Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева

УДК 621.311.22:621.926 На правах рукописи

КАМАРОВА САУЛЕ НУРТАЗАЕВНА

Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)

6D071700 – Теплоэнергетика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
Абильдинова С. К.
ассоц, профессор, доктор PhD

Зарубежный научный консультант:
Терзиев А. К.
профессор, доктор наук,

Республика Казахстан
Алматы, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ 4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ 5
ВВЕДЕНИЕ..... 6
1 АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ТЭС..... 12
1.1 Обзор существующих пылеприготовительных устройств на тепловых электростанциях 12
1.2 Топливное хозяйство ТЭЦ-2 г. Темиртау»..... 13
1.3 Индивидуальные схемы обеспечения измельченным углем..... 14
1.4 Мельницы для измельчения угля 17
1.5 Система пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау..... 21
1.6 Характеристика твердых топлив сжигаемых в котлах ТП-81..... 25
ТЭЦ-2 г. Темиртау»..... 25
1.7 Анализ работы оборудования ТЭЦ-2 г. Темиртау по измельчению сжигаемого угля 25
1.8 Выводы по разделу..... 30
2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАБОТЫ ПОДСИСТЕМ..... 31
2.1 Разработка методики определения эффективности систем пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау 31
2.2 Составление эксергетического баланса системы подготовки твердого топлива теплоэлектроцентрали..... 31
2.3 Совершенствование работы топливного тракта на основе внедрения устройства для предварительного дробления 37
2.5 Выводы по разделу..... 42
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗМОЛА ТОПЛИВА В ШАРОБАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦАХ 44
3.1 Задачи достижения максимальной эффективности работы шаробарабанных мельниц 44
3.2 Эффективность измельчения угля в ШБМ в зависимости от шаровой загрузки 44
3.3 Влияние режимных параметров на эффективность процесса работы системы пылеприготовления 45
3.4 Выбор типа моделируемой шаровой барабанной мельницы 50
3.5 Создание модели шаровой барабанной мельницы..... 51
3.5.1 Модели шаровой барабанной мельницы созданая на базе НАО «АУЭС» 51
3.5.2 Модель шаровой барабанной мельницы, созданная на базе 55
НАО «КарИУ» 55
3.6 Проведение эксперимента и определение параметров, влияющих на эффективность работы мельницы 58
3.6.1 Влияние мелющих шаров на интенсивность измельчения..... 58

3.6.2 Характеристики измельчаемых углей 60
3.6.3 Исследование качественных характеристик угольной пыли 62
3.6.4 Определение размольной производительности и удельного расхода энергии 77
3.7 Моделирование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице EDEM 81
3.8 Оценка погрешностей измерения 87
3.9 Выводы по разделу 88
4 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО УГЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗМОЛА 90
4.1 Выбор параметров оптимизации процесса измельчения на модели ШБМ .. 90
4.2 Моделирование процессов размола топлива в шаробарабанных мельницах для условий работы тепловых электрических станции 92
4.3 Выводы по разделу 99
5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ПЫЛЕСИСТЕМЫ С ШАРОВЫМИ БАРАБАННЫМИ МЕЛЬНИЦАМИ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ АСУ ТП 100
5.1 Автоматическое регулирование системы пылеприготовления ТЭС 100
5.2 Входные и выходные переменные взаимосвязанных функции для управления работой системы подготовки топлива 100
5.3 Существующая система автоматического регулирования ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» 101
5.4 Модернизация АСУ ТП системы пылеприготовления ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» 103
5.4.1 Алгоритм управления пуска и останова системы пылеприготовления ... 103
5.4.2 Разработка схемы системы автоматического управления пылеприготовления ТЭЦ-2 АО «АМТ» 104
5.4.2.1 Контроль и регулирование технологических параметров 104
5.4.2.2 Новая функциональная схема АСУТП системы пылеприготовления .. 107
5.5 Система автоматического регулирования и оптимизация ШБМ 109
5.5.1 Регулирование шаровой барабанной мельницы (ШБМ) 109
5.5.2 Регулятор температуры 110
5.5.3 Регулятор разряжения перед ШБМ 116
5.5.4 Система автоматического регулирования (САР) загрузки ШБМ 119
5.5.5 Система контроля уровня в бункере готовой пыли 121
5.6 Выводы по разделу 122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 126
Приложение А 135
Приложение Б 138
Приложение В 139
Приложение Г 150

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

1. «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», МОН РК Высший аттестационный комитет. – Алматы: 2004 г., №377–3 г. Введ. 15 .10. 2004 г.
2. ГОСТ 7.1–2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.
3. РД 34.24.501-96 - Типовая инструкция по эксплуатации индивидуальных систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами и промбункером
4. СТО 70238424.27.100.024-2008 - Система пылеприготовления ТЭС. Условия создания. Нормы и требования
5. СТО 70238424.27.100.025-2008 - Система пылеприготовления ТЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями.

«АМТ» – АрселорМиттал Темиртау
АУЭС – Алматинский университет энергетики и связи
КарИУ – Карагандинский индустриальный университет
ТЭС – тепловые электиреские станции
СПП – система пылеприготовления
ШБМ – шаровая барабанная мельница
ММ – мотковые мельницы
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
ТЭП – технико-экономические показатели
КПД – коэффициент полезного действия
ТЭЦ-2 – теплоэлектроцентраль
СПУ - питатель сырого угля
МВ – мельница вентилятор
ТММ - тангенциальные молотковые мельницы
ПСУ - питатели сырого угля
ПВКр - система подачи пыли высокой концентрации под разрежением;
ДВ – дутьевой вентилятор
ЗЗУ – запально-защитное устройство
ЗК – запорный клапан
ПЗК – предохранительно–запорный клапан;
ПСК – паросборный коллектор;
ПСУ – питатель сырого угля;
ПК – предохранительный клапан;
ТБ – технологическая блокировка;
ТЗ – технологическая защита;
$d_ш$ – диаметр шара, мм
d_{iy} – размер фракции угля, см
D – внутренний диаметр барабана, см
β – коэффициент, учитывающий долю энергии, идущий непосредственно на размол угля, при падениях на него шара
$m_ш$ – масса мелющего шара, кг
υ_p – скорость его в точке падения, м/с
R_{90} – остаток на сите 90 мкм частиц измельченного угля %
R_{200} – остаток на сите 200 мкм частиц измельченного угля %
$G_ш$ – шаровая загрузка мельницы, т
$\varphi_б$ – степень заполнения шарами, %
$N_б$ – потребляемая мощность мельницы, кВт

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В мировом потреблении органического топлива, уголь уступает только нефти. Однако произошедшее резкое повышение стоимости нефти и газа повышает интерес к использованию угля в качестве топлива для ТЭС (тепловые электрические станции).

Республика Казахстан занимает 8-е место по подтвержденным запасам угля, запасы угля составляет около 35 млрд.тонн (угли составляют примерно 45% всего топливного баланса). Уголь занимает очень большую долю в генерации электрической энергии - около 70%, несколько меньше при генерации тепловой энергии.

В Казахстане работают несколько крупнейших угольных ТЭС в том числе: Экибастузская ГРЭС-1 с установленной мощностью 4,0 тыс.МВт, Экибастузкая ГРЭС-2 с установленной мощностью 1,0 тыс.МВт, Аксуская ГРЭС с установленной мощностью 2,4 тыс.МВт, Карагандинская ГРЭС-1 электрической мощьностью 84,0 МВт, Карагандинская ГРЭС-2 электрической мощностью 665,0 МВт. В Казахстане установлены большое количество угольных ТЭЦ: 3 – в Павлодаре, 2 - в Алматы, 2 – в Астане, 3 – в Караганде, 1 – в Усть-Каменогорске и 1 - в Риддере, а также множество других тепловых станции. Уголь сжигается в измельченном виде с остатками угольной пыли на сите 90 мкм на уровне 20 %, такая степень измельчения достигается в различных мельницах и с различными схемами пылеприготовления.

Подготовка качественной угольной пыли для паровых котлов процесс энергозатратный, в связи с этим, актуальной задачей в диссертации является поиск оптимальных решений по подготовке топлива на ТЭС позволяющие снизить энергозатраты и увеличить производительность мельниц.

В диссертации рассматриваются пути снижения расхода электрической энергии и повышение эффективности процесса подготовки угольной пыли ТЭЦ-2 г. Темиртау. В работе предложена установка предварительного дробления угля, позволяющая фракционировать топливо перед измельчением, оптимизировать процесс измельчения угля в шаровой барабанной мельнице (ШБМ). Разработана модель ШБМ и представлена методика подбора оптимальной загрузки мелющими шарами мельницы, позволяющая снизить расход электроэнергии и увеличить производительность. Кроме того, разработана современная система автоматизации производственного процесса пылеприготовления с учетом минимизации энергопотребления.

Наиболее достоверные показатели эффективности измельчения в ШБМ могут быть получены на действующей мельнице. Однако проведение опытов на действующей мельнице весьма затруднительно, в связи с трудностями по доступу к работающей мельнице и особенно - по возможности изменения конструкции или режима работы. В связи с этой трудностью в диссертации было рассмотрена возможность создания уменьшенной модели шаровой барабанной мельницы. При создании модели ШБМ сохранение геометрического подобия становится обязательным и разработаная модель ШБМ точно воспроизводила

геометрическую форму барабана. На уменьшенной модели ШБМ можно проводить сравнительные исследования влияния различных факторов на процесс измельчения с большой достоверностью результатов, особенно - связанных с показателями измельчаемого угля. Сравнительные опыты с изменением исследуемого параметра должны проводиться при равной продолжительности времени процеса измельчения, т.к. уровень измельчения при изменении продолжительности процесса заметно изменяется.

Целью работы является исследование возможности снижения затрат электрической энергии в системе пылеприготовления на подготовку угольной пыли и определение путей улучшения основных показателей шаровых барабанных мельниц (ШБМ).

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели предусматриваются выполнение следующих задач:

- провести анализ существующих систем пылеприготовления и обзор существующих методов повышения энергоэффективности систем пылеприготовления;
- провести оценку тепловой и термодинамической эффективности индивидуальной системы пылеприготовления тепловой электростанции (ТЭЦ);
- разработка устройства для предварительного дробления угля;
- разработка методики моделирования процесса измельчения угля в невентилируемой ШБМ с требуемой достоверностью воспроизведения процесса измельчения;
- создание модели ШБМ, определение влияния параметров мельницы на интенсивность размола угля при изменении диаметров мелющих шаров и степени заполнения барабана мелющими шарами;
- разработка математической модели оптимизации параметров работы шаровой барабанной мельницы Ш-25А по размолу углей;
- провести сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований процессов измельчения топлива в шаровой мельнице;
- разработка современной системы автоматизации ШБМ с учетом теплотехнических характеристик топлива.

Объектом исследования является система пылеприготовления с шаровой барабанной мельницей ТЭЦ-2 г. Темиртау.

Методы исследования. В области измельчения твердого топлива в шаровой барабанной мельнице использовались теоретические, аналитические и экспериментальные методы исследования. Использование программ ALTAIR EDEM позволяют моделировать процесс измельчения и анализироать влияние изменений в процессе измельчения твердого топлива. В экспериментальных исследованиях получены данные о процессе измельчения твердого топлива в условиях стационарных мельниц.

Предмет исследования диссертационной работы – закономерности измельчения топлива, законы энергии разрушения твердого топива и пути уменьшения расхода удельной энергии на размол, анализ структуры и

параметров шаровой барабанной мельницы, оценка эффективности измельчения в мельнице.

Научная новизна результатов диссертации:

- разработана установка для предварительного дробления и формирования фракции твердого топлива перед ШБМ;
- разработана методика физического моделирования работы невентилируемой шаровой барабанной мельницы;
- разработана физическая модель шаровой барабанной мельницы, в которой процесс измельчения с изменением основных параметров мельницы воспроизводится с требуемой достоверностью;
- определено влияние изменения основных параметров мельницы на процесс измельчения;
- определено влияние изменения параметров измельчаемого угля на интенсивность процесса измельчения;
- разработана математическая модель шаровой барабанной мельницы, обеспечивающая, эффективную динамику работы мельницы с наилучшей производительностью и энергопотреблением;
- разработана современная система автоматизации для эффективного управления работы ШБМ с учетом теплотехнических характеристик сжигаемого топлива с применение компьютерного моделирования.

Практическая ценность работы. Предложена модернизация системы подготовки толива с шаровой мельницей, при которой расход электрической энергии на размол единицы объема (веса) угля снизился до уровня, характерного для молотковых и среднеходных мельниц, которая позволяет рекомендовать расширение использования ШБМ на ТЭС. Практическая значимость исследования отображается в использовании результатов в учебном процессе (акт внедрения в учебный процесс Алматинский университет энерегетики и связи им Г. Даукеева (АУЭС) и Карагандинский индустриальный университет (КарИУ)) и внедрением в производство (акт анедрения в производство ТОО «Кардробсервис» г. Караганда).

Достоверность работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием высокоточных приборов и современными методами исследования, и согласованием результатов численного моделирования и экспериментов с результатами других авторов в исследованном диапазоне изменения параметров.

Положения, выносимые на защиту:

- разработка нового устройства для дробления угля, позволяющее фракционировать твердое топливо перед измельчением;
- методика создания уменьшенной модели невентилируемой шаровой барабанной мельницы;
- способа размола угля: изменения размеров мелющих шаров, изменение степени заполнения барабана мелющими шарами, изменение степени заполнения барабана измельчаемым углем;

- результаты исследования влияния параметров измельчаемого угля на интенсивность размола: характеристик угля (разные угли), размеров частиц поступающего угля;
- результаты проведения экспериментальных исследований и математического моделирования процесса измельчения в мельнице;
- разработка система автоматизации для эффективного управления работы ШБМ с учетом теплотехнических характеристик сжигаемого топлива.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы апробированы на международных научно-практических и научно-технических конференциях и симпозиумах:
- X Международной научно-практической конференции «Конкурентноспособность нации - основное условие повышения благосостояние народа» (Темиртау, 2019);
- Дни научной науки – София, XXIV Научная конференция с международным участием EMF 2019 (София, Болгария, 2019);
- Международной образовательной блендинг – конференции «Образование фундамент евразиатского сотрудничества», посвященная 85-летию Университета Шакарима (Семей, 2019);
- IX Международной научно-практической конференции «Наука и образование в современном мире: Вызовы XXI века» (Нур-Султан, 2021);
- XV Международной научно-практической конференции «Global science and innovations 2021: CENTRAL ASIA», 2021 (Нур-Султан, 2021);
- Международная научно-практическая online конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2022);
- Международной научно-практической конференции «XV Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства» (Караганда, 2022).

