                      | 2,574                                       | 3,51                 | 440                         |
| 9           | 0,43            | 1,07                       | 2,597                                       | 3,71                 | 495                         |
| 10          | 0,398           | 1,045                      | 2,599                                       | 3,88                 | 524                         |
| 11          | 0,449           | 1,085                      | 2,598                                       | 3,51                 | 445                         |
| 12          | 0,356           | 1,032                      | 2,567                                       | 3,76                 | 475                         |
| 13          | 0,335           | 1,014                      | 2,569                                       | 3,75                 | 486                         |
| 14          | 0,354           | 1,028                      | 2,571                                       | 3,66                 | 461                         |
| 15          | 0,372           | 1,03                       | 2,591                                       | 3,54                 | 443                         |
| 16          | 0,434           | 1,078                      | 2,590                                       | 3,49                 | 440                         |
| 17          | 0,343           | 1,01                       | 2,596                                       | 3,80                 | 470                         |
| 18          | 0,338           | 1                          | 2,600                                       | 3,73                 | 460                         |



Окончание таблицы Г2

| Номер<br>опыта | Исходные данные |                            |                              |                      | Результат<br>расчета        |
|----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
|                | $\mu$           | $\rho_{см}, \text{кг/м}^3$ | $\eta_{см}, 10^{-5}$<br>Па·с | $w_{см}, \text{м/с}$ | $\Delta p_{гол}, \text{Па}$ |
| 19             | 0,428           | 1,074                      | 2,587                        | 3,81                 | 529                         |
| 20             | 0,392           | 1,051                      | 2,581                        | 3,75                 | 500                         |
| 21             | 0,416           | 1,078                      | 2,566                        | 3,53                 | 458                         |
| 22             | 0,383           | 1,054                      | 2,563                        | 3,53                 | 440                         |
| 23             | 0,34            | 1,011                      | 2,583                        | 3,73                 | 478                         |
| 24             | 0,322           | 0,994                      | 2,588                        | 3,72                 | 476                         |
| 25             | 0,378           | 1,043                      | 2,577                        | 3,90                 | 529                         |
| 26             | 0,341           | 1,01                       | 2,589                        | 3,87                 | 515                         |
| 27             | 0,369           | 1,038                      | 2,573                        | 3,69                 | 483                         |
| 28             | 0,386           | 1,039                      | 2,595                        | 3,58                 | 441                         |
| 29             | 0,327           | 0,999                      | 2,584                        | 3,94                 | 530                         |
| 30             | 0,393           | 1,054                      | 2,577                        | 3,70                 | 488                         |
| 31             | 0,341           | 1,014                      | 2,579                        | 3,68                 | 464                         |

Таблица Г3 – Данные по сепаратору мельницы ШК-32

| Номер<br>опыта | Исходные данные |                            |                              |                      | Результат<br>расчета        |
|----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
|                | $\mu_{се}$      | $\rho_{см}, \text{кг/м}^3$ | $\eta_{см}, 10^{-5}$<br>Па·с | $w_{см}, \text{м/с}$ | $\Delta p_{гом}, \text{Па}$ |
| 1              | 0,451           | 1,550                      | 1,998                        | 14,849               | 310                         |
| 2              | 0,544           | 1,644                      | 2,003                        | 17,470               | 377                         |
| 3              | 0,318           | 1,392                      | 2,013                        | 17,003               | 426                         |
| 4              | 0,310           | 1,386                      | 2,010                        | 18,814               | 507                         |
| 5              | 0,293           | 1,351                      | 2,029                        | 20,189               | 588                         |
| 6              | 0,434           | 1,520                      | 2,009                        | 14,372               | 300                         |
| 7              | 0,391           | 1,465                      | 2,018                        | 15,960               | 365                         |
| 8              | 0,369           | 1,437                      | 2,023                        | 17,977               | 452                         |
| 9              | 0,419           | 1,490                      | 2,023                        | 20,563               | 547                         |
| 10             | 0,347           | 1,412                      | 2,026                        | 21,166               | 609                         |
| 11             | 0,399           | 1,479                      | 2,013                        | 14,445               | 310                         |
| 12             | 0,367           | 1,449                      | 2,008                        | 16,968               | 408                         |
| 13             | 0,376           | 1,459                      | 2,009                        | 18,169               | 454                         |
| 14             | 0,432           | 1,513                      | 2,014                        | 20,478               | 535                         |
| 15             | 0,410           | 1,490                      | 2,013                        | 21,664               | 600                         |
| 16             | 0,351           | 1,424                      | 2,017                        | 20,386               | 566                         |
| 17             | 0,356           | 1,433                      | 2,013                        | 19,795               | 534                         |
| 18             | 0,448           | 1,530                      | 2,014                        | 18,574               | 448                         |

