

На правах рукописи



Ощепков Василий Владимирович

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

05.14.14 Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2021

Работа выполнена на кафедре теплоэнергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ), г. Иркутск

Научный руководитель:

Иванов Сергей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Клер Александр Матвеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Тугов Андрей Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», г. Москва.

Защита состоится «10» июня 2021 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» июня 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.20,
кандидат физико-математических наук



Высокоморная
Ольга Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Экономия топливно-энергетических ресурсов рассматривается в Федеральной программе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» 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. 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.

Одним из основных агрегатов для измельчения твердого топлива в России являются шаровые барабанные мельницы (ШБМ). Область рационального использования ШБМ: очень твердые, абразивные угли с низким коэффициентом размолоспособности $k_{до}$; низкорекреационные угли с малым выходом летучих, требующие очень тонкого помола; угли с большим содержанием серы и минеральных примесей. Однако на тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго» из-за ценовой политики ШБМ размалывают угли марок 2Б, 3Б, Д, отходы углеобогащения. 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 на их энергопотреблении. Поэтому работа ШБМ, оснащенных пылевым бункером, с максимальной производительностью по топливу наиболее эффективна. Испытания с целью определения предельной производительности ШБМ весьма трудоемки и затратны. Полученная в ходе испытаний информация обычно не отражает влияния изменения характеристик топлива. 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 пылеприготовле-

ния в целом и их отдельных агрегатов уделялось и уделяется много внимания. В работах Г.Т. Левита, А.Н. Лебедева, Д.М. Хзмаляна и Я.А. Кагана 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 Ю.Г. Назмеева и Р.Г. Мингалеевой посвящены комплексной методике оценки термодинамической эффективности систем подготовки твердого топлива на тепловых электростанциях и котельных. В работах Л.В. Голышева и др. рассматривается повышение эффективности работы систем пылеприготовления с ШБМ путем управления производительностью мельницы. Математическое моделирование пылесистем с ШБМ с целью анализа влияния структуры пылесистемы на ее производительность проводилось в статьях С.И. Шувалова. Однако, методика определения оптимального режима работы ШБМ на непроектных углях, которая учитывала бы влияние комплекса режимных, внешних и конструктивных параметров, отсутствует. В зарубежной практике для размола каменных углей наибольшее распространение получили среднеходные мельницы, а для размола влажных бурых углей и лигнитов – мельницы-вентиляторы. Вследствие этого исследований, посвященных повышению энергоэффективности ШБМ, немного. В работах зарубежных авторов рассматривается эффективность измельчения с точки зрения различных подходов ее оценки (D.W. Fuerstenau, A.-Z.M. Abouzeid), анализируется распределение энергии размола в ШБМ (J W. Xie, Y. He, Z. Ge et al.), исследуется влияние новых конструкций барабана (M. Broseghini, M. D’Incau, L. Gelisio et al.) и добавок разных материалов (S. Nkwanyana, B. Loveday) на эффективность шаровых мельниц.

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. Из теоретических исследований следует отметить работы А.Ю. Вараксина, С. Соу, Г. Уоллиса, Р.И. Нигматулина, Л.И. Зайчика и В.И. Алипченкова, И.В. Деревича и др. Среди исследований экспериментального характера стоит выделить работы А.М. Дзядзио и А.С. Кеммера, Н. В. Соколова и М.Л. Кисельгофа, У. Стегмайера и М. Вебера, А.С. Сукомела, Ф.Ф. Цветкова и Р.В. Керимова и др. Но в перечисленных работах приводятся методы и модели, описывающие в основном только влияние концентрации твердых частиц на аэродинамическое сопротивление потоков газовзвеси. 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 регрессионного анализа и теории обработки экспериментальных данных в виде критериальных уравнений.

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 при размоле непроектного угля, 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 при размоле непроектного угля. Примененный метод исследования и полученные сведения о закономерностях аэродинамического сопротивления могут быть использованы в аэродинамических расчетах широкого класса установок систем пылеприготовления, таких как угле-размольные 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).

Научные 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 инжекцией частиц угольной пыли в ШБМ;
4. критериальные уравнения, позволяющие найти коэффициент аэродинамического сопротивления, обусловленного инжекцией частиц угольной пыли в центробежных сепараторах пыли;
5. методика анализа энергоэффективности работы ШБМ и определения минимального удельного расхода электроэнергии на пылеприготовление.

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

Расчеты и исследования в работе проводились на основе официальной статистической информации ПАО «Иркутскэнерго». 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» 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, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена актуальность, сформулированы постановка исследований, цель и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** приводится обзор литературы по вопросам, исследуемым в данной работе. Рассмотрены проблемы эксплуатации и повышения эффективности СПП энергетических котлов. При использовании ШБМ для размол 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.

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

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

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

Существенным фактором, влияющим на энергоэффективность ШБМ, и одним из основных параметров, характеризующих работу мельницы, является ее аэродинамическое сопротивление, следовательно, необходимо исследование газодинамики и пневмотранспорта угольной пыли.

Существующие методы расчета двухфазных дисперсных турбулентных течений могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся работы, основанные на лагранжевом траекторном описании дисперсной фазы – решении уравнений движения и энергии вдоль траекторий отдельных частиц. Другой метод моделирования основан на эйлеровом континуальном описании обеих фаз – на так называемых двухжидкостных моделях в рамках механики взаимопроникающих гетерогенных сред.

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

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 газовой взвеси 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 решении поставленных задач использовался специализированный пакет программ FlowVision, разработанный ООО «ТЕСИС».