Публикации. По результатам исследований опубликованы 28 публикации: 6 работы опубликованы в изданиях рекомендованных комитетом по обеспечению качества в науки и высшего образования МНиВО РК, 1 научная работа в журнале Scopus, входяший в международную реферативную базу данных Скопус (Scopus), 4 работы в зарубежных журналах, 22 работы в международных конференциях, 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора состоит: постановке задач исследований, анализе и обобщений литературных данных; в подготовке и оформлении заявок на патенты, разработке новых технических решений, а также разработке модели шаровой барабанной мельницы, в которой процесс измельчения воспроизводится с требуемой достоверностью; проведении экспериментов на модели шаровой барабанной мельницы по определению влияния параметров мельницы и измельчаемого угля на эффективность размола; в проведении математического моделирования процесса размола.

Объем и структура диссертации: Диссертация состоит из определения, обозначения и сокращения, введения, пяти разделов, заключения, списка использованной литературы и приложения. Диссертация изложена на 150

страницах компьютерного набора, включая 66 рисунка и 14 таблиц, 78 формул, и 121 наименований библиографических источников

Во введении представлены основные данные, в том числе актуальность исследовательской работы, конкретизирована исследуемая проблема. Показана основная идея, научная новизна, достоверность работы, представлен личный вклад автора, а также апробация результатов и публикации.

В первом разделе проведен анализ и обзор существующих систем подготовки топлива ТЭЦ-2 г. Темиртау. Приведены характеристики топливного хозяйства и теплоэнергетические характеристики систем подготовки твердого топлива. Проведен анализ, выявлены основные характеристики системы пылеприготовления, определены показатели различных мельничных устройств и отмечены их преимущества и недостатки. На основе обобщения опытных данных и расчетов определены рабочие характеристики шаровой барабанной мельницы.

Во втором разделе предложены мероприятия, направленные на повышения энергоэффективности систем пылеприготовления ТЭЦ-2, полученные на основании эксергетического анализа работы углеразмольной системы. Для достижения энергоэффективности проведен анализ каждого структурного блока и определены входные и выходные потоки эксергетической балансовой системы. По результатам расчетов определены эксергетические КПД отдельных блоков и самой системы подготовки топлива, характеризующие термодинамическую эффективность системы пылеприготовления для прогнозирования модернизации оборудования или внедрения новых технологий на станции.

В третьем разделе рассмотрены влияние параметров шаровой барабанной мельницы на интенсивность размола угля. С помощью использования современных программных продуктов для моделирования процесса измельчения определено влияние изменения параметров работы ШБМ и измельчаемого угля на эффективность процесса размола. Проведены серии экспериментов для определения уровня оптимальной загрузки шарами и измельчаемым углем для невентилируемой ШБМ, проведен анализ численного эксперимента выполненного в программной среде ANSYS EDEM. Установлено, что оптимальная степень шаровой загрузки для процесса измельчения в ШБМ находится в промежутке 0,30–0,35 от объема барабана мельницы.

В четвертом разделе разработана методика выбора оптимальных параметров для процесса измельчения твердого топлива в условиях его сжигания на ТЭЦ-2 г. Темиртау. Для этого были использованы экспериментальные модели шаровой мельницы на базе АУЭС и связи им. Г. Даукеева и на базе КарИУ. Даны рекомендации для эффективного усовершенствования процесса загрузки мельницы мелющими шарами и исходным топливом.

Для математического моделирования процесса измельчения твердого топлива была применена теория полнофакторного эксперимента, которая устанавливает влияние все возможных комбинации основных факторов эксперимента на целевую функцию отклика в виде параметров оптимизаций.

Получены уравнения регрессии, которые учитывают зависимость энергетических показателей работы мельниц от режимных параметров процесса измельчения.

В пятом разделе представлена современная система автоматического управления технологического процесса системы пылеприготовления (АСУ ТП) для подготовки угольной пыли на ТЭЦ-2 г. Темиртау. Создана система контроля работы мельничного оборудования, сбора и анализа данных о ходе процесса измельчения, поддержания заданных параметров размола, обеспечения безопасной и экономичной работы системы приготовления пыли.

Такая система позволяет автоматически регулировать параметры работы мельницы и поддерживать оптимальные режимы, что способствует повышению эффективности производства и снижению возникновения аварийных ситуаций.

В заключении отражены основные результаты и приведены выводы по диссертационной работе.

1 АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ТЭС

1.1 Обзор существующих пылеприготовительных устройств на тепловых электростанциях

В настоящее время возможности применения твердого топлива на тепловых станциях не исчерпаны, из-за его доступной и низкой стоимости. Однако существуют проблемы, связанные с использованием угля, такие как расход электроэнергии на подготовку твердого топлива на ТЭС и загрязнение окружающей среды из-за механического недожега топлива [10].

Практически на всех угольных тепловых электрических станциях (ТЭС) Казахстана в основном используется уголь казахстанских месторождений [11, 12]. Потенциал снижения расхода топлива ТЭС заключается в повышении КПД основного и вспомогательного оборудования котельных агрегатов [13].

На ТЭЦ-2 г. Темиртау применяется система пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) с промежуточным бункером. ШБМ имеет повышенный расход энергии на получение измельченного угля относительно систем с молотковыми или среднеходными мельницами примерно на 30-35 % [2]. В связи с этим поиск путей снижения потребления энергии при подготовке угля с шаровой барабанной мельницей становится актуальной задачей.

Проведение опытов на действующих ШБМ весьма трудоемки и существенно ограничиваются трудностью доступа к ним. С другой стороны, обзор известных исследований показал, что изучение работы мельниц на физических моделях развиты весьма слабо. Очень краткое перечисление особенностей моделирования работы мельниц приведено в работе [14].

Исследованием особенности и повышения эффективности работы размольных мельниц уделялось много внимания. По вопросам эффективности систем пылеприготовления и оборудования в целом посвящены работы Кисельгофа М.Л., Соколова Н.В. [4], Лебедева А.Н. [3], Левит Г.Т. [12], Ромадина В.П. [8], Хзмаляна Д.М. [13], и др., которые обобщают опыт эксплуатации разных типов мельниц и дают методические рекомендации по оптимальным режимам работы разных мельничных устройств и в том числе ШБМ [7]. Однако способов оптимизации режима работы мельниц, учитывающего совокупное влияние параметров недостаточно. Вопросами повышения эффективности систем пылеприготовления занимались авторы, такие как В. В. Ощепков [7], Г. Р. Мингалеева, Ю.Н. Зацаринная, Р. В. [15], С.И. Ханин [16], П.А. Хахалев [17].

В диссертационной работе были рассмотрены труды ученых, которые посвящены изучению оптимальной шаровой загрузке, а также проектированию футеровок ШБМ. В работе Ханина С. И. [16], исследованы процессы помола материалов различной степнью сопротивления к размолу и другие. Однако в работе недостаточно изучено влияние параметров мельниц, включая размеры

мелющих шаров, которые по существу являются источниками повышенного расхода энергии на измельчение угля, неизбежный подъем части угля вместе с шарами. Не очень доказаны предлагаемые степени заполнения барабана шаровой мельниц измельчаемым углем и мелющиим шарами. Весьма ограничены исследования по выявлению влияния показателей поступающего угля и размера фракции твердого топлива. Именно этот анализ позволил сформулировать задачи диссертационного исследования по повышению эффективности ШБМ.

1.2 Топливное хозяйство ТЭЦ-2 г. Темиртау

ТЭЦ-2 г. Темиртау является структурным подразделением АО «Арселор Миттал Темиртау». Установленная электрическая мощность ТЭЦ-2 г. Темиртау составляет - 435 МВт, располагаемая электрическая мощность - 387 МВт, рабочая электрическая мощность - 220 МВт [18, 19]. Такое заметное различие в проектной и рабочей мощности ТЭС, в значительной степени обусловлен со спецификой работы котельного оборудования и режимами работы с заметным отклонением от оптимальных значений. Проектным топливом является промежуточный продукт обогащения Карагандинских углей.

Принципиальная схема топливного хозяйства ТЭЦ-2 г. Темиртау состоит из топливоподачи, предварительного дробления, измельчение топлива а ШБМ [19, 20]. Вагоны с поступающим топливом взвешиваются перед разгрузкой и подаются в разгрузочное устройство, оснащенное роторным опрокидывателем с решеткой с ячейками 400х400 мм. Под разгрузочным устройством установлены питатель угля и дробилка с зубчатыми дисками. Топливо после дробления (до размеров фракции угля 15-25 мм) ленточными конвейерами отправляется на склад [5]. По ходу перемещения топлива от склада до бункеров мельниц установлены уловители металлов. Взвешивание топлива, поступающего в бункеры мельниц, производится на тракте топливоподачи на автоматических конвейерных весах. Топливо из бункера в мельницу подается скребковым стационарным питателем сырого угля с производительностью – 8–80 т/ч.

Система получения измельченного угля практически на всех угольных ТЭС относятся к категории так называемых индивидуальных систем. Каждый котел имеет свои мельницы и систему транспортирования измельченного угля от мельницы до котла. В. П. Ромадиным [8] была разработана система с так называемым центральным пылезаводом, в которой требуемый всей ТЭС объем измельченного угля производился в одном общем цеху и далее транспортировался до каждого котла. В наиболее общем случае, такое решение достаточно соответствовало к подходам, применяемых на ТЭС: обший склад топлива, общие подъездные пути, общая система охлаждения циркуляционной воды (реки, водохранилища, градирни), общий химический цех подготовки питательной воды и т.д. Однако это достаточно привлекательная система не нашла широкого использования в 20 веке. Вполне возможно что возрастающие требования по обеспечению комфортных условий работы персонала сделают

систему централизованного измельчения угля вострбованной, особенно при возможных переводах станций с природного газа на сжигание угля. Однако, в настоящее время преобладают индивидуальные системы обеспечения котла измельченным углем. Схема топливного хозяйства ТЭЦ-2 г. Темиртау представлен на рисунке 1.1.

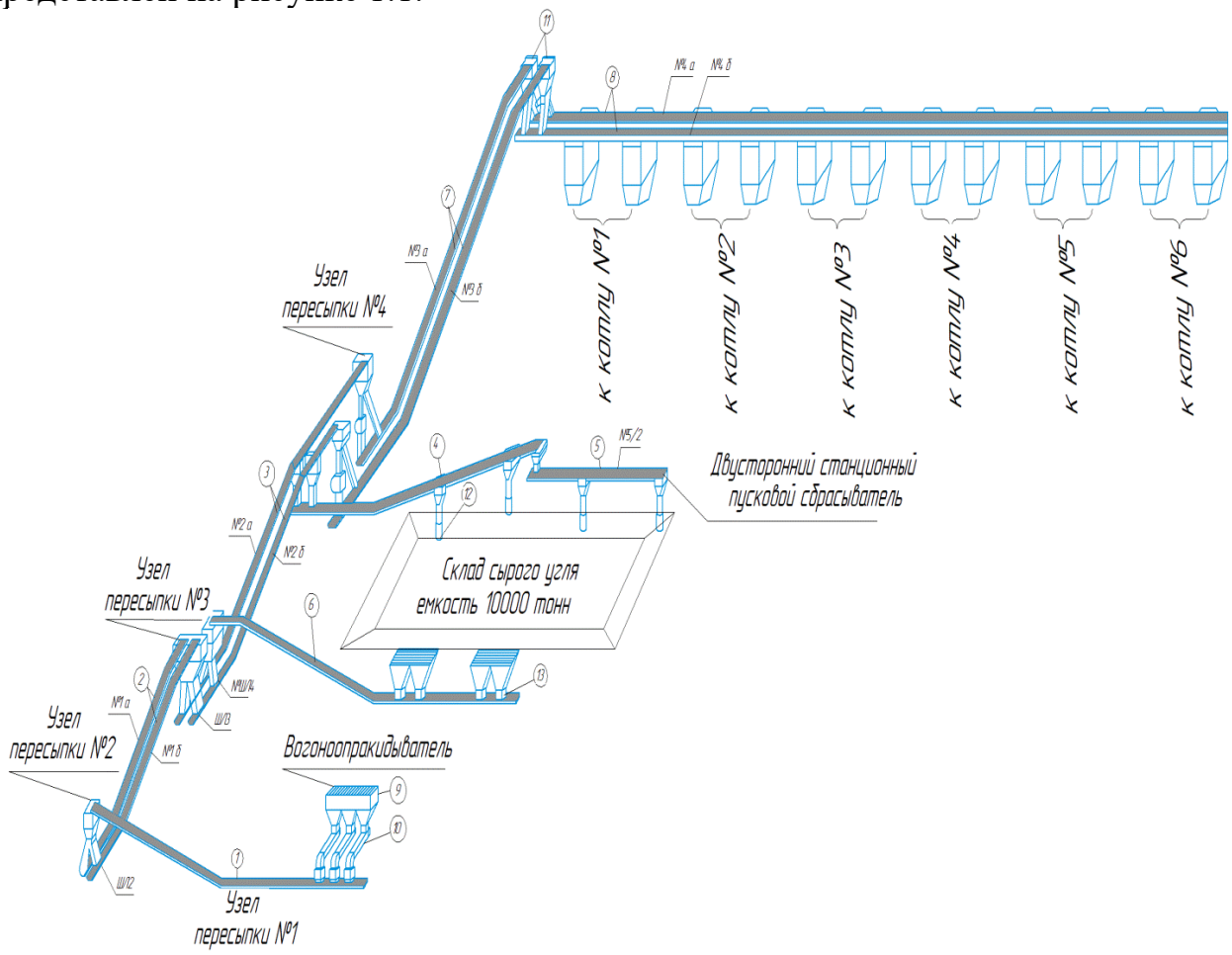


Рисунок 1.1 - Схема топливного хозяйства ТЭЦ-2 г. Темиртау

1.3 Индивидуальные схемы обеспечения измельченным углем

Можно отметить, что систему с промежуточным бункером с ШБМ вполне можно назвать системой с мини централизованным заводом. Выбор мельничного оборудования, обеспечивающего снабжение котла измельченным углем в требуемом количестве, с требуемым уровнем измельчения зависит от характеристик твердых топлив [3, 13]. При эксплуатации, это оборудование должна обеспечивать регулируемую в нужном уровне степень получения и надежную доставку угля, измельченного до заданной тонкости и подсушенной до требуемой влажности в требуемом количестве с его приемлемым распределением по горелкам топок котельных агрегатов [13, 22, 23].