Таблица Г4 – Данные по сепараторам мельниц Ш-16

| Номер<br>опыта | Исходные данные |                            |   |                      | Результат<br>расчета        |
|----------------|-----------------|----------------------------|---|----------------------|-----------------------------|
|                | $\mu_{се}$      | $\rho_{см}, \text{кг/м}^3$ | $\eta_{см}, 10^{-5} \text{Па}\cdot\text{с}$ | $w_{см}, \text{м/с}$ | $\Delta p_{гом}, \text{Па}$ |
| 1              | 0,259           | 1,315                      | 2,030                                       | 22,937               | 458                         |
| 2              | 0,282           | 1,342                      | 2,026                                       | 21,747               | 409                         |
| 3              | 0,278           | 1,346                      | 2,017                                       | 21,728               | 408                         |
| 4              | 0,275           | 1,327                      | 2,035                                       | 22,257               | 430                         |
| 5              | 0,283           | 1,339                      | 2,030                                       | 21,555               | 404                         |
| 6              | 0,284           | 1,348                      | 2,021                                       | 22,154               | 421                         |
| 7              | 0,279           | 1,340                      | 2,026                                       | 22,509               | 435                         |
| 8              | 0,284           | 1,348                      | 2,021                                       | 21,862               | 411                         |
| 9              | 0,277           | 1,334                      | 2,030                                       | 22,699               | 444                         |
| 10             | 0,257           | 1,308                      | 2,034                                       | 23,314               | 473                         |
| 11             | 0,289           | 1,346                      | 2,030                                       | 21,674               | 406                         |
| 12             | 0,178           | 1,238                      | 2,020                                       | 27,718               | 681                         |
| 13             | 0,168           | 1,227                      | 2,020                                       | 27,389               | 671                         |
| 14             | 0,177           | 1,233                      | 2,024                                       | 26,960               | 649                         |
| 15             | 0,186           | 1,242                      | 2,025                                       | 25,987               | 603                         |
| 16             | 0,217           | 1,279                      | 2,020                                       | 26,281               | 599                         |
| 17             | 0,172           | 1,223                      | 2,029                                       | 27,476               | 677                         |
| 18             | 0,169           | 1,214                      | 2,038                                       | 26,849               | 654                         |

Окончание таблицы Г4

| Номер<br>опыта | Исходные данные |                            |                              |                      | Результат<br>расчета        |
|----------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
|                | $\mu$           | $\rho_{см}, \text{кг/м}^3$ | $\eta_{см}, 10^{-5}$<br>Па·с | $w_{см}, \text{м/с}$ | $\Delta p_{гол}, \text{Па}$ |
| 19             | 0,214           | 1,279                      | 2,016                        | 28,644               | 702                         |
| 20             | 0,196           | 1,264                      | 2,011                        | 27,893               | 675                         |
| 21             | 0,208           | 1,277                      | 2,011                        | 26,743               | 619                         |
| 22             | 0,192           | 1,244                      | 2,029                        | 26,396               | 619                         |
| 23             | 0,170           | 1,226                      | 2,024                        | 27,103               | 659                         |
| 24             | 0,161           | 1,202                      | 2,042                        | 26,767               | 656                         |
| 25             | 0,189           | 1,249                      | 2,020                        | 28,932               | 731                         |
| 26             | 0,171           | 1,222                      | 2,029                        | 28,027               | 703                         |
| 27             | 0,185           | 1,237                      | 2,029                        | 27,299               | 662                         |
| 28             | 0,193           | 1,242                      | 2,034                        | 26,370               | 619                         |
| 29             | 0,164           | 1,219                      | 2,024                        | 28,423               | 723                         |
| 30             | 0,197           | 1,253                      | 2,025                        | 27,619               | 669                         |
| 31             | 0,171           | 1,230                      | 2,020                        | 26,827               | 645                         |