Во **второй главе** проведено моделирование течения газовзвеси, кратко описаны объекты исследования, поставлена физико-математическая задача, приведены уравнения, описывающие газодинамику гомогенного запыленного потока.

На основе экспериментальных исследований разных авторов и физических представлениях, сделано предположение, что общее аэродинамическое сопротивление газовзвеси при движении в канале складывается из нескольких составляющих

$$\Delta P = \Delta P_{\text{гом}} + \Delta P_{\text{инж}} = (\xi_{\text{гом}} + \xi_{\text{инж}}) \rho w^2 / 2,$$

где $\Delta P_{\text{гом}}$, $\xi_{\text{гом}}$ – потери и коэффициент сопротивления гомогенного потока газовзвеси, обусловленные трением и местными потерями; $\Delta P_{\text{инж}}$, $\xi_{\text{инж}}$ – потери и коэффициент сопротивления, обусловленные инъекцией частиц в несущий поток; ρ , w – плотность и скорость газовой фазы.

Коэффициенты сопротивления в свою очередь являются функциями следующих величин:

$$\begin{aligned}\xi_{\text{гом}} &= f(\mu, \text{Re}), \\ \xi_{\text{инж}} &= f(\mu, w_{\text{вм}}, d_{\text{ч}}),\end{aligned}$$

где μ – пылесодержание смеси; Re – критерий Рейнольдса; $w_{\text{вм}}$, $d_{\text{ч}}$ – скорость вращения и диаметр частицы.

Численный эксперимент с целью определения аэродинамического сопротивления ШБМ и сепаратора пыли при транспорте угольной газовзвеси проводился с помощью пакета прикладных программ (ППП) FlowVision. На основании обзора литературных данных для расчета пневмотранспорта газовзвеси в пылесистеме была выбрана k - ε -модель турбулентности, как наименее затратная и достаточно точная.

При определении исходных параметров использовалась модель гомогенной смеси угольной пыли и воздуха (приближение несжимаемой гидродинамики).

Плотность смеси описывалась следующим уравнением

$$\rho_{\text{см}} = (1 - \alpha) \rho_{\text{в}} + \alpha \rho_{\text{ч}},$$

где α – объемная доля угольных частиц в смеси; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность угольных частиц.

Динамическая вязкость пылевоздушной смеси определялась по формуле Эйнштейна

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

где $\eta_{\text{в}} = 0,0000172 + 4,873 \cdot 10^{-8} t_{\text{в}} - 2,606 \cdot 10^{-11} t_{\text{в}}^2 + 9,202 \cdot 10^{-15} t_{\text{в}}^3$ – динамическая вязкость воздуха; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха.

Скорость смеси в данной модели равна скорости воздуха $w_{\text{в}}$

$$w_{cm} = w_g.$$

Полученные в результате численного эксперимента данные по сопротивлению обрабатывались так, чтобы выразить зависимость от критерия Рейнольдса (рисунок 1).

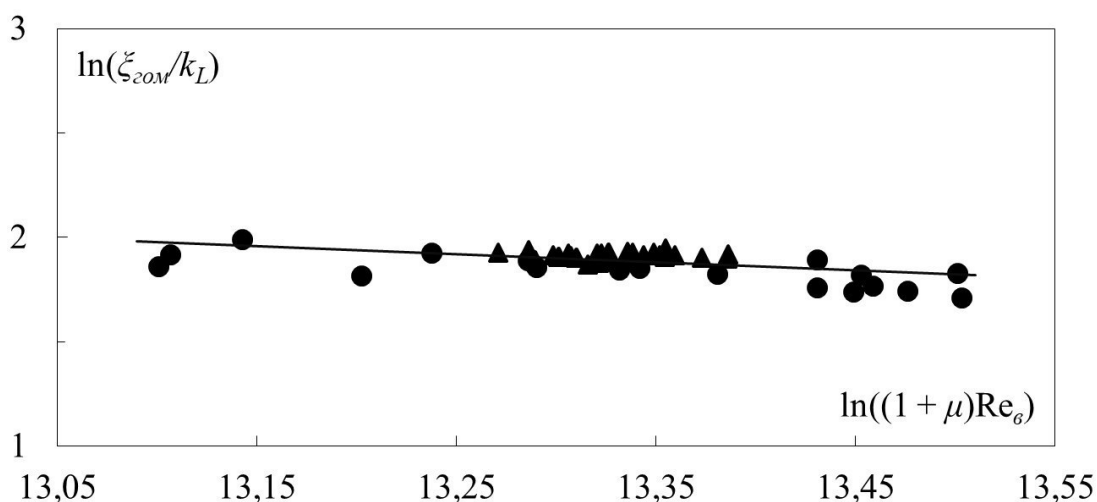


Рисунок 1 – Зависимость потерь давления гомогенного потока пылегазовой смеси от критерия Рейнольдса: ● – ШК-32; ▲ – Ш-16

Коэффициент сопротивления потока гомогенной газозвеси в ШБМ

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

где $\Delta P_g = \rho_g w_g^2 / 2$ – динамическое давление потока воздуха; $Re_g = 4G_g / (\pi D \eta_g)$ – критерий Рейнольдса; G_g – массовый расход воздуха; D – эффективный диаметр барабана мельницы или сепаратора; $k_L = L / D$ – коэффициент, учитывающий влияние линейных размеров барабана мельницы; L – длина барабана мельницы.

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента сопротивления гомогенного потока пылегазовой смеси от критерия Рейнольдса в сепараторах.