Классифиикация индивидуальных систем снабжения измельченным углем по основным признкам представлены на рисунке 1.2 [24].

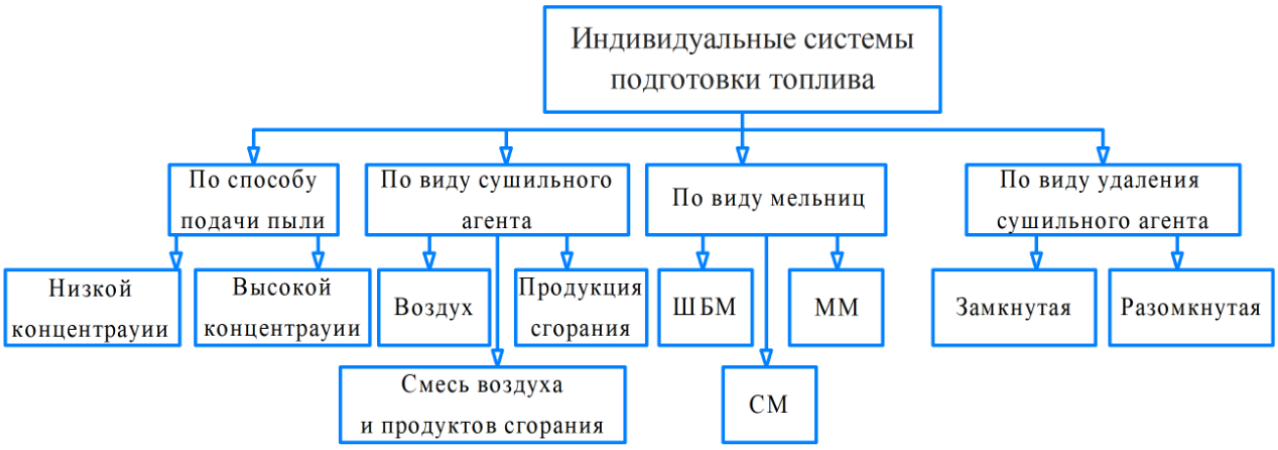


Рисунок 1.2 - Классификация индивидуальных систем подготовки топлива на ТЭС [24]

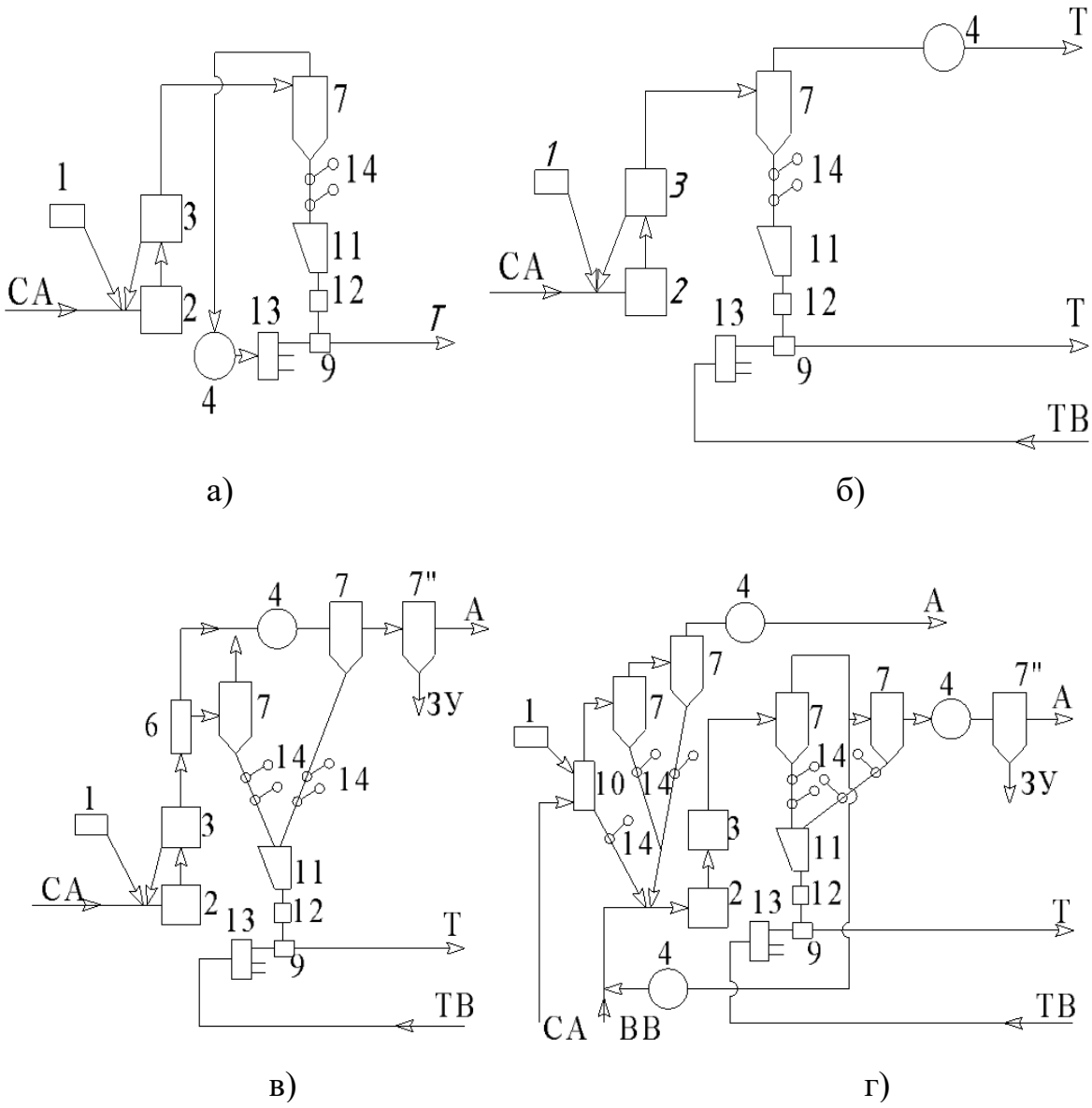
Выбор степени измельчения угля определяется характеристиками используемого угля [13]: влажностью, реакционной способностью, опасностью взрыва в процессе измельчения, склонностью к размолу (иногда называют сопротивляемостью к размолу).

Системы снабжения размолотым углем в зависимости от используемой схемы доставки измельченного угля от мельницы до горелоки, подразделяются на: систему с промежуточным бункером и систему прямого вдувания. Прямое вдувание применяется, как правило, с молотковыми или среднеходными мельницами, представляет схему, при которой смесь измельченного угля и сушильного агента направляется непосредственно к горелкам.

К достоинствам схем «прямого вдувания» можно отнести непосредственное поступление готовых угольных частиц от мельницы в горелки, что позволяет иметь относительно меньшую протяженность пути, что приводит к меньшему снижению темпратуры смеси по пути транспортирования.

Недостатками системы с прямым вдуванием смеси топлива и сушильного агнента можно считать: ограниченность температуры смеси топлива и воздуха, уровнем влажности и содержанием минеральной части в угле; недостаочный уровень регулировния соотношения топливо - воздух, который ухудшается при неизбежном повышении загрузки работающей мельницы при отказе одной из мельниц, необходимость обеспечения охлаждения элементов, расположенных в выходной части неработающих горелок, что способствует дальнейшему ухудшению соотношения топливо – воздух в работающих горелках, невозможность транспортирования измельченного угля горячим воздухом.

Более половины угольных ТЭС Казахстана, имеют системы измельчения с шаровыми барабанными мельницами с промежуточным бункером, в которых применяется сушка горячим воздухом [7]. Схемы систем снабжения топки измельченным углем, называемая системой с промежуточным бункером представлена на рисунке 1.3.



а - с транспортом пыли отработавшим сушильным агентом; б - полуразомкнутая с транспортом пыли горячим воздухом [63]; в - разомкнутая с использованием для разделения пылегазовой смеси пылеконцентратора; г - разомкнутая после сушки (в первом контуре) и с замкнутой вентиляцией, во втором контуре [63]: 1 - питатель; 2 - мельница; 3 - сепаратор; 4 - вентилятор; 7 - пылеотделитель инерционного типа; 7 - мокрый золоуловитель; 8 - затвор барабанного или другого типа; 9 – пылесмеситель [63]; 10 - труба-сушилка; 11 - бункер пыли; 12 - питатель пыли; 13 - распределительный короб; 14 - мигалка; СА - сушильный агент; Т - в топку; ТВ - транспортирующий воздух ТВ - транспортирующий воздух; ВВ - вентилирующий воздух; З в систему золоудаления [63]

Рисунок 1.3 - Схемы системы получения измельченного угля с шаровыми бараюбанными мельницами с промежуточным бункером с различными схемами транспортировпания измельченного угля [4]

Достоинствами системы с промежуточным бункером можно считать: возможность приемлемого регулирования соотношения топливо-воздкух; меньшую чувствительность останова одной из мельниц; возможность транспортирования измельченного угля в топку горячим воздухом при использовании углей с малой реакционностью (АШ, ПА, Т); возможность ввода в топку сушильного агента через «сбросные» горелки; возможность эксплуатации работающей мельницы с производительностью, близкой к проектной; обеспечение высокой маневренности котла; достаточно длительное сохранение в работе всех горелок котла при останове одной из мельниц; возможность подачи измельченного угля от мельниц соседнего котла.

К недостаткам схемы с промежуточным бункером относятся: повышенные затраты электроэнергии на размол угля; возможность возгорания измельченного угля в промежуточном бункере.

1.4 Мельницы для измельчения угля

Для размола топлива применяют различные мельничные устройства, использующие в работе принципы удара, раздавливания и истирания [4, 25].

Молотковая мельница используется для измельчения твердого топлива путем ударов молотков о материал. Твердое топливо загружается внутрь мельницы, где молотки вращаются, ударяя по топливу и разрушая его на мелкие частицы.

Роликовая мельница, также известная как вертикальная роликовая мельница, используется для измельчения твердого топлива путем прохождения его между парой вращающихся роликов. Этот тип мельницы обеспечивает хорошую измельчающую способность и управляемость процесса.

Роторная мельница используется для измельчения твердого топлива путем действия вращающихся роторов с лопастями или молотками. Твердое топливо подается внутрь мельницы и подвергается ударным силам, вызывающим разрушение и измельчение.

В валковых мельницах измельчение угля производится раздавливанием специальнысми валками, которые для обеспечения требуемого усилия прижимаются специальныыми пружинами. При этом, также как в остальных типах мельниц в незначительной степени присутствует и измельчение истиранием (в пространстве между валками и ограничителем - основным узлом требующим замены).

Выбор конкретного типа мельницы зависит от свойств твердого топлива, требуемого размера частиц, производительности и других факторов [4, 7].

По суммарной установленной мощности в Казахстане преобладают молотковые мельницы. Они имеют частату вращения до 700 оборотов в минуту, что приводит к линейной скорости била около 70 м/с. Основное измельчение обеспечивается ударом бил, однако в значительно меньшей степени присутствует и измельчение истиранием между билами и корпусом мельницы и в пространстве между билами.

К достоинствам молотковых мельниц можно отнести: достаточно компактны; отличаются малым (12–14 кВт·ч/т) расходом энергии на помол, (меньшим относительно ШБМ); практически не имеют ограничений по характеристикам измельчаемого угля.

Недостатки молотковых мельниц (ММ) являются сравнительно быстрый износ бил, требуется замена через 300–700 часов работы; высокая стоимость заменяемых бил; повышенная чувствительность к попаданию посторонних предметов; большая сложность удаления остатков измельчаемого угля из остановленной мельницы; достаточная продолжительность ремонта мельницы

В валковых (также называются и среднеходными) мельницах, которые установлены всего на нескольих ТЭС Казахстана, размол топлива происходит в основном за счет раздавливания валками (встречаются шарами), прижимаемыми специальными пружинами и, в меньшей степени, истиранием между валками и ограничетелем, устанавливаемым на краю размольного стола [4, 7].

Достоинства валковых мельниц: меньшие затраты энергии на размол (по сравнению с ШБМ и молотковыми) 10–12 кВтч/т; компактность; несколько большее время наработки на отказ (относительно молотковых мельниц);

Недостатки валковых мельниц: чувствительность к попаданию посторонних предметов (меньше, чем в молотковых мельннцах); повышенная чувствительность к влажности поступающего угля; сложная схема введения сушильного воздуха; повышенный износ ограничителя, устанавливаемого на краю размольного стола; сложность ремонта элементов мельницы [4].

Мельницы-вентиляторы (МВ) [27] представляют собой центробежные вентиляторы с плоскими лопастями, приспособленные для одновременной работы в качестве вентилятора и в качестве мельницы [13]. Допускают двухступенчатый размол топлива с предвключенными билами, расход энергии на размол на уровне 6–10 кВт·ч/т, что весьма близко к значениям валковых мельниц.