## Приложение Д

### Статистическая обработка результатов моделирования

Таблица Д1 – Статистическая обработка результатов моделирования сопротивления мельниц

| Номер опыта | $\Delta p_{гом}$ Па | $\Delta p_{инж}$ Па | $\Delta p_{гом} + \Delta p_{инж}$ Па | $\Delta p_{экс}$ Па | Абсолютная погрешность $\Delta$ , Па | Относительная погрешность $\varepsilon$ , % |
|-------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---|
| 1           | 248,71              | 1244,26             | 1492,96                              | 1568,0              | 75,04                                | 4,79  |
| 2           | 302,64              | 1607,91             | 1910,54                              | 1930,6              | 20,06                                | 1,04  |
| 3           | 358,64              | 1949,76             | 2308,40                              | 2205,0              | 103,40                               | 4,69  |
| 4           | 425,52              | 2467,54             | 2893,07                              | 3008,6              | 115,53                               | 3,84  |
| 5           | 488,36              | 2892,63             | 3381,00                              | 3684,8              | 303,80                               | 8,24  |
| 6           | 250,59              | 1245,24             | 1495,83                              | 1568,0              | 72,17                                | 4,60  |
| 7           | 309,65              | 1607,63             | 1917,28                              | 1911,0              | 6,28                                 | 0,33  |
| 8           | 388,13              | 2145,55             | 2533,68                              | 2371,6              | 162,08                               | 6,83  |
| 9           | 450,74              | 2618,04             | 3068,78                              | 3106,6              | 37,82                                | 1,22  |
| 10          | 507,88              | 3055,67             | 3563,55                              | 3743,6              | 180,05                               | 4,81  |
| 11          | 262,00              | 1323,90             | 1585,90                              | 1656,2              | 70,30                                | 4,24  |
| 12          | 341,70              | 1852,67             | 2194,37                              | 2205,0              | 10,63                                | 0,48  |
| 13          | 373,41              | 2083,35             | 2456,76                              | 2450,0              | 6,76                                 | 0,28  |
| 14          | 446,69              | 2600,11             | 3046,80                              | 3087,0              | 40,20                                | 1,30  |
| 15          | 496,55              | 2994,91             | 3491,46                              | 3586,8              | 95,34                                | 2,66  |
| 16          | 469,96              | 2797,98             | 3267,94                              | 3655,4              | 387,46                               | 10,60                                       |
| 17          | 442,85              | 2596,75             | 3039,60                              | 3234,0              | 194,40                               | 6,01  |
| 18          | 372,61              | 2106,49             | 2479,09                              | 2479,4              | 0,31                                 | 0,01  |

Продолжение таблицы Д1

| Номер опыта | $\Delta p_{гом}, Па$ | $\Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{гом} + \Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{экс}, Па$ | Абсолютная погрешность $\Delta, Па$ | Относительная погрешность $\varepsilon, \%$ |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|
| 1           | 492,13               | 2733,95              | 3226,08                               | 3400,6               | 174,52                              | 5,13  |
| 2           | 436,57               | 2402,38              | 2838,95                               | 2966,5               | 127,51                              | 4,30  |
| 3           | 437,30               | 2403,58              | 2840,88                               | 3018,4               | 177,52                              | 5,88  |
| 4           | 464,49               | 2567,08              | 3031,57                               | 2920,4               | 111,17                              | 3,81  |
| 5           | 436,65               | 2370,70              | 2807,35                               | 3096,8               | 289,45                              | 9,35  |
| 6           | 457,63               | 2519,19              | 2976,83                               | 3204,6               | 227,77                              | 7,11  |
| 7           | 467,13               | 2609,63              | 3076,76                               | 2949,8               | 126,96                              | 4,30  |
| 8           | 443,12               | 2451,00              | 2894,12                               | 2949,8               | 55,68                               | 1,89  |
| 9           | 481,31               | 2688,50              | 3169,81                               | 2940,0               | 229,81                              | 7,82  |
| 10          | 508,68               | 2854,24              | 3362,92                               | 2891,0               | 471,92                              | 16,32                                       |
| 11          | 442,49               | 2396,98              | 2839,47                               | 2763,6               | 75,87                               | 2,75  |
| 12          | 476,66               | 2676,94              | 3153,60                               | 3038,0               | 115,60                              | 3,81  |
| 13          | 470,38               | 2589,38              | 3059,76                               | 2842,0               | 217,76                              | 7,66  |
| 14          | 457,25               | 2510,73              | 2967,98                               | 2741,1               | 226,92                              | 8,28  |
| 15          | 435,11               | 2378,06              | 2813,17                               | 3106,6               | 293,43                              | 9,45  |
| 16          | 436,20               | 2420,44              | 2856,63                               | 2928,2               | 71,61                               | 2,45  |
| 17          | 481,16               | 2677,18              | 3158,35                               | 3096,8               | 61,55                               | 1,99  |
| 18          | 465,37               | 2563,62              | 3028,99                               | 3096,8               | 67,81                               | 2,19  |
| 19          | 500,88               | 2860,74              | 3361,62                               | 3165,4               | 196,22                              | 6,20  |
| 20          | 482,06               | 2709,85              | 3191,92                               | 3008,6               | 183,32                              | 6,09  |