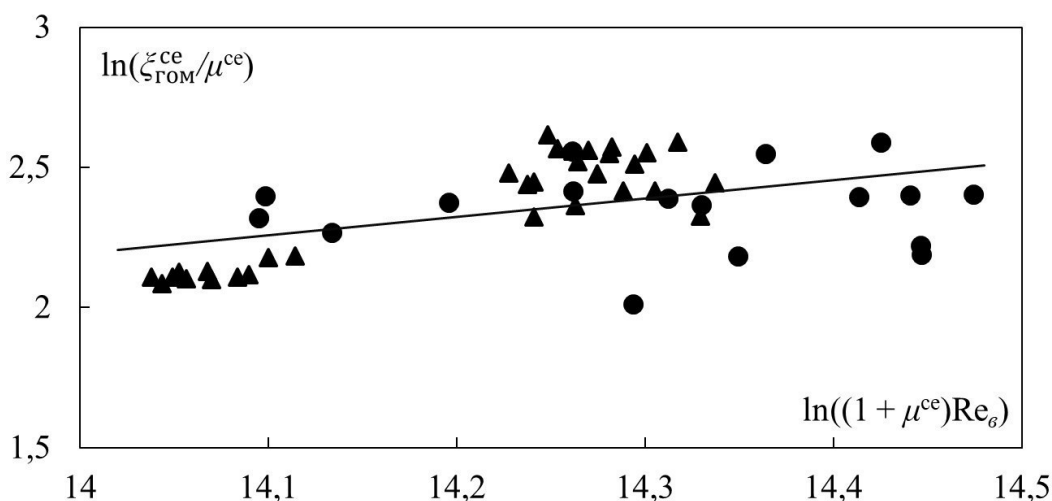


Рисунок 2 – Зависимость потерь давления гомогенного потока пылегазовой смеси от критерия Рейнольдса: ● – сепаратор диаметром 4,25 м; ▲ – сепаратор диаметром 3,3 м

Коэффициент сопротивления гомогенной смеси в сепараторе

$$\xi_{\text{гом}}^{ce} = \frac{\Delta P_{\text{гом}}^{ce}}{\Delta P_{\text{г}}} = 9,12 \cdot 10^{-4} \mu^{ce} (1 + \mu^{ce})^{0,66} \text{Re}_{\text{г}}^{0,66},$$

где $\Delta P_{\text{гом}}^{ce}$ – сопротивление сепаратора, полученное с помощью ППП FlowVision;
 μ^{ce} – пылесодержание смеси в сепараторе.

Полученные уравнения согласуются с известными формулами для определения потерь давления гомогенного потока.

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 инъекцией турбулизированным потоком. 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 инжестирована горизонтальным конвективным потоком. Эти вертикальные составляющие скорости существуют вследствие турбулентного характера движения воздуха. На инъекцию частиц затрачивается дополнительная энергия, которая увеличивает аэродинамическое сопротивление ШБМ.

Перепад давления $\Delta P_{\text{инж}}$, связанный с инъекцией частиц пыли в горизонтальный поток, функционально зависит от массовой концентрации пыли μ , плотности частиц $\rho_{\text{ч}}$ и скорости инъекции частиц $w_{\text{инж}}$

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

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

$$w_{\text{инж}} = w_{\text{вит}}.$$

Скорость витания одиночной сферической частицы в невозмущенном покоемся потоке газа без влияния стенок канала определяется следующим образом:

$$w_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}}{\xi_{\text{ч}} \rho_{\text{г}}}},$$

где g – ускорение свободного падения; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы; $\xi_{\text{ч}}$ – коэффициент сопротивления одиночной частицы.

Поскольку угольная пыль является полидисперсной средой, то необходимо найти средний диаметр частиц и среднеквадратичную скорость витания частиц. Для этого необходимо знать плотность распределения частиц по размерам. Анализ многочисленных зерновых характеристик размолы различных видов топлив показал, что кривые распределения хорошо описываются следующим уравнением:

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

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.

Функция плотности распределения частиц пыли по размерам

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

Тогда средний диаметр частиц равен

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

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

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

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.

Полученные данные $\Delta P_{инж}$ обрабатывались так, чтобы определить зависимость от среднеквадратичной скорости витания $\langle w_{вит}^2 \rangle$ (рисунок 3) и среднего диаметра частиц $\langle d_q \rangle$ (рисунок 4).