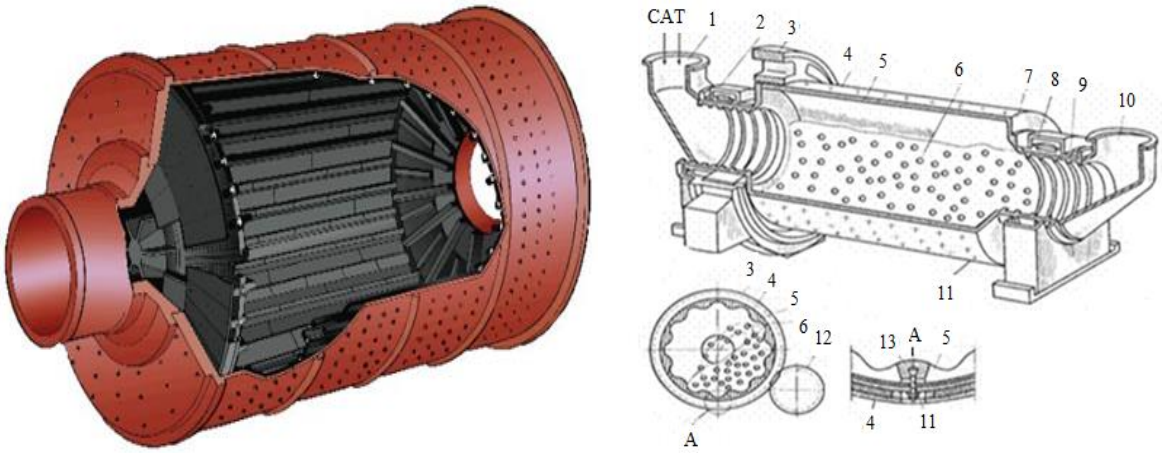
К достоиству мельниц вентиляторов можно отнести совмещение процесса измельчения с его транспортированием до горелок. недостатком можно считать ограниченность по типу размалываемых углей

Шаровая барабанная мельница является наиболее распространенным типом мельницы на ТЭС. Однако повторно можно отметить, что по суммарной установленной мощности ШБМ уступает молотковым мельницам. Она работает путем загрузки твердого топлива в барабан и мелющих шаров. Вращение барабана и мелющих шаров создают силы измельчения, разрушая твердое топливо на мелкие частицы. Барабан мельницы вращается с частотой всего 15-20 об/мин, что даже при диаметре барабана на уровне 3 метров, приводит к скорости движения стенки барабана на уровне менее 1 м/с, что пракатически исключает износ внутренней поверхности барабана.

Достоинства ШБМ: универсальность по размалываему углю (ограничение возникает только по влажности, допустимый уровень, которой заметно выше уровня в других типах мельниц); повышенная единичная производительность; использование в качестве мелющих органов дешевых чугунных шаров;

возможность ввода мелющих шаров вместе с углем; отсутствие необходимости удаления мелющих шаров; отсутствие чувствительности к попаданию посторонних предметов; большое число часов работы на отказ; малый объем ремонтных работ; возможность работы в вентилируемом и в невентилируемом режимах; участие шаров в процессе измельчения практически до полной потери диаметра (преимущественно истиранием).

Недостатками ШБМ можно считать: затраты энергии на измельчение угля; большие габариты барабана; малая скорость мелющих шаров; перемещение части измельчаемого угля вместе с мелющими шарами; возможность повышенного взаимодействия мелющих шаров между собой; заметное снижение интенсивности измельчения шарами по мере уменьшения размеров шаров (вследствие истирания углем и между собой); повышенный уровень шума. Схема шаровой барабанной мельницы приведен на рисунке 1.4.



1 - патрубок подачи топлива и сушильного агента; 2, 8 - опорно-упорной и опорный подшипник; 3 - зубчатый венец; 4- барабан; 5 - броневые плиты; 6 - стальные шары; 7 - торцевая стенка; 9 - цапфы; 10 - патрубок готовой пыли.

Рисунок 1.4 - Шаровая барабанная мельница

Влияние части этих отрицательных факторов приводит к повышенному, относительно других типов мельниц, расходу энергии на размол угля.

При сравнении достоинств и недостатков различных систем измельчения угля, традиционно, приводятся затраты электрической энергии и расход металла изнашивающих устройств на тонну размолотого угля. Именно по этим двум показателям шаровые барабанные мельницы проигрывают другим мельницам. В таблицах 1.1 и 1.2 приведено сравнение многих показателей разных типов мельниц и возможных систем транспортирования измельченного угля при разных типах мельниц.

Таблица 1.1 - Сравнения показателей мельниц

Показатели	Типы мельниц	Шаровая барабанная	Молотковая	Средне-ходная (валковая)	Цилинд-рическая
1	2		3	4	5
1	Наибольшая производительность (тонн/час)	100-120	10-15	15-20	Не имеется в эксплуа-тации
2	Замена мелющих элементов	Шары могут доставлять-ся вместе с углем	4	2-4	1-2
3	Работа без останова (часы)	Практически без ограни-чений	700-800	1500-2000	практиче-ски без ограниче-ний
4	Время простоя в ремонте (часы)	Практически нет	20-40	10-15	(3-5)
5	Чувствительность к попаданию твердых предметов	Практически нет	Останов в связи с разруше-нием бил	Ускорен-ный износ ограничит еля	Практи-чески нет
6	Затраты электрической энергии на размол кВт час/тонна	15-20	14-16	10-12	6-10
7	Расход металла на измельчение (грамм /тонна)	160-180	110-120	80-100	60-80
8	Металл используемый для мелющих элементов	Шары из рядового чугуна	Била из износо-стойкого металла, ударная часть бил на плавляются особо стойким металлом	Валки и стол размола из износо-стойкого металла	Из Износо-стойкого металла

Таблица 1.2 - Показатели систем транспортирования измельченного угля

Показатели	Типы мельниц	Шаровая барабанная	Молотковая	Средне-ходная (валковая)	Цилиндрическая
1	2		3	4	5
1	Транспортирование измельченного угля	Горячим воздухом/ сушильным агентом	Только сушильным агентом	Только сушильным агентом	Только горячим воздухом
2	Регулирование соотношения топливо – воздух	Регулируется питателем измельченного угля	В головке сепаратора	В головке сепаратора	Регулируется питателем измельченного угля
3	Протяженность пылепроводов	Приемлемое равенство при установке бункеров с двух сторон	Может заметно различаться	Может заметно различаться	Приемлемое равенство при установке бункеров с двух сторон
4	Отклонение от оптимального соотношения топливо - воздух при останове одной мельницы	Практически сохраняеся достаочно длительное время	Может заметно отклоняться	Может заметно отклоняться	Соотношение обеспечивается питателем измельченного угля

1.5 Система пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау

На ТЭЦ-2 г.Темиртау используется система пылеприготовления (СПП) с шаровыми барабанными мельницами [26] при «полностью разомкнутой» схеме. В котельном цехе установлены 6 котлов Е-420/140 модель, производительностью 420 т/ч, давление пара на выходе Р=140 кгс/см^2, температура перегретого пара $t_{пп}$-540 ^{0}С, на каждом котле установлены две пылесистемы. На каждой пылесистеме имеются две шаровые барабанные мельницы, всего на ТЭЦ-2

установлено 12 мельниц (ШБМ). Характеристика основного и вспомогательного оборудования СПП ТЭЦ-2 г. Темиртау представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Характеристика основного вспомогательного оборудования системы пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау

Наименование	Ед.	Кол-во	Примечание
1	2	3	4
Мельница			
1. Мельница Ш-25А-на котел	шт.	2	ШБМ-320/570
2. Диаметр внутренний	мм	3200	
3. Длина барабана	мм	5700	
4. Производительность по ППМ Карагандинского угля	тн/ч	34,2	По АШ-25 т/час
5. Вес мельницы с патрубками	тн.	98,8	
6. Вес шаров по фракциям 30/40	тн.	50,6	
7. Вес шаров общий в 1 мельнице	тн.	50,6	
8. Смазка циркуляционная от насосной установки БГИ-24А			
9. Диаметр патрубка	мм	1200	
10. Тип редуктора Ц-800			ДАЗ 0-15-49-8
11. Передаточное число привода		41,5	
12. Производительность насоса	л/мин	50	
13. Мощность эл. двигателя	кВт	800	
14. Макс. ток эл. двигателя мельницы	А	95	
15. Число оборотов мельницы	об/мин	17,83	
16. Напряжение электродвигателя мельницы	В	6000	
17. Метод подсушки угля и температура реагента.	^{0}С	200	Горячий и слабо-подогретый воздух после ВЗП
Мельничный вентилятор			
1. Тип мельничного вентилятора			ВМ 100/200
2. Производительность МВ при 80^{0}С	тыс. м^3/ч	90	
3. Мощность электродвигателя МВ и тип	кВт	630	ДАЗ 0-13-50-4
4. Напор	мм.вод.ст	1190	
5.Напряжение электродвигателя МВ	В	6000	
6. Ток потребляемый МВ	А	70	
7. Число оборотов электродвигателя МВ	об/мин	1480	

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
Мельничный вентилятор			
1. Тип мельничного вентилятора			ВМ 18 А
2. Производительность МВ при 80°С	тыс. $м^3$/ч	108	
3. Мощность электродвигателя МВ	кВт	500	ДАЗ 0-13-50-4
4. Напор	мм.вод.ст	1065	
5. Напряжение электродвигателя МВ	В	6000	
5. Ток потребляемый МВ	А	70	
6. Число оборотов электродвигателя МВ	об/мин	1480	
Бункера			
1. Ёмкость бункеров сырого угля	$м^3$	570*2	
2. Ёмкость бункеров готовой пыли	$м^3$	430	
Сепаратор и циклон			
1. Размер сепаратора и его тип	мм	4250	ТКЗ ВТИ
1. Размер пылевого циклона	мм	3000	«НИИГАЗ»
Реверсивный шнек			
1. Производительность винтового конвейера (реверсивного шнека)	т/ч	60	
2. Длина шнека	мм	39	
3. Диаметр шнека	мм	500	
4. Электродвигатель	кВт/ч	20	
5. Число оборотов	об/мин	975	
6. Напряжение	В	380	
7. Редуктор типа	РМ-500	15,75	АО-73-6
Пылепитатели			
1.Питатели пыли и их тип	УЛПП-2-64		Лопастной
2. Кол-во пылепитателей на котле	шт	12	
3. Производ. пылепитателей	т/ч	10	
4. Мощность эл. двигателей пылепитателя	кВт	2,4	
5. Вид тока (мах. Ток в электроде)	А	12	Постоянный
6. Нижний предел числа оборотов	об/мин	500	
7. Верхний предел числа оборотов	об/мин	1500	

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4
Питатели сырого угля			
1.Питатели сырого угля и производительность	тн/час	15-62,5	Ленточный
2. Эл. двигатель постоянного тока кот. № 1,2	кВт	10	
3. Мощность	об/мин	200-1500	
4.Число оборотов	об/мин	20-1500	
5.Ток	А	1-5	

Для регулирования сушки угля в процессе измельчения используется горячий воздух, который и обеспечивает вынос измельченных частиц из мельниц, сепараторов и мельничным вентилятором [23]. Смесь измельченного угля и сушильного агента из сепаратора направляется в циклон - отделитель и отделенные частицы поступают в промежуточным бункер, который соединен с промежуточным бункером другой мельницы специальным шнеком [33, 34]. Принципиальная схема системы обеспечения измельченным углем котлов ТЭЦ-2 г. Темиртау представлена на рисунке 1.5.

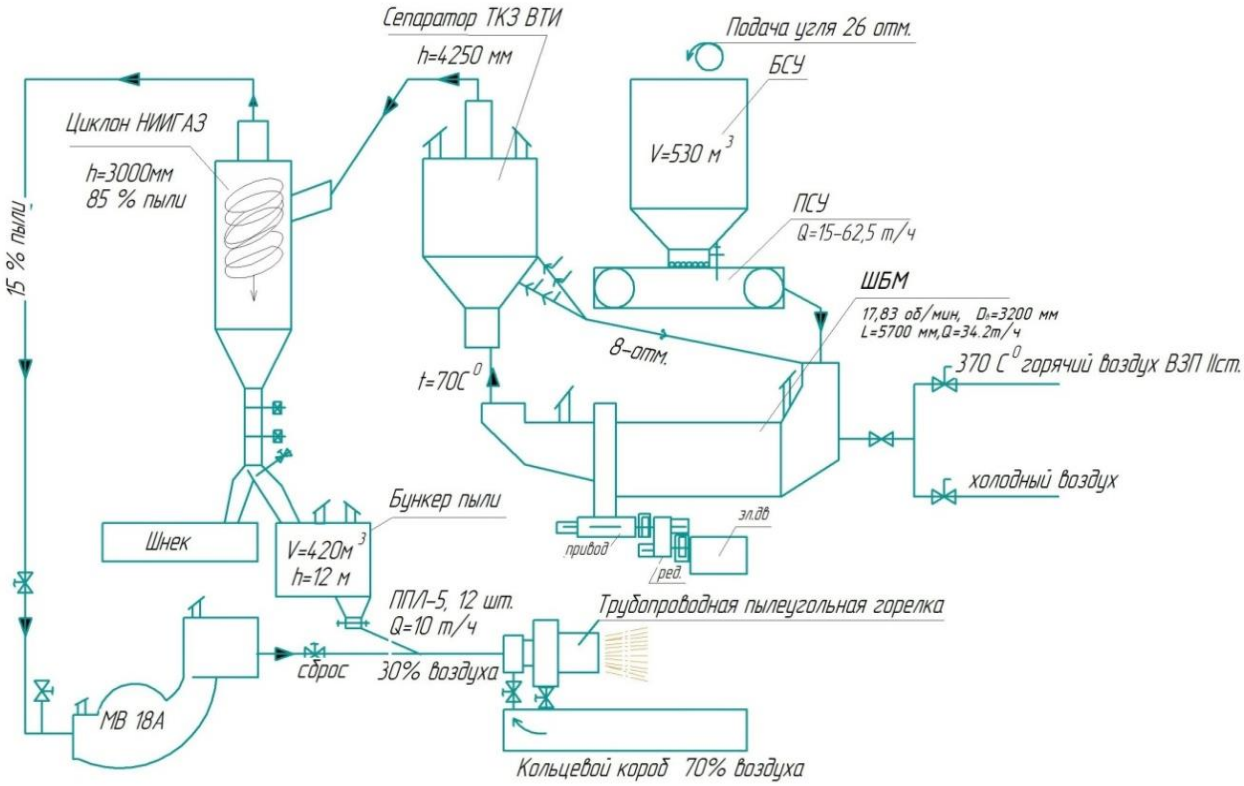


Рисунок 1.5 - Принципиальная схема системы обеспечения измельченным углем котлов ТЭЦ-2 г. Темиртау [31]

1.6 Характеристика твердых топлив сжигаемых в котлах ТП-81 ТЭЦ-2 г. Темиртау»

Проектным топливом для котлов ТЭЦ -2 г. Темиртау является так называемый «промежуточный продукт обогащения Карагандинских углей», однако наблюдается поступление и других углей на станцию. В настоящее время на ТЭЦ-2 кроме проектного Карагнадинского угля сжигаются угли Экибастузского и Шубаркольского месторождения (СТ РК 1526-2-2016 «Угли Шубаркольского месторождения»). Эти угли отличаются по теплотворной способности, зольности, влажности и по выходу летучих веществ, вполне пригодны для сжигания в котлоагрегате ТП-81. В таблице 1.4 и 1.5 [34] приведены элементарный состав топлив.