Окончание таблицы Д1

| Номер опыта | $\Delta p_{гом}, Па$ | $\Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{гом} + \Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{экс}, Па$ | Абсолютная погрешность $\Delta, Па$ | Относительная погрешность $\varepsilon, \%$ |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|
| 21          | 442,98               | 2461,27              | 2904,24                               | 2871,4               | 32,84                               | 1,14  |
| 22          | 436,61               | 2413,07              | 2849,68                               | 3234,0               | 384,32                              | 11,88                                       |
| 23          | 466,45               | 2577,45              | 3043,90                               | 3038,0               | 5,90                                | 0,19  |
| 24          | 461,05               | 2501,82              | 2962,86                               | 2744,0               | 218,87                              | 7,98  |
| 25          | 511,58               | 2917,48              | 3429,06                               | 2940,0               | 489,07                              | 16,63                                       |
| 26          | 494,36               | 2774,50              | 3268,86                               | 2866,5               | 402,36                              | 14,04                                       |
| 27          | 465,60               | 2591,04              | 3056,64                               | 3038,0               | 18,64                               | 0,61  |
| 28          | 445,31               | 2439,03              | 2884,33                               | 3410,4               | 526,07                              | 15,43                                       |
| 29          | 505,71               | 2843,96              | 3349,68                               | 2917,5               | 432,22                              | 14,81                                       |
| 30          | 473,12               | 2651,27              | 3124,39                               | 2959,6               | 164,79                              | 5,57  |
| 31          | 457,61               | 2501,01              | 2958,63                               | 3038,0               | 79,38                               | 2,61  |

Абсолютная погрешность

$$\Delta = \Delta p_{экс} - (\Delta p_{гом} + \Delta p_{инж}).$$

Относительная погрешность

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\Delta p_{экс}} 100\%.$$

Средняя относительная погрешность за все опыты по мельницам

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{i=0}^{49} \varepsilon_i / 49 = 5,58\%.$$

Таблица Д2 – Статистическая обработка результатов моделирования сопротивления сепараторов

| Номер опыта | $\Delta p_{\text{гом}}, \text{Па}$ | $\Delta p_{\text{инж}}, \text{Па}$ | $\Delta p_{\text{гом}} + \Delta p_{\text{инж}}, \text{Па}$ | $\Delta p_{\text{экс}}, \text{Па}$ | Абсолютная погрешность $\Delta, \text{Па}$ | Относительная погрешность $\varepsilon, \%$ |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|--|---|
| 1           | 317,7                              | 350,1                              | 667,8  | 627,2                              | 40,6                                       | 6,5   |
| 2           | 554,7                              | 662,4                              | 1217,1   | 921,2                              | 295,9                                      | 32,1  |
| 3           | 355,3                              | 343,5                              | 698,8  | 813,4                              | 114,6                                      | 14,1  |
| 4           | 455,7                              | 441,5                              | 897,3  | 1058,4                             | 161,1                                      | 15,2  |
| 5           | 529,6                              | 528,1                              | 1057,6   | 1166,2                             | 108,6                                      | 9,3   |
| 6           | 284,7                              | 306,7                              | 591,4  | 725,2                              | 133,8                                      | 18,4  |
| 7           | 350,1                              | 350,4                              | 700,6  | 744,8                              | 44,2                                       | 5,9   |
| 8           | 461,3                              | 468,5                              | 929,8  | 891,8                              | 38,0                                       | 4,3   |
| 9           | 722,2                              | 793,1                              | 1515,3   | 1078,0                             | 437,3                                      | 40,6  |
| 10          | 681,9                              | 719,4                              | 1401,4   | 1205,4                             | 196,0                                      | 16,3  |
| 11          | 272,4                              | 281,3                              | 553,7  | 686,0                              | 132,3                                      | 19,3  |
| 12          | 392,7                              | 401,5                              | 794,2  | 833,0                              | 38,8                                       | 4,7   |
| 13          | 479,6                              | 505,9                              | 985,5  | 842,8                              | 142,7                                      | 16,9  |
| 14          | 728,2                              | 777,9                              | 1506,0   | 1078,0                             | 428,0                                      | 39,7  |
| 15          | 815,0                              | 936,2                              | 1751,2   | 1430,8                             | 320,4                                      | 22,4  |
| 16          | 621,2                              | 667,7                              | 1288,8   | 1528,8                             | 240,0                                      | 15,7  |
| 17          | 579,6                              | 601,0                              | 1180,6   | 1293,6                             | 113,0                                      | 8,7   |
| 18          | 575,9                              | 640,8                              | 1216,7   | 1127,0                             | 89,7                                       | 8,0   |