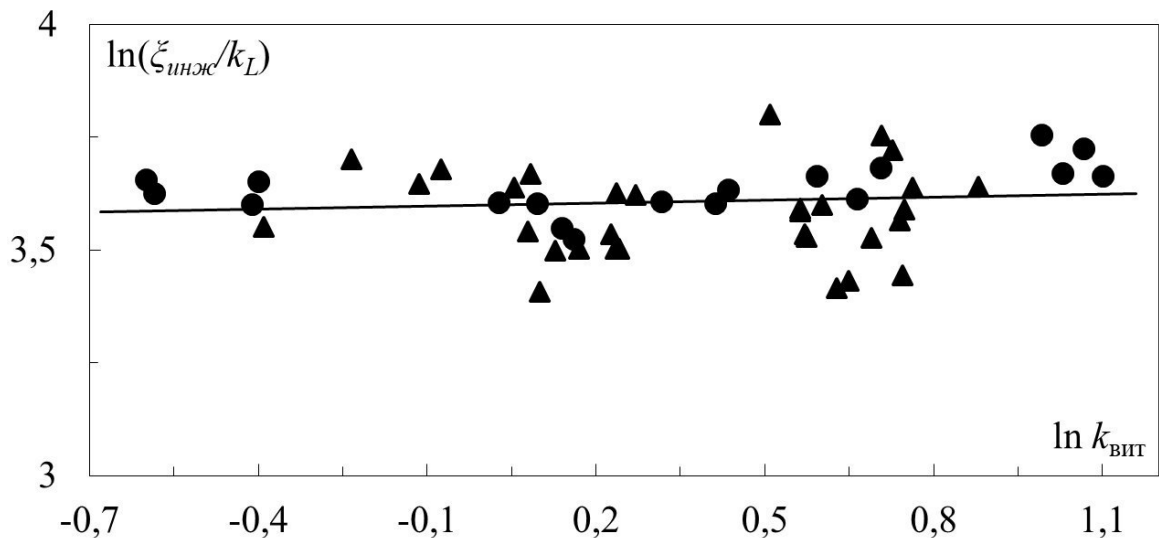


Рисунок 3 – Зависимость потерь давления, вызванных инжекцией частиц, от среднеквадратичной скорости витания частицы: ● – ШК-32; ▲ – Ш-16

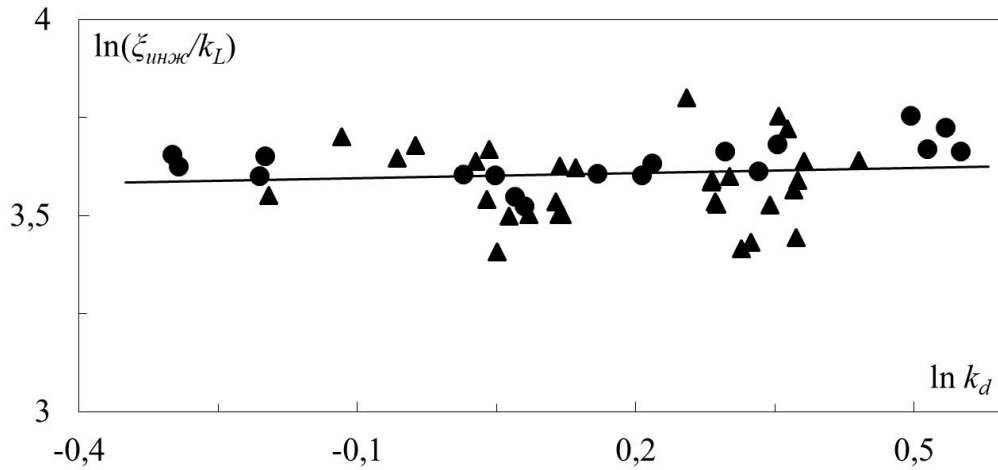


Рисунок 4 – Зависимость потерь давления, вызванных инъекцией частиц, от среднего диаметра частиц угольной пыли: ● – ШК-32; ▲ – Ш-16

Коэффициент сопротивления, обусловленного инъекцией размолотых частиц в ШБМ

$$\xi_{инж} = \frac{\Delta P_{инж}}{\Delta P_{\epsilon}} = 36,6(1 + \mu) k_{вум}^{0,0216} k_L,$$

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

где $k_{вум} = \langle w_{вум}^2 \rangle / \langle w_{вум}^2 \rangle^*$ – коэффициент, учитывающий влияние среднеквадратичной скорости витания; $k_d = \langle d_u \rangle / \langle d_u \rangle^*$ – коэффициент, учитывающий влияние среднего диаметра частиц; $\langle w_{вум}^2 \rangle^* = (\nu_{\epsilon} / \langle d_u \rangle)^2$ – характерная среднеквадратичная скорость витания частицы при $Re_u^2 = 1$; $\langle d_u \rangle^* = \nu_{\epsilon} / \langle w_{вум} \rangle$ – характерный средний диаметр частиц при $Re_u = 1$.

На рисунках 5 и 6 показаны зависимости коэффициента сопротивления, вызванного инъекцией частиц, от среднеквадратичной скорости витания и среднего диаметра частиц угольной пыли в сепараторах.

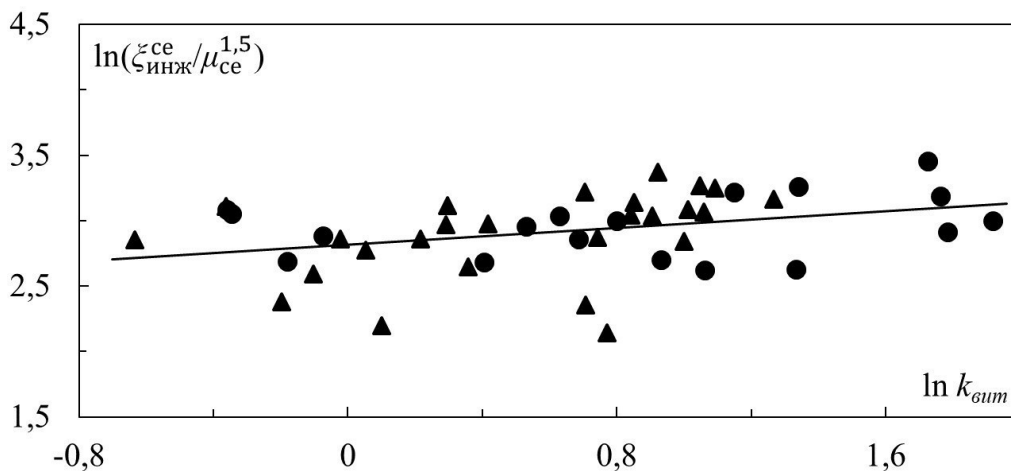


Рисунок 5 – Зависимость потерь давления, вызванных инъекцией частиц, от среднеквадратичной скорости витания частиц: ● – сепаратор диаметром 4,25 м; ▲ – сепаратор диаметром 3,3 м