Таблица 1.4 - Элементарный состав твердых натуральных топлив

Бассейн	Марка	Класс	Состав, %						
			$W^р$	$A^р$	$S^р$	$C^р$	$H^р$	$N^р$	$O^р$
Карагандинский промпродукт	К	ППМ	9,0	34,6	0,7	46,8	2,9	0,8	5,2
Карагандинский (низкосортный)	К	ППМ	10,0	20,7	0,8	59,3	3,9	1,0	4,6
Экибастузский	СС	Р	6,5	36,9	0,7	44,8	3,0	0,8	7,3
Шубаркольский	Д	Р	12	5	0,5	60,4	5,35	1,45	15,3

Таблица 1.5 – Характеристика твердых натуральных топлив

Бассейн	$Q_н^р$, кДж/кг	Выход летучих $V^г$, %	Тонкость помола угольной пыли $R_{90,\%}$	$K_{ло}$
Карагандинский промпродукт	18130	28,0	18/20/21	1,4
Карагандинский (низкосортный)	22900	27,0	18/25	1,4
Экибастузский	17380	25,0	15/27	1,3
Шубаркольский	22400	43,5	20/30	1,3

1.7 Анализ работы оборудования ТЭЦ-2 г. Темиртау по измельчению сжигаемого угля

Рыночная экономика стремится к эффективному распределению ресурсов в соответствии с потребностями рынка. Это требует от предприятий и организаций высокой производительности и оптимизации производственных процессов [68]. ТЭС [31]. Для этого необходимо находить решение, который требует системного научного подхода. В системе измельчения угля и его

транспортирования до горелок расход энергии достигает 20–30 кВт·ч на 1 тонну пыли [68]. Среднегодовой расход электрической энерии на измельчение 1 т. Угля составляет: промпродукт Карагандинского угля – 63,4 тыс.кВт·ч; Экибастузкий уголь – 62,5 тыс.кВт·ч; Шубарколский уголь – 60,1 тыс.кВт·ч.

В ШБМ затраты энергии определяется совокупным влиянием многих факторов коэффициент размольной способности $К_{ло}$ [31] сжигаемого угля, требуемой тонкость помола R_{90}, конструкцией и соотношениями параметров используемой мельницы [2, 31].

Увеличение доли измельчаемого угля с несколько повышенными размерами соответственно снижает затраты энергии. Заметное влияние на количество энергии, затрачиваемой на измельчение угля до требуемой степени несомнено влияет и размер частицы, вводимой в мельницу. Определение затрат энерии определим [27]:

$$Э_р = \frac{N_с + N_{доп}}{В}, \quad (1.1)$$

где $N_с$ – мощность электродвигателя мельницы, кВт, [27];

$N_{доп}$ – дополнительная мощность, расходуемая на другие нужды, кВт [2] (при использовании быстроходных асинхронных двигателей равна 15 кВт);

В – производительность мельницы, т/ч [2].

Удельный расход на пневматическое транспортирование, кВт·ч/т определяется по формуле [2]:

$$Э_{ПТ} = \frac{N_{ПТ}}{В}, \quad (1.2)$$

где $N_{ПТ}$ – мощность, затраченная на пневмотрансортировку сушильного агента и готовой пыли, кВт [2].

$N_с$ – мощность, потребляемая электродвигателем, кВт [29].

Общий расход равен, кВт·ч/т [2]:

$$Э = Э_Р + Э_{ПТ}, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1.3)$$

Увеличение скорости подачи сушильного агента приводит к возрастанию удельного расхода электроэнергии на пневмотранспорт $Э_{пт}$. При этом удельный расход электроэнергии на размол $Э_р$ снижается из-за увеличения производительности мельницы. Для оптимизации суммарного расхода электроэнергии Э необходимо поддерживать оптимальную расчетную температуру $t_{рас}$ сушильного агента при которой будет достигнута максимальная размольная производительность мельницы и дальнейшее увеличение этой температуры будет влиять незначительно на удельные показатели расхода электроэнергии [68].

Параметры влияющие на изменения расхода энергии в СПП представлены на рисунке 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10 и 1.11. Расход электроэнергии $Э_р$ обратно пропорционален коэффициенту размольной способности $К_{ло}$, чем грубее угольная пыль, тем меньше расход удельной энергии и при этом будет возрастать производительность мельниц. Чем больше скорость сушильного агента, тем больше расход удельной энергии, это связано с внешними энергозатратами при поддержании сушки, например, при работе мельничных вентиляторов. Диаметр и количество мелющих шаров влияют также прямо пропорционально на расход энергии.

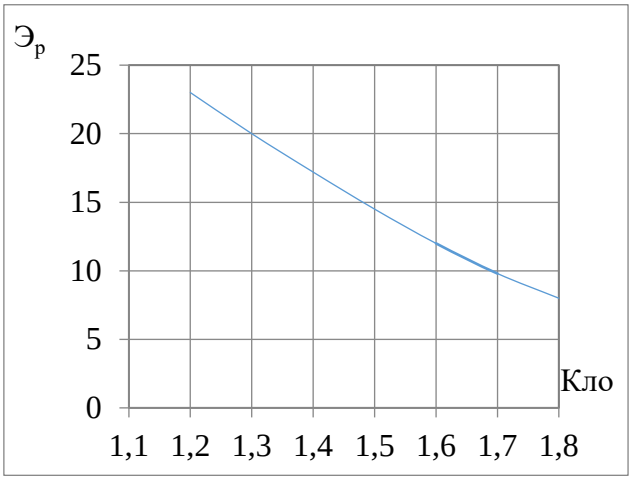


Рисунок 1.6 - Расход электроэнергии в зависимости от размолоспособности $К_{ло}$

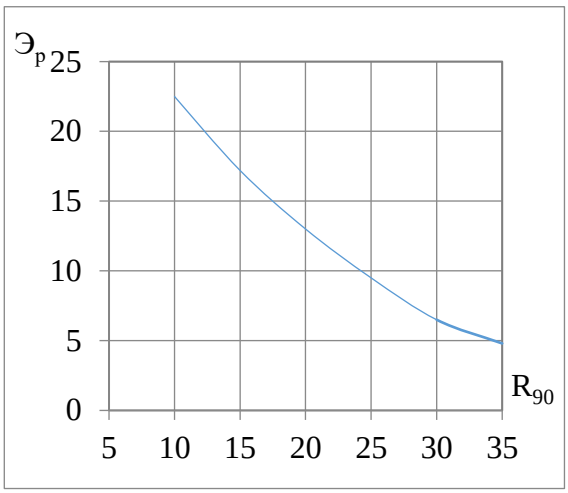


Рисунок 1.7 Расход электроэнергии в зависимости от тонкости размола R_{90}

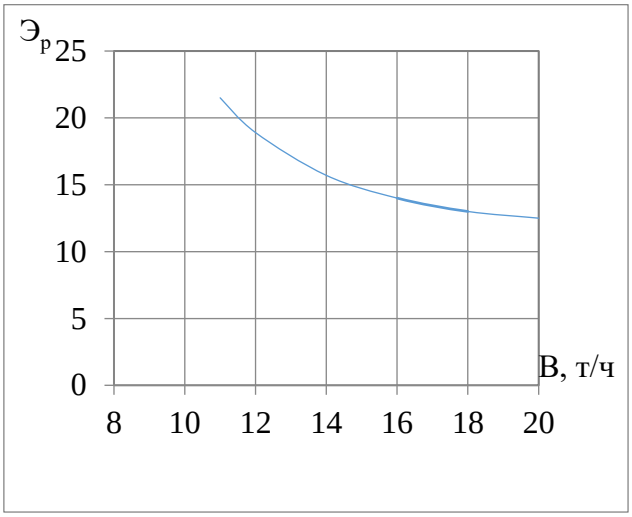


Рисунок 1.8 - Расход электроэнергии в зависимости от производительности мельницы В, т/ч

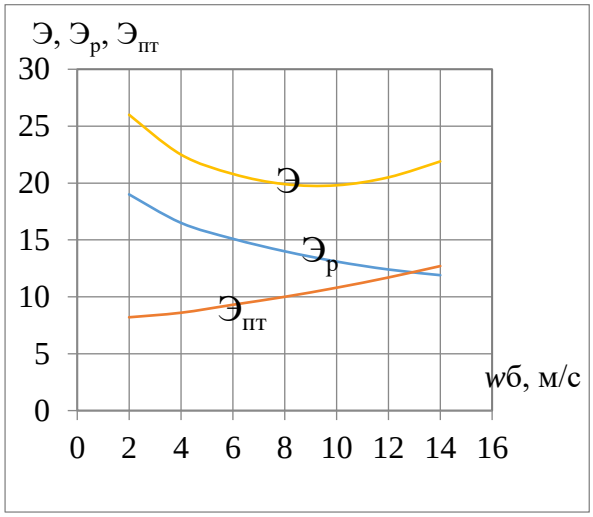


Рисунок 1.9 - Расход электроэнергии в зависимости от тонкости размола R_{90}

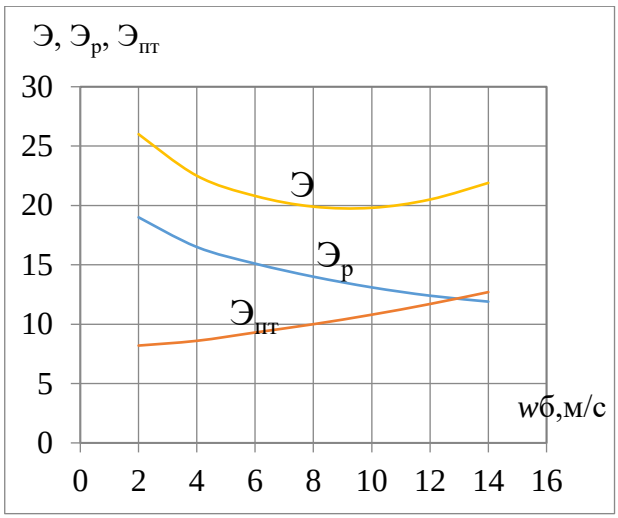


Рисунок 1.10 - Расход электроэнергии в зависимости от скорости $w_б$, м/сек сушильного агента

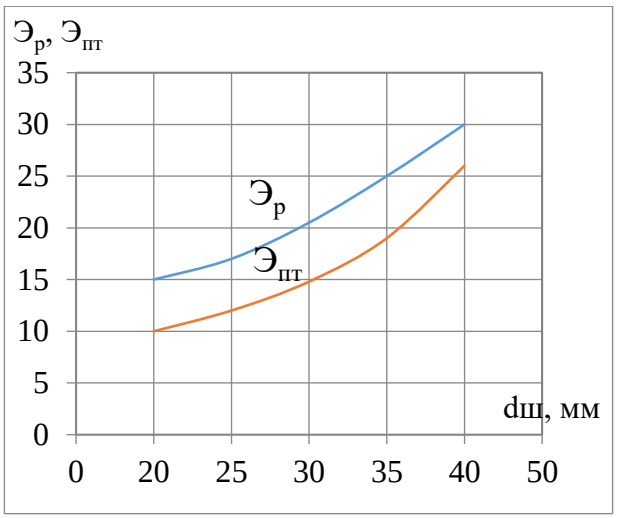


Рисунок 1.11 - Расход электроэнергии в зависимости от температуры t, °С сушильного агента

По результатам проведенных тепловых испытаний работы котлоагрегата ТП-81 ст.№6 ТЭЦ-2 г. Темиртау следует, что производительность мельницы Ш-25А в среднем составляет $B_р$=17,15 т/ч [68], средняя температура сушильного агента подаваемого в мельницу составляет $t_{с.а}$=244,5 ^{0}С, а среднее значение линейной скорости сушильного агента в контрольном сечении[68] на входе равен $w_б$ =9,6 м/с [68]. Удельный расход электроэнергии Ш-25А мельницы на размол 1 тонны угля с низкой размолоспособностью составляет $Э_р$=24-28 кВт·ч/т. Следовательно, отпимизация рабочих параметров ШБМ с целью снижения этих расходов весьма актуальна для ТЭЦ-2 [68].

Затраты электроэнергии на пылеприготовление функционально представлены в виде следующего выражения [68]:

$$Э(\bar{d}) = \frac{\sigma^2}{2E\rho_ч \cdot \eta_р}\varphi(\bar{d}), \qquad (1.4)$$

где $\bar{d}$ - средний диаметр угольной частицы после размола;

σ - предел прочности на сжатия частицы угля, $\sigma = 2{,}4 \div 13$ [68];

E- модуль упругости угля;

$\rho_ч$ - плотность угольных частиц, принимаем $\rho = 500 \div 700$ кг/м^3 [68];

η_p - КПД размола частицы ударом [68];

$\varphi(\bar{d})$ - энергия, приходящая на измельчение ударом [68].

Диаметр угольной пыли зависит от условии процесса измельчения и свойств угля и определяется по формуле [68]:

$$d_{ср} = \frac{\sum(d_{отвi} \cdot x_i\%)}{100}, \quad (1.5)$$

где $d_{отвi}$ - диаметр отверстия сита, мм [68];

x_i – содержание каждой фракции, % (масс) [68].

Для получения определенной фракции угольной пыли проведены расчеты затрат электрической энергии разных значении $d_{ср}$ частиц угля, которые представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Рсчетные величны затрат для разных значений среднего диаметра частиц угля [68]

№	Диаметр отверстия сита $d_{отвi}$, мкм	Содержание каждой фракции, x_i %	Затраты энергии $Э_р$, кВт·ч/т.у
1	1000	0,4	27,5
2	500	0,44	28,1
3	200	2,20	35,5
4	90	17,96	36,2
5	71	40,94	28,44

Пылеприготовительная система ТЭЦ-2 имеет следующие недостатки:

- размораживание топлива осуществляется лишь в исключительных случаях, когда происходит сильное смерзание топлива при очень низких температурах воздуха в зимний период [32, 85];
- не предусмотрены в технологичсекой схеме стадии предварительной подготовки угля, в связи с этим подается топливо с фракцией более 25 мм [44];
- отсутствие стадии дробления топлива приводит к значительным увеличениям расхода электроэнергии на размол, уменьшению размольной и сушильной производительности мельницы [32];
- температура сушильного агента регулируется смешением горячего воздуха после второй ступени ВЗП и холодного атмосферного воздуха;
- примененяется полумеханическое регулирование основных операциии системы пылеприготовления.