Продолжение таблицы Д2

| Номер опыта | $\Delta p_{гом}, Па$ | $\Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{гом} + \Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{экс}, Па$ | Абсолютная погрешность $\Delta, Па$ | Относительная погрешность $\varepsilon, \%$ |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|
| 1           | 501,7                | 427,0                | 928,7                                 | 741,7                | 186,9                               | 25,2  |
| 2           | 464,3                | 438,0                | 902,3                                 | 867,6                | 34,7                                | 4,0   |
| 3           | 456,7                | 431,8                | 888,6                                 | 819,5                | 69,1                                | 8,4   |
| 4           | 485,6                | 455,5                | 941,1                                 | 671,6                | 269,5                               | 40,1  |
| 5           | 455,4                | 410,7                | 866,1                                 | 986,0                | 119,9                               | 12,2  |
| 6           | 489,7                | 451,5                | 941,2                                 | 787,2                | 154,0                               | 19,6  |
| 7           | 472,7                | 473,0                | 945,8                                 | 787,8                | 157,9                               | 20,0  |
| 8           | 514,6                | 492,8                | 1007,3                                | 992,6                | 14,7                                | 1,5   |
| 9           | 470,4                | 409,5                | 879,9                                 | 876,5                | 3,4                                 | 0,4   |
| 10          | 607,9                | 457,1                | 1065,0                                | 1189,3               | 124,3                               | 10,4  |
| 11          | 559,2                | 362,3                | 921,5                                 | 1036,8               | 115,3                               | 11,1  |
| 12          | 562,8                | 384,3                | 947,1                                 | 1144,6               | 197,5                               | 17,3  |
| 13          | 532,3                | 430,1                | 962,4                                 | 1176,1               | 213,7                               | 18,2  |
| 14          | 622,6                | 557,6                | 1180,3                                | 1246,0               | 65,7                                | 5,3   |
| 15          | 577,1                | 435,2                | 1012,3                                | 1240,5               | 228,2                               | 18,4  |
| 16          | 537,6                | 407,7                | 945,3                                 | 1097,0               | 151,7                               | 13,8  |
| 17          | 772,6                | 621,5                | 1394,1                                | 1245,9               | 148,2                               | 11,9  |
| 18          | 668,3                | 509,8                | 1178,2                                | 1233,9               | 55,7                                | 4,5   |
| 19          | 627,9                | 501,7                | 1129,5                                | 844,7                | 284,8                               | 33,7  |
| 20          | 569,5                | 453,6                | 1023,1                                | 1300,4               | 277,3                               | 21,3  |

Окончание таблицы Д2

| Номер опыта | $\Delta p_{гом}, Па$ | $\Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{гом} + \Delta p_{инж}, Па$ | $\Delta p_{экс}, Па$ | Абсолютная погрешность $\Delta, Па$ | Относительная погрешность $\varepsilon, \%$ |
|-------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|
| 21          | 551,5                | 401,7                | 953,2                                 | 1144,9               | 191,8                               | 16,8  |
| 22          | 603,5                | 445,9                | 1049,4                                | 1258,7               | 209,3                               | 16,6  |
| 23          | 572,6                | 443,4                | 1016,0                                | 869,5                | 146,5                               | 16,8  |
| 24          | 605,2                | 422,6                | 1027,8                                | 1178,9               | 151,1                               | 12,8  |
| 25          | 655,4                | 498,2                | 1153,6                                | 1137,1               | 16,5                                | 1,5   |
| 26          | 537,3                | 367,7                | 905,0                                 | 1048,4               | 143,5                               | 13,7  |

Средняя относительная погрешность за все опыты по сепараторам

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{i=0}^{49} \varepsilon_i / 49 = 15,3\%.$$