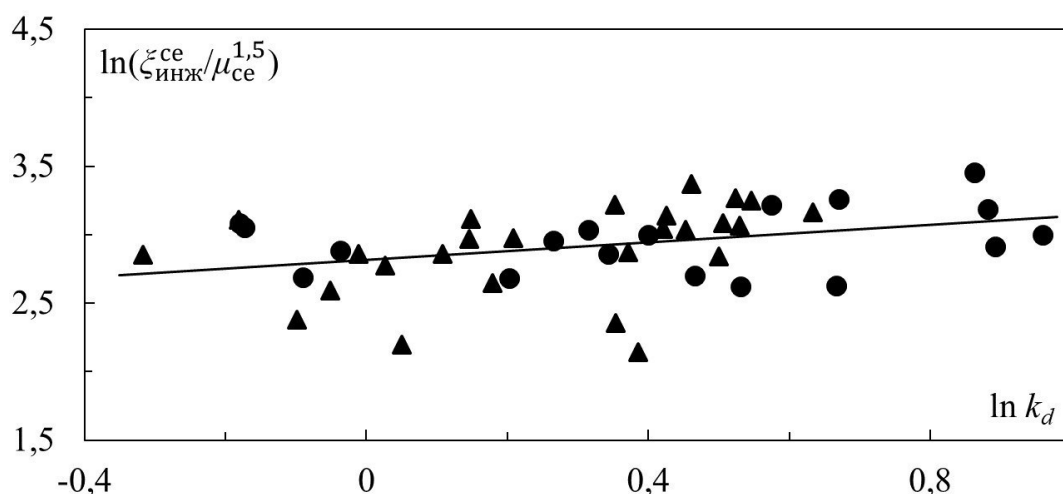


Рисунок 6 – Зависимость потерь давления, вызванных инжекцией частиц, от среднего диаметра частиц угольной пыли: ● – сепаратор диаметром 4,25 м; ▲ – сепаратор диаметром 3,3 м

Коэффициент сопротивления, обусловленного инжекцией заторможенных частиц в сепараторе

$$\xi_{инж}^{ce} = \frac{\Delta P_{инж}^{ce}}{\Delta P_6} = 16,7 \mu_{ce}^{1,5} (1 + \mu) k_{вм}^{0,16},$$

$$\xi_{инж}^{ce} = \frac{\Delta P_{инж}^{ce}}{\Delta P_6} = 16,7 \mu_{ce}^{1,5} (1 + \mu) k_d^{0,317}.$$

На рисунке 7 приведены аэродинамическое сопротивление ШБМ $\Delta P = \Delta P_{гом} + \Delta P_{инж}$, рассчитанное по полученным уравнениям, и экспериментальное сопротивление $\Delta P_{экс}$, измеренное в ходе наладочных испытаний.

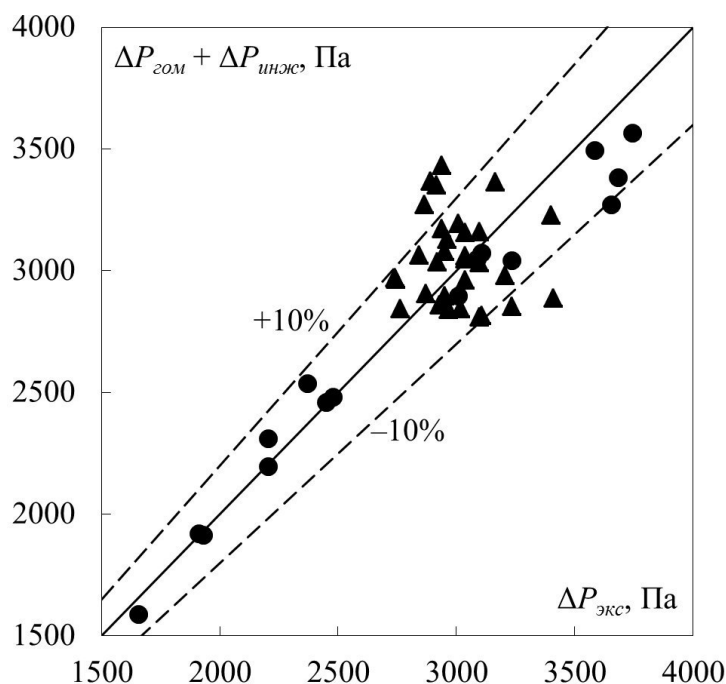


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных по потерям давления: ● – ШК-32; ▲ – Ш-16; сплошная линия – точное совпадение; пунктирные линии – отклонение $\pm 10\%$

Экспериментальные и расчетные данные по потерям давления имеют достаточно хорошее совпадение, т. к. отклонение аппроксимации аэродинамического сопротивления ШБМ от экспериментальных данных в основном не превышает 10%.

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 размол и $\Delta P_{гом}$ – потеря давления потока гомогенного потока газовзвеси 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.

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.