С учетом отмеченных недостатков в схеме приготовления угольной пыли на ТЭЦ-2 можно предложить следующие мероприятия по улучшению качества работы тракта топливоподачи и пылеприготовительной системы:

1. Установка дробления угля в виде пресса, который будет иметь множество шипов и с накладыванеием предворительно измельчит уголь до размеров куска топлива менее 20-25 мм. Преимуществом которого будет являться невысокая энергоемкость, сокращение расхода электрической энергии на размол топлива ШБМ, а также гибкость в применении.

2. Автоматизация системы пылеприготовления позволит организовать контроль за процессами, показателями и оборудованием:

- автоматизация промежуточного бункера готовой угольной пыли позволит контролирвать значение уровня готовой пыли в бункере, который зависит от конструктивных особенностей;

- оснащение автоматическими технологическими регуляторами позволят поддерживать параметры пылегазовоздушной смеси за размольной установкой, а также выравнивать процесс при различных аварийных ситуациях.

Потери с механическим недожогом, по данным ТЭЦ-2, составляет q_4=0,66 %. Можно предположить, что по мере роста размера частиц может происходить возврастание механического недожога, что приведет у ухудщению экологии г. Темиртау. Наиболее достоверные результаты могут быть получены на действующей мельнице, но однако проведение опытов на действующей ШБМ затруднительно. В связи с этим в диссертационной работе иследование снижения расхода электроэнергии проводиться на модели ШБМ, что позволит разработать рекомендации по оптимизации режимов работы мельницы.

1.8 Выводы по разделу

Анализ, показал, что использование шаровых барабанных мельниц на ТЭЦ-2 г. Темиртау обеспечивает устойчивое и надежное снабжение котлов измельченным объемом угля в условиях поступления на ТЭС углей с заметно различающимися характеристиками. В то же время имеются достаточные возможности по улучшению технино-экономических показателей за счет оптимизации режимных параметров используемой шаровой барабаной мельницы.

Таким образом, на основе сравнения показателей установлено, что шаровые барабанные мельницы с промежуточным бункером являются универсальными устройствами. В частности из представленных (таблица 1.1 и 1.2)12 показателей, этот тип мельниц проигрывает молотковым и валковым мельницам только по двум показателям: по расходу электрической энергии на размол тонны угля и по расходу изнашиваемого металла. Уменьшение этих и других недостатков сделает шаровые барабанные мельницы лучшим устройством для измельчения угля. Очевидно, что проведение исследований на действующей мельнице, при своей привлекательности с точки зрения достоверности полученных результатов (однако они наиболее пригодны именно для этой мельницы с его конструктивными и режимными параметрами) представляет большую сложность по доступу к мельнице, практически исключает проведение изучения эффективности предлагаемых конструкции и режимов.

В связи с этой трудностью в диссертации было рассмотрена и показана возможность создания уменьшенной модели шаровой барабанной мельницы, с сохранением геометрического подобия формы барабана.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ ТЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАБОТЫ ПОДСИСТЕМ

2.1 Разработка методики определения эффективности систем пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау

Энергия, необходимая для систем питания и агрегетов, обеспечения непрерывной рабрты ТЭС учитываются как собственные потребности. Из-за потребления части произведенной энергии для нужд ТЭС снижается, а часть энергии не поступает во внешнюю работы сеть. Поэтому одной из задач оптимизации работы ТЭЦ является минимизация потерь и повышение общей эффективности [42, 44]. Проведение тепловых и термодинамических расчетов позволяет определить оптимальные параметры работы системы, которые приводят к повышению эффективности процессов, снижению затрат и обеспечению общей энергетической производительности.

Разработка комплексного плана на ТЭЦ-2 «АрселорМиттал Темиртау» с термодинамической точки зрения предполагает: сбор данных и анализ тепловых процессов (определение основных параметров и показателей системы подготовки топлива); оценки термодинамической эффективности (учесть все потери энергии в системе подготовки топлива); определение улучшение и оптимизации (исследование возможных путей повышения термодинамической эффективности).

Для оценки степени термодинамического совершенства рабочих процессов в системе пылеприготовления часто используются понятия эффективности и эксергетического анализа [38, 39, 40, 41].

2.2 Составление эксергетического баланса системы подготовки твердого топлива теплоэлектроцентрали

Эксергетическая балансовая система подготовки топлива представляет собой анализ потоков энергии и эксергии внутри этой системы. Эксергия является мерой «качества» энергии и показывает, какая часть энергии может быть преобразована в полезную работу. Эксергетический анализ позволяет выявить потери энергии и определить потенциалы для повышения эффективности системы.

Эксергетическая балансовая система подготовки топлива включает в себя следующие основные блоки (подсистемы):

- блок I подсистема дробления топлива, происходит производство твердого топлива до неодходимой фракции, на этом этапе возникают потери энергии в виде тепла;
- блок II подсистема сушки топлива, в процессе сушки для обеспечения влажности определяется основное количество энергии;

- блок III подсистема транспортировки топлива, для приготовление угольной пыли и его сжигания возникают как механические, так и тепловые потери.

Анализ эксергетического баланса в каждой из подсистем позволяет определить эффективность каждого процесса подготовки топлива и потенциальные возможности для оптимизации и улучшения работы системы в целом [85].

Для составления теплового и эксергетичекого баланса пылеситемы ТЭЦ-2 г. Темиртау, необходимо провести анализ всех тепловых потоков эксергии в системе. Тепловая балансовая схема представлена на рисунке 2.1.

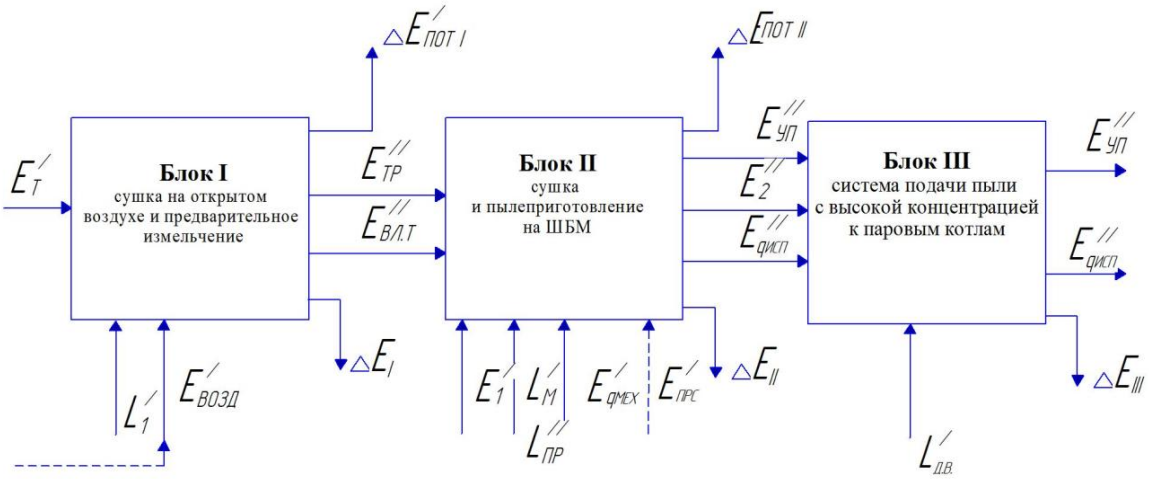


Рисунок 2.1 – Тепловая балансовая схема системы пылеприготовления ТЭЦ-2

В эксергетическом балансе рассматриваются входящие и исходящие потоки, как энергия, так и материалы, с точки зрения их энергетической ценности. Эксергетический баланс позволяет оценить эффективность использования энергии в системе подготовки топлива [42]:

$$\sum E_M^{/} + \sum E_q^{/} + \sum L^{/} = \sum E_M^{//} + \sum E_q^{//} + \sum L^{//} + \Delta E + \Delta E_{пот}, \qquad (2.1)$$

где $\sum E_M^{/}, \sum E_M^{//}$ - эксергии материальных потоков на входе в систему подготовки топлива и на выходе;

$\sum E_q^{/}, \sum E_q^{//}$ - эксергии потоков тепла, поступающих в систему и полученных в результате работы этой же системы сооответственно;

$\sum L^{/}, \sum L^{//}$ - электрическая энергия на входе в систему подготовки топлива и на выходе из нее сооответственно; $\Delta E, \Delta E_{пот}$ - внутренние и внешние потери эксергии в системе подготовки топлива [42].

Общий эксергетический КПД системы подготовки угольной пыли будет равен [42]:

$$\eta_{Э} = \frac{E''_{П.Т} + \sum_{k=1}^{S} E''_{k}}{\sum_{i=1}^{n} E_{i}' + \sum_{j=1}^{m} L_{j}}, \quad (2.2)$$

где $E''_{П.Т}$ - эксергия размолотого топлива (угольная пыль);

$E''_{К}$ - эксергии сопутствующих потоков [42].

Применительно к замкнутой системе подготовки топлива с совмещенными процессами сушки и пылеприготовления, изображенной на рисунке 2.2 эксергетические КПД отдельных подсистем и всей системы в целом определяются [42] аналогично выражению (2.2) [42]

Эксергетический коэффициент полезного действия (КПД) показывает на сколько эффективно работает система топливоподготовки в целом. Эксергетические КПД [42] выражается, как отношение полезной эксергии на затраченную работу. Оптимизация эксергетического КПД [42] каждого блока и всей системы в целом позволяет сделать процесс более эффективным и энергосберегающим [42]. Эксергетичекий КПД определяется по формуле:

$$\eta_{IЭ.ПС} = \frac{\sum E''_{ТС}}{\sum_{i=1}^{n} E'_{ci} + \sum_{j=1}^{m} L'_{cj}}, \quad (2.3)$$

Важным фактором является эксергия на сколько подогрет и подсушен уголь. Эксергетические КПД блока II, отвечающего за окончательную сушку и пылеприготовление [42]

:

$$\eta_{IIЭ.ПС} = \frac{E''_{Т} + E''_{исп} + E''_{са}}{\sum_{i=1}^{n} E'_{ci} + \sum_{j=1}^{m} L'_{cj}}, \quad (2.4)$$

Эксергетические КПД блока III, отвечающего за транспорт угольной пыли из промежуточного бункера к горелкам котлов [42]:

$$\eta_{IIIЭ.ПС} = \frac{E'''_{Т} + E'''_{исп} + E'''_{са}}{\sum_{i=1}^{n} E''_{ci} + \sum_{i=1}^{m} L''_{cj}}, \quad (2.5)$$

Для расчета эксергетического КПД системы подготовки топлива и ее подсистем использованы [42] основные показатели топлива и теплоносителей (сушильного агента) в системе топливоподачи [27, 130] и пылеприготовления.

Результаты расчета представлены в виде эксергетической диаграммы Сэнки на рисунке 2.2 и таблице 2.1[42].

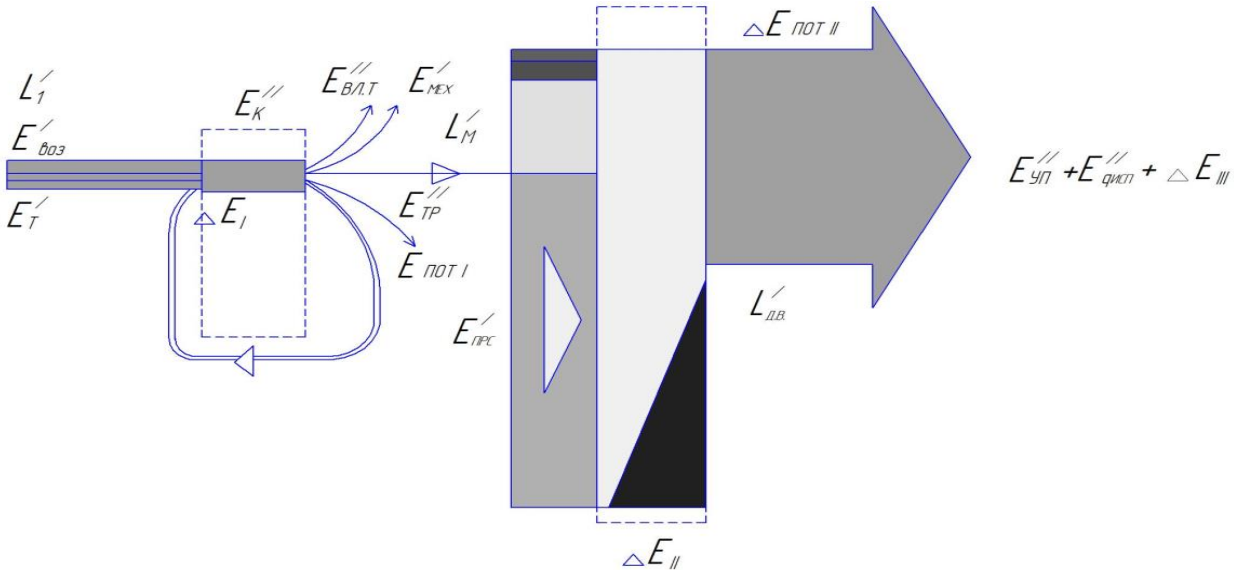


Рисунок 2.2 - Графическое построение потоков энергии системы пылеприготовления [42]

Таблица 2.1 – Результаты эксергетического анализа системы подготовки топлива [42] ТЭЦ-2 при влажности $W^{р}_{макс}$ = 14,0 % [42]

№ элемента	Наименование	Эксергия потока на входе, $E^{/}$, кДж/кг	Эксергия потоков на выходе, $E^{//}$, кДж/кг	Потери эксергии, $E_{пот}$, кДж/кг	Эксергетический КПД,%
1	Предварительная сушка и измельчение	12,69	0,58	3,78	6,6
2	Пылеприготовление и сушка угольной фракции	554,7	50,21	314,47	20,9
3	Система подачи пыли высокой концентрации	312,85	87,21	-	27,9
4	Для всей системы с подачей пыли высокой концентрации	1099,65	183,63	318,25	23,5

Расчет эксергии для материальных потоков [42] представленых в формулах (2.3 и 2.6) прогнозируют эксергии по стандартным расчетам. С использованием формулы Н.Д.Захарова определена эксергия после дробления угля $E'_{Т}$, который учитывает низную химическую эксергию $E^{Р}_{ХН}$ [42]:

$$E_{XH}^{P} = \left[1{,}009 + \frac{0{,}131O^{P} + 0{,}11W^{P}}{100-(A^{P}+W^{P})}\right] Q_{H}^{P}, \quad (2.6)$$

где O^P – рабочий состав количество углерода в органическом топливе, %;

A_p, W_p, Q_H^P – рабочий состав зольности, влаги и низшей теплоты сгорания в органическом топливе, %.

По формуле (2.7) определим эксергию сушильного агента и атмосферного воздуха $E^{/}$, $E_{ПРС}^{/}$, $E_{возд}^{/}$) [42]:

$$\Delta_0 e = \int_{T_0}^{T_j} c_p\, dT + q_j + \int_{T_j}^{T_j} dT - T_0 \left(\int_{T_0}^{T_j} c_p \frac{dT}{T} + \frac{q_j}{T_j} + \int_{T_0}^{T} c_p \frac{dT}{T}\right) + \frac{R}{M} T_0 \ln \frac{p}{p_0} \quad (2.7)$$

где T_o и p_0 - начальная температура и давление атмосферного воздуха, К и Па [42];

T и p - температура и давление горячего воздуха, К и Па;

q_j, T_j - тепловой эффект и температура фазового перехода, кДж/кг и К [42];

c - средняя теплоемкость рабочего вещества, кДж/(кг·К);

R - универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К);

M - молекулярная масса вещества [42].

Эксергия теплового потока рассчитывается по формуле [42]:

$$E_q = \tau_c \cdot Q_H^P = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (2.8)$$

Эксергия пара определяется по формуле (на 1 кг топлива) [42]:

$$E_П^{/} = q_П\left(i_{П.П} - i_{ПО} - T_0(s_{П.П} - s_{ПО})\right), \quad (2.9)$$

где $i_{по}$, кДж/кг, и $s_{по}$, кДж/(кг·К) - энтальпия и энтропия пара при начальной температуре. T_o и начальном давлении p_o;

$i_{пп}$, кДж/кг, и $s_{пп}$, кДж/(кг·К) - энтальпия и энтропия пара при T и p;

$g_П$- удельный расход пара на 1 кг топлива, кг/кг [42]:

По полученным результатам представленным в таблице 2.1 можно сделать вывод: блок I и II имеют пониженный эксергетический коэффициент, это указывает на то, что эти блоки системы подготовки топлива проводят больше доступной энергии и обеспечивают меньшую работоспособность по сравнению в использовании доступной энергии. В блоке сушки и измельчения топлива постоянные потери эксергии, связаны с потерями сушки [42], обусловленными влагоемкостью и смерзаемостью топлива. Уменьшение начальной влажности топлива перед измельчением с 14 до 9 % при постоянном предварительном

сушке топлива, будет способствовать показателю эксергетического КПД I блока, так как меньшее количество энергии будет потрачено на уменьшение количество влаги в топливе. Это, в свою очередь, уменьшит потери эксергии и увеличит доступную работоспособность этого блока. Процесс сушки играет важную роль в обеспечении того, чтобы топливо было подготовлено к следующему этапу.

С учетом потерь ΔE_I с 3,78 кДж/кг до 2,05 кДж/кг, эксергетический КПД [42] блока I увеличивается с 6,6% до 9,8 %, это свидетельствует о значительном повышении эффективности блока предварительной сушки и измельчения топлива.

Зависимость эксергетического КПД системы приготовления угольной пыли высокой концентрации, блока предварительной сушки и измельчения топлива и эксергии топлива от влажности W^p представлен на рисунке 2.3.

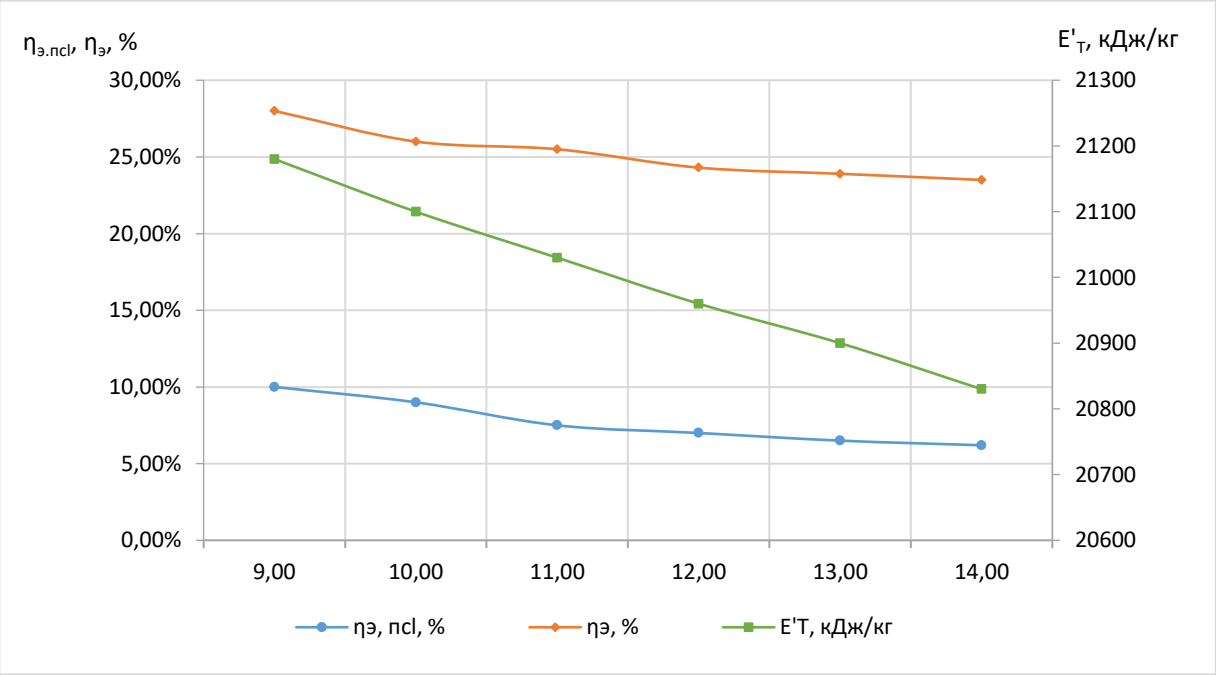


Рисунок 2.3 – Зависимость эксергетического КПД системы приготовления угольной пыли высокой концентрации, блока предварительной сушки и измельчения топлива и эксергии топлива от влажности W^p [49]

В результате предложенных мероприятий по улучшению работы системы топливоподготовки и пылеприготовления ТЭЦ-2 получено повышение общего эксергетического КПД от $\eta_э$ =23,5 % до $\eta_э$ =28,3 %.

Отсюда следует, что система подготовки твердого топлива ТЭЦ-2 г. Темиртау работает с потерями эксергии и большим расходом электроэнергии. В болоке сушки и пылеприготовления потери составляют порядка 314,47 кДж/кг топлива [42]. Это означает, что мельница перерабатывает более крупные фракции твердого топлива, что требует больше энергии. Для снижения потерь эксергии в этих блоках и повышения термодинамической эффективности

системы пылеприготовления необходимо, модернизировать оборудования или внедрять новые технологий [49].

2.3 Совершенствование работы топливного тракта на основе внедрения устройства для предварительного дробления

Энергетические показатели работы дробильного устройства зависят от типа дробильного оборудования, свойства топлива и условии эксплуатации.

Основными показателями для оценки эффективности работы дробильного устройства являются расход электроэнергии, которое необходимо для дробления одной тонны твердого топлива и КПД [43]. Помимо этих параметров, важно учитывать стоимость оборудования, затраты на обслуживание и ремонт. Некоторые методы дробления могут быть более или менее эффективными с точки зрения воздействия на окружающую среду. Понимание и оптимизация этих параметров позволяют повысить эффективность работы дробильного устройства и снизить энергозатраты, что важно как с экономической, так и с принципиальной точки зрения [55].

Технологическое оборудование предусматривает предварительную подготовку угля перед его измельчением. Устранение негабаритов частиц и фракционирование углей с размерами выше 50 мм производиться с помощью грохота. Крупные фракции более 50 мм дробятся в первой дробилке, которая раздрабливает крупные фракции до более управляемого размера, далее к бункеру и молотковым дробилкам, которые формируют фракции 20-25 мм. Так, как система подготовки топлива на ТЭЦ-2 работает с пониженными показателями, из-за отсутствия стадии предварительной подготовки топлива, в бункер сырого угля подается уголь с крупными фракциями более 25 мм [32]. Типичными устройствами дробления и ломки являются дробилки. Однако, могут возникнуть трудности в получении требуемых фракции угля, которые вызваны с такими причинами, как характеристика угля и условия добычи. В этом случае, требуется дополнительная подготовка перед подачей в бункер сырого угля, что может привести к дополнительным расходам электроэнергии на подготовку топлива к сжиганию [32].

В диссертационной работе рассмотрен метод совершенствования работы топливного тракта СПП с использованием устройства для предварительного дробления угля [49]. Устройство для дробления угля, содержащее гидромолот, плиту трамбовки, гидроцилиндр, установленные на стреле и опорную плиту снабжено, в опорной плите выполнены в шахматном порядке калиброванны сквозные каналы для прохода дробленного угля и вертикальные планки для направления плиты трамбовки к опорной плите[49]. На плите трамбовки выполнены штыри ответно и соосно каналами в опорной плите с возможностью проникновения в каналы вертикальной стойкой с возможностью поворота вокруг своей оси и горизонтальной оконечностью. На последнем установлен гидроцилиндр, гидромолот, плита трамбовки в направлении к опорной пилите для их взаимодействия, в стойке штанги выполнен двусторонний фиксатор для

взаимодействия с вертикальной плитой после поворота стрелы. Соотношение межосевых расстояний калиброванных каналов в нечетных рядах к таковым в четных рядах по горизонтали двукратно, по вертикали 2,5 кратно, но отношения максимальных поперечных размеров штыря канала $a_ш$, канала $a_к$, межканального промежутка $a_п$, в опорной плите к фракции угля $a_ф$ составляют $a_ш/a_ф \leq a_к/a_ф \leq ап/a_ф$.

Кроме того, калиброванные сквозные каналы выполнены круглыми цилиндрами, как ответные им штыри [49].

Устройство для дробления угля (рисунок 2.4) работает следующим образом. Уголь в негабаритах с мелочью доставляется с открытого склада на опорную плиту 9 в направление стрелки «С», фиксируется направляющими планками 7, при этом мелкие фракции по каналам 10 направляются к бункеру 11, а негабарит с крупными фракциями задерживается для последующего дробления и фракционирования до требуемого ситового состава.

Стрела 4,5 совершает поворот на вертикальной оси стойки 4 и переносит гидроцилиндр 3, гидромолот 1, плиту трамбовки 2 до упора фиксатора 6 в направляющую планку 7, которая скреплена с опорной плитой 9. При этом оси штырей 8 устанавливается соосно с каналами 10 над установленной негабаритом угля 11 на опорной плите 9, Гидроцилиндр перемещает гидромолот 1 с плитой трамбовки 2 до упора штырями 8 поверхность негабарита 11 благодаря гидроприводу 12 и работе золотника гидроцилиндра. Золотник гидромолота включают его в работу и обеспечивает ударное воздействие через плиту трамбовки штырями на угольный негабарит, дробит его и одновременно фракционирует до требуемого ситового состава, который соответствует активному прохождению дробленного угля через калиброванные каналы в опорной плите в бункер под воздействием проникающих штырей.

Для совмещения операций дробления с загрузкой углем на поверхности опорной плиты гидроцилиндр поднимает гидромолот с плитой трамбовки для образования требуемого зазора над опорной плитой, а при необходимости, дополнительно, штанга совершает поворот вокруг вертикальной оси вместе с закрепленным на ней гидроцилиндром, пдромолотом и плитой трамбовки на 180° до упора фиксатора 6 направляющую планку 7, освобождает зону над опорной плитой. Далее цикл загрузки следующего негабарита и его дробление с фракционированием повторяется [49].

Устройство для дробления угля выполняет следующие полезные функции: устраняет негабариты с открытого склада, фракционирует уголь с заданным ситовым составом, активизирует прохождение полученного ситового состава угля через каналы фракционной опорной плиты (приемной решетки бункера) за счет статико-ударного воздействия штырей плиты трамбовки на каждый фрагмент угля на входе в канал по направлению бункеру) за счет статико-ударного воздействия штырей плиты трамбовки на каждый фрагмент угля на входе в канал по направлению к бункеру и обеспечивает ситовый состав угля за счет калиброванных каналов в опорной плите и ответных штырей, благодаря установленным соотношениям межосевых расстояний калиброванных каналов и

ответным им штырей в нечетных рядах к таковым в четных рядах и совокупности отличительных признаков [49].

Эти функции при работе устройства повышают производительность подачи угля заданного ситового состава в бункер углеразмольной дробилки за счет:

- сокращения времени работы на холостом ходу технологического оборудования подготовки и подачи топлива к котлам;
- сокращение времени на запуск подачи угля за счет совмещения работы дробления и фракционирования с заданным ситовым составом;
-обеспечение оптимальной загрузки углеразмольных мельниц и эффективной работы топливоподачи [49].

Общий вид устройства для дробления представлен на рисунке 2.4.

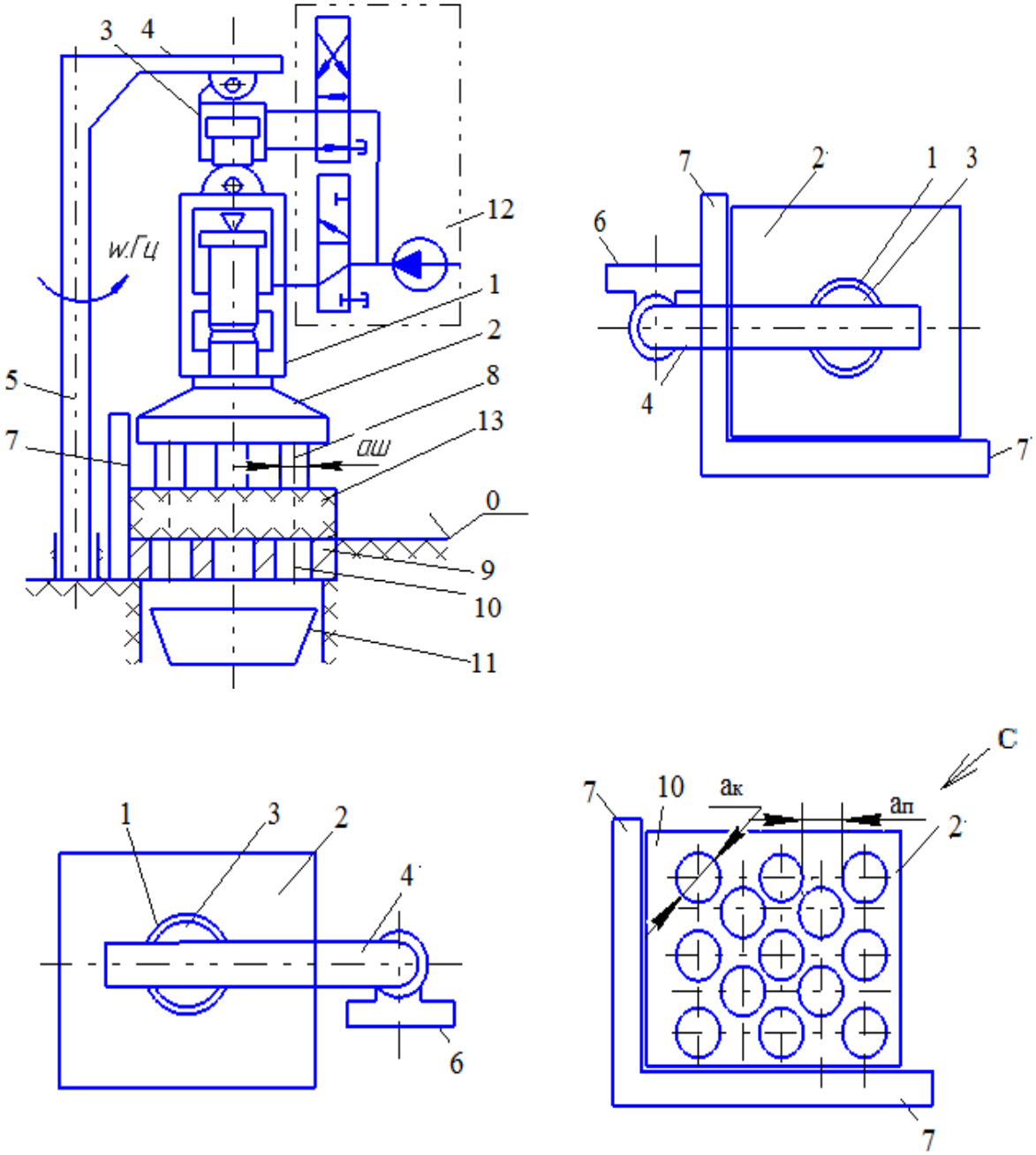


Рисунок 2.4 - Устройства для дробления угля

Энергоемкость фракционирования определяется процессом навалки угля на плиту и процессом ударного разделения угля на фракции. Энергоемкость навалки угля определяет отношение энергии волочения для установки угля на плиту скребком бульдозера к объему угля на плите [32]:

$$q_н = \frac{m \cdot V_В^2}{2 \cdot S_2 \cdot H}, \text{ Дж/м}^2 > V_В = \frac{l_В}{t_В}, \quad (2.10)$$

где m, H, S_2 – масса, кг, высота угля, м, на плите, площадь фракционной плиты, м^2, $S_2 = a \cdot b$, м^2.

$V_В$, $l_В$ – скорость, м/с и путь волочении угля на плиту, м, $l_В = a$, м, или $l_{В\,min}$=b, м при b>a длительностью $t_в$, с [32].

Энергоемкость ударно-статического фракционирования для единичного воздействия [32]:

$$q_{уд} = \frac{A_у + A_c}{S_1 \cdot h \cdot n}, \quad \text{Дж/м}^3 \quad (2.11)$$

Определяет отношение суммы энергий ударного $A_у$ и статического A_c воздействий на уголь к объему получаемых фракций угля , где S_1, h – площадь и высота канала в фракционной плите, м^3; n - количество каналов [32].

$$A_у = \frac{m_\delta \cdot \upsilon_\delta^2}{2} = F_р \cdot l_р, \quad (2.12)$$

где $l_б$ – рабочий ход, м;

$m m_\delta$ - масса бойка, кг;

$\vartheta_б$- скорость удара по плите, м/с;

$F_р$, – сила разгона бойка, движущая сила цилиндра подачи, Н, при допущении: $F_р$= $F_с$.

С учетом допущения линейности процессов движения бойка [32]:

$$l_р = \frac{\upsilon_б^2 \cdot l_р}{2}, \quad (2.13)$$

Длительность цикла $T_ц$ возвратно-поступательного бойка при обратном t_0 и рабочем $t_р$ длительностях [32]:

$$T_Ц = t_о + t_р, \text{ с} \quad (2.14)$$

Частота ударов бойка [32]:

$$f = \frac{1}{t_p(1+K_0)}, \text{ Гц} \qquad (2.15)$$

где $K_o = \frac{t_o}{t_p} > 1$, $t_p = \frac{1}{n\cdot(1+K_0)}$.

Рабочий ход бойка, определяет энергию удара A_y при движущей боек силе F_p:

$$l_p = \frac{\upsilon_\delta}{2}\cdot\frac{1}{f(1+K_o)}, \qquad (2.16)$$

Для значений $\upsilon_\delta = 7$ м/с, l_p= 0,1 м, h =1, для значений K_o= 1; 2; 3; 4 получим значения частоты ударов, рисунок 2.7.

K_o = 1; 2; 3; 4; f = 17,5; 11,6; 8,7; 7, Гц

Учтем:

$$\begin{cases} A_y = F_p\cdot l_p \\ A_c = F_p\cdot h \end{cases}, \qquad (2.17)$$

где h – высота угольного массива после навалки на плиту, м, равная для идеальной модели, глубине канала в плите: h= H, см (1), получим $\frac{A_c}{A_y} = \frac{h}{l_p}$, h=50 ÷100 м, l_p =100÷200 мм, получим [32]:

$$\begin{cases} \frac{A_C}{A_y} = 0{,}5 \\ \frac{h}{l_p} = 0{,}5 \end{cases}, \qquad (2.18)$$

Преобразуем (2.11) к виду $q_{уд} = \frac{1+\frac{A_c}{A_y}}{A_y\cdot S_1\cdot n\cdot h}$, тогда с учетом получим, $q_{уд} = \frac{1{,}5}{A_y\cdot S_1\cdot n\cdot h}$, Дж/м^3, в соответствии с (2.17), (2.10) получим:

$$q_н = \frac{m\cdot V_в^2}{2\cdot S_1\cdot h}\cdot\frac{S_1}{S_2}, \text{ Дж/м}^3 \qquad (2.19)$$

На рисуке 2.4 представлена зависимость частоты *f* ударов от превышения K_o длительности обратного хода бойка над его рабочим ходом [32]

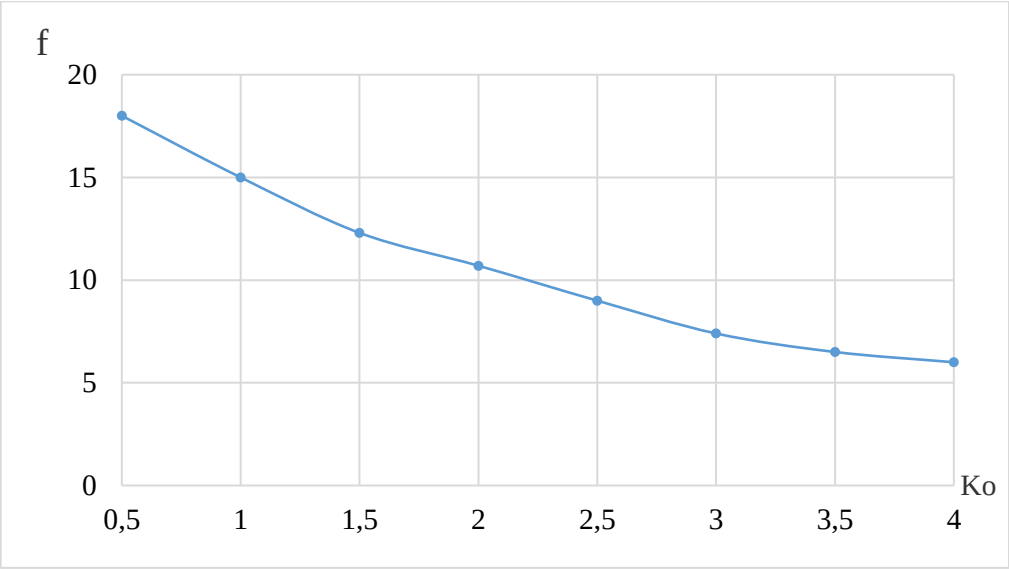


Рисунок 2.4 - Зависимость частоты *f* ударов от превышения $К_о$ длительности обратного хода бойка над его рабочим ходом [32]

Статическое действие гидроцилиндром подачи, установленной мощностью 1 кВт ударное действие гидроударным устройством, установленной мощностью 7 кВт. Общая мощность оборудования 8 кВт. За цикл фракционирования отбой порции насыпного угля максимальной крепости (сопротивляемостью разрушения [$\sigma_{сж}$] ≤40 МПа) средней крупности σ=50 мм÷100мм затрачивается мощность удара 14 кВт в сумме с мощности статического действия 20 кВт, в сумме 34 кВт при установленной мощности гидропривода 80 кВт.

Энергоемкость навалки угля на фракционную плиту (15) снижается с ростом объёма фракции $S_1 \cdot h$, площади фракционной плиты S_2 по отношению к площади фракции S_1, при снижении энергии на навалку угля на фракционную плиту [32]. Для фракций d=0,5 см; 1 см; 50 d = 0,5 см; 1см; 50 см с сечениями $S_1 = \pi d^2/4$; S_1=0,2 см^2; 0,8 см^2; 2500 см^2, конструктивно получены значения количества фракций n для соответствующих размеров плит S_2, n= 39; 8; 156, S_2=39; 25; 106 см^2 при этом значение $n \cdot S_1/S_1$ изменяются от 0,256 до 0,312 [32].

2.4 Выводы по разделу

Важным шагом в повышении эффективности работы систем топливоподачи на ТЭЦ-2 является, сокращение удельного расхода энергии.

Для достижения этих целей проведен анализ каждого структурного блока и определены входные и выходные потоки. Определены эксергии каждого потока на основе его происхождения и свойств, определены изменения эксергии в каждом блоке системы, а также получена термодинамическая эффективность подготовки твердого топлива к сжиганию на ТЭЦ-2 г. Темиртау. По результатам расчетов выявлены слабые места в системе пылеприготовления и определены возможности улучшения.

Выбор тоннажа топлива для различных видов углей в зависимости от технико-экономических соображений является важным аспектом проектирования и эксплуатации систем подготовки твердого топлива.

Устройство для дробления угля может помочь в оптимизации системы пылеприготовления и повышения эффективности процесса. Предварительный размол угля позволит снизит расход энергии на пылеприготовление, что может привести к существенной экономии электроэнергии. Более размерный помол угля повысит качество топлива, что, в свою очередь положительно скажется на эффективность горения.

Увеличение площади поверхности топлива при более тонком помоле уменьшит потери тепла от механического недожога, что благоприятно скажется на снижение экологических и негативных последствии на окружающую среду.

Предлагаемое устройство для дробления угля представляет перспективное решение для оптимизации системы пылеприготовления на ТЭЦ-2 г. Темиртау.

3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗМОЛА ТОПЛИВА В ШАРОБАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦАХ

3.1 Задачи достижения максимальной эффективности работы шаробарабанных мельниц

Для того чтобы достичь максимальной эффективности шаровых мельниц необходимо, учесть несколько ключевых аспектов:

- правильная настройка оборудования, оптимальное количество мелющих шаров, а также скорость вращения барабана, что позволит обеспечить оптимальные условия для измельчения материала;
- подбор оптимального материала мелющих шаров;
- обеспечение равномерной загрузки барабана топливом;
- регулярное техническое обслуживание;
- контроль размера исходного топлива, время помола и расход энергии;
- мониторинг параметров работы, позволит своевременно реагировать на любые отклонения и предотвращать возможные проблемы;
- использование современных инновационных технологии и автоматизации для оптимизации работы мельницы и снижения энергопотребления.

Все эти этапы в совокупности позволяют достичь максимальной эффективности работы шаровой барабанной мельницы и улучшить производительность процесса измельчения материалов.

3.2 Эффективность измельчения угля в ШБМ в зависимости от шаровой загрузки

В работах приведенных авторов [3, 58, 59, 60, 61, 62] исследованы процессы измельчения твердого топлива в барабанных мельницах. В указанных работах были исследованы методы подбора шаровой загрузки мелющими шарами, а также размеры и формы футеровок мельниц влияющие на эффективность работы мельниц при измельчения твердого топлива в ШБМ.

Однако в представленных исследованиях не учитывается подбор оптимального размера твердого топлива, который также может иметь положительное влияние на работу шаробарабанной мельницы (ШБМ) при условии изменения шаровой загрузки.

Подходящий размер топлива и соответствующая шаровая загрузка позволяют увеличить производительность мельницы. При этом измельчение топлива до более мелкой тонкости может быть достигнуто за меньшее время. Мельница, настроенная с учетом оптимального размера топлива, может более эффективно измельчать материал, что приводит к получению более однородной и требуемой тонкости помола. Оптимизация размера топлива и шаровой

загрузки позволяет снизить потребление энергии, что экономит ресурсы, снижает эксплуатационные затраты и увеличить его срок службы.

Контролируемый размер угольной пыли и удельная его поверхность позволяют оптимизировать процессы горения, снизить выбросы в окружающую среду

3.3 Влияние режимных параметров на эффективность процесса работы системы пылеприготовления

Исследование режимных параметров эффективности процесса измельчения важно для оптимизации работы пылеприготовления. Исследования работы шаровой барабанной мельницы осуществлялось с поставленными задачами:

1. Выбор типа моделируемой мельницы и режимные параметры ШБМ;
2. Разработка и изготовления модели ШБМ, проведение