Эффективный режим работы пылесистемы достигается при равенстве размольной B_p и сушильной B_c производительностей мельницы. Сушильная производительность определяется из уравнения теплового баланса пылесистемы

$$B_c = \frac{V_6^{нфy} (h_{2в} + K_{нрс} h_{хв} - (1 + K_{нрс}) h_2) + Q_{разм} - Q_5}{\Delta W (2493 + 1,97 t_2) + c_t t_2}$$

где $V_6^{нфy}$ – расход воздуха через ШБМ при нормальных физических условиях (НФУ); $h_{2в}$ – энтальпия горячего воздуха, поступающего в ШБМ; $K_{нрс}$ – коэффициент присоса воздуха в ШБМ; $h_{хв}$ – энтальпия присасываемого холодного воздуха; h_2 – энтальпия воздуха после мельницы; $Q_{разм}$ – теплота, выделяющаяся при размол топлива; Q_5 – потери теплоты в окружающую среду; t_2 – температура воздуха после ШБМ; c_t – теплоемкость топлива.

Для оценки эффективности работы ШБМ было получено следующее уравнение:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_{nm} = \frac{N_{\delta}}{B_p} + \frac{N_{nm}}{B_p} = \\ \frac{0,0746 D_{\delta}^3 L_{\delta} n_{\delta} \psi_{\delta}^{0,56} \gamma_{н.ш} K_{\delta p} K_{мл} + 1,86 D_{\delta} L_{\delta} n_{\delta} S_{\delta} + \eta_{эл} \eta_{np} N_{дон}}{\eta_{эл} \eta_{np} B_c} + \\ + \frac{(1 + \mu) V_6 (\Delta P_{гом} + \Delta P_{инж})}{\eta_{эл} \eta_{мс} B_c}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathcal{E}$ – полный удельный расход электроэнергии ШБМ; $\mathcal{E}_p$ – удельный расход электроэнергии на размол; $\mathcal{E}_{nm}$ – удельный расход электроэнергии на пневмотранспорт; N_{δ} – мощность, потребляемая ШБМ; N_{nm} – мощность, обеспечиваю-

шая пневмотранспорт; B_p – размольная производительность мельницы; $D_{\bar{o}}$, $L_{\bar{o}}$ – диаметр и длина ШБМ; $n_{\bar{o}}$ – скорость вращения барабана; $\psi_{\bar{o}}$ – степень заполнения барабана шарами; $\gamma_{н.ш}$ – насыпной удельный вес шаров; $K_{\bar{o}p}$ – коэффициент, учитывающий форму брони; $K_{мл}$ – коэффициент, учитывающий свойства разматываемого топлива; $S_{\bar{o}}$ – толщина стенки барабана; $\eta_{эл}$ – КПД электродвигателя; $\eta_{пр}$ – КПД привода; $N_{дон}$ – дополнительная мощность, затрачиваемая на привод ШБМ; $\rho_{\bar{e}}$ – плотность воздуха; $V_{\bar{e}}$ – расход воздуха через ШБМ; $\eta_{мв}$ – КПД мельничного вентилятора.

На рисунке 8 представлена зависимость удельных энергозатрат мельницы ШК-32 от расхода воздуха через ШБМ при размол азейского бурого угля, построенная по уравнению (1) при $\psi_{\bar{o}} = 0,23$, $W^p = 25\%$, $W^{nl} = 14\%$.

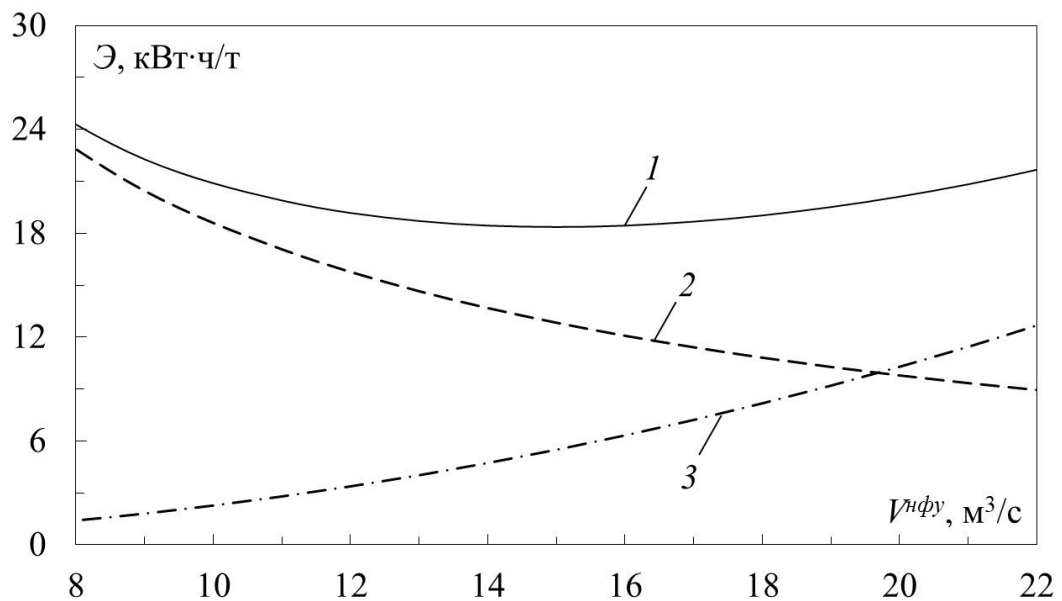


Рисунок 8 – Зависимость удельных энергозатрат мельницы ШК-32 от расхода воздуха через ШБМ: 1 – суммарные; 2 – на размол; 3 – пневмотранспорт

Видно, что удельные затраты энергии на размол пропорциональны расходу сушильного агента $\mathcal{E}_p \sim (V_{\bar{e}}^{нфy})^{-1}$, а затраты на транспорт пылегазового потока пропорциональны квадрату расхода сушильного агента $\mathcal{E}_p \sim (V_{\bar{e}}^{нфy})^2$. Это обстоятельство обеспечивает наличие минимума удельных затрат энергии на пылеприготовление в ШК-32 при определенном значении $V_{\bar{e}}^{нфy}$.

На рисунке 9 показаны расчетные данные по удельному расходу электроэнергии на пылеприготовление в мельнице ШК-32, полученные из уравнения (1) и экспериментальные данные, полученные в ходе наладочных испытаний. Отклонение аппроксимации энергозатрат ШБМ от эксперимента в основном не превышает 5%.

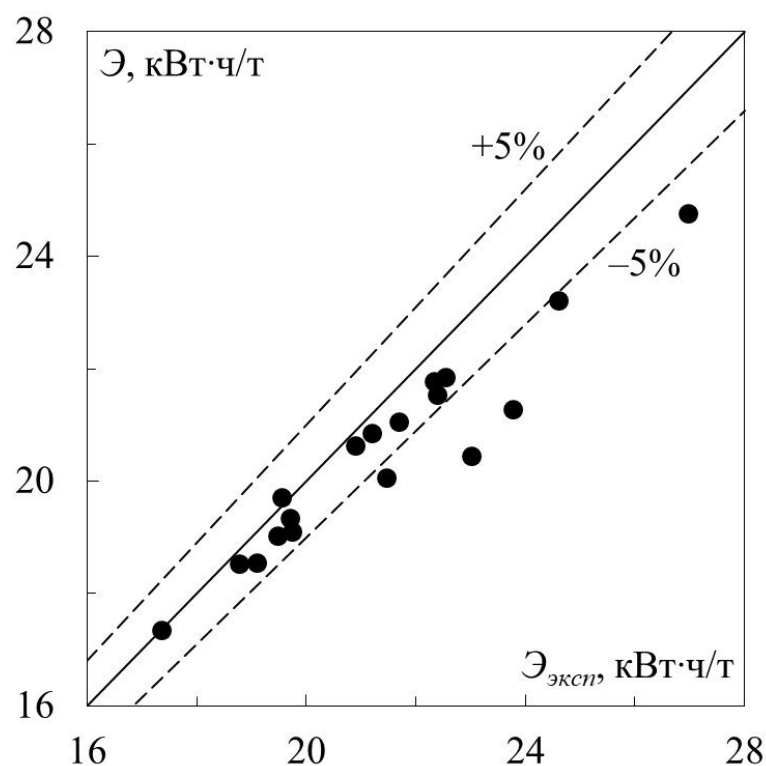
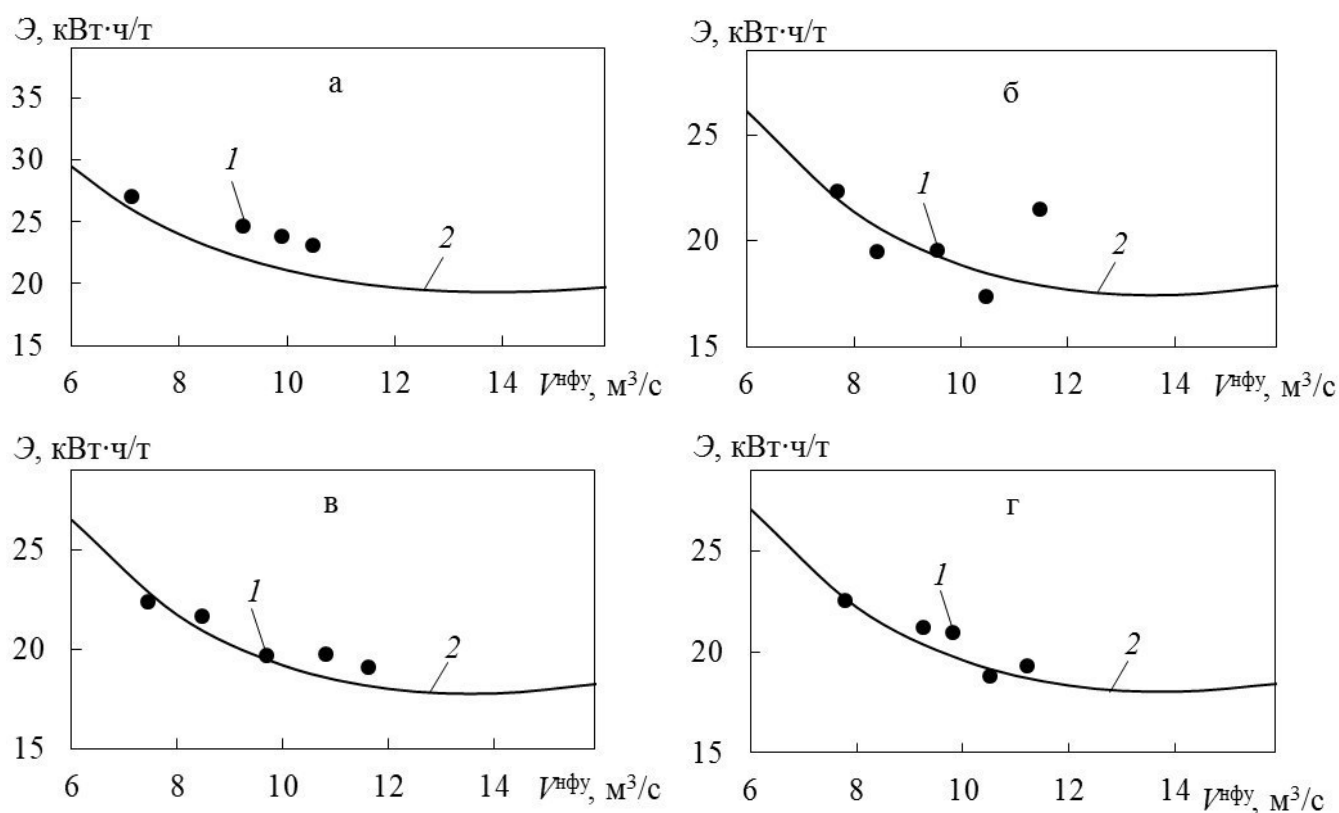


Рисунок 9 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных по удельным расходам электроэнергии на пылеприготовление мельницы ШК-32

На рисунке 10 представлена зависимость удельных энергозатрат мельницы ШК-32 при размоле азейского бурого угля от расхода воздуха при различных степенях загрузки.



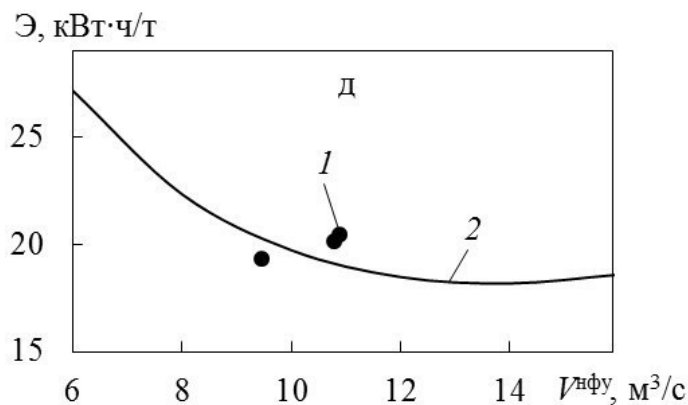


Рисунок 10 – Энергозатраты мельницы ШК-32 при различных расходах воздуха через ШБМ при НФУ и степени загрузки при размол азейского бурого угля: 1 – опытные данные, 2 – расчет по (1) при а) $\psi_{\delta} = 0,19$; б) $\psi_{\delta} = 0,23$; в) $\psi_{\delta} = 0,26$; г) $\psi_{\delta} = 0,3$; д) $\psi_{\delta} = 0,32$

На рисунке 10 видно, что энергозатраты на пылеприготовление в ШБМ, рассчитанные по уравнению (1), с удовлетворительной точностью совпадают с соответствующими экспериментальными данными. При этом энергозатраты минимальны при расходе воздуха в диапазоне $V_{\text{е}}^{\text{нфу}} = 12 \div 15 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует оптимальному режиму работы мельницы. Основным показателем качества пыли в этом диапазоне изменения расхода воздуха $R_{90} = 41 \div 57\%$ соответствует нормативным требованиям.

Основные результаты 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 $\Delta P_{\text{гом}}$ – потерь давления гомогенного потока газозвеси, вызванных трением и местными потерями, и $\Delta P_{\text{инж}}$ – потерь давления, обусловленных инжекцией угольных частиц в поток воздуха.

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

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 газозвеси для шаровых барабанных мельниц

$$\xi_{\text{гом}} = 1200 \frac{(1 + \mu)^{0,6}}{\text{Re}_{\text{е}}^{0,4}} k_L.$$

Коэффициент сопротивления, вызванного инъекцией 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

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

Коэффициент сопротивления, вызванного инъекцией частиц, для центробежных сепараторов пыли

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

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

Пределы применимости полученных уравнений:

$$Re_g = 3 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6,$$

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

$$k_{вит} = 0,6 \div 6,8,$$

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

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

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & \frac{0,0746 D_{\delta}^3 L_{\delta} n_{\delta} \psi_{\delta}^{0,56} \gamma_{н.ш} K_{бр} K_{мл} + 1,86 D_{\delta} L_{\delta} n_{\delta} S_{\delta} + \eta_{эл} \eta_{пр} N_{дон}}{\eta_{эл} \eta_{пр} B_c} + \\ & + \frac{(1 + \mu) V_g (\xi_{гом} + \xi_{инж}) \Delta P_g}{\eta_{эл} \eta_{мв} B_c}. \end{aligned}$$

Так минимальные затраты на размол азейского угля влажностью $W^p = 25\%$ с шаровой загрузкой $\psi_{\delta} = 0,2$ достигаются при $V_{г,опт}^{нфу} = 13,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (что соответствует производительности мельницы $B = 57 \text{ т/ч}$) и составляют $\mathcal{E} = 18,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$; при размолу мугунского угля ($W^p = 22\%$, $\psi_{\delta} = 0,2$) минимум энергозатрат получается при $V_{г,опт}^{нфу} = 12,9 \text{ м}^3/\text{с}$ ($B = 68 \text{ т/ч}$) 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 размолу мугунского бурого угля до тонины помола $R_{90} = 35\%$.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в изданиях, входящих в реферативные базы данных Scopus и Web of Science:

1. Oshchepkov, V.V. 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.

2. 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.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ощепков, В.В. 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.

2. Ощепков, В.В. 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.

3. Ощепков, В.В. 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.

4. Ощепков, В.В. 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.

Публикации в прочих изданиях:

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

2. 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.

3. 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.

4. 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.
5. Ощепков, В.В. Математическая модель аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы при транспорте угольной газовзвеси / 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.
6. Ощепков, В.В. Математическая модель аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы при транспорте угольной газовзвеси / 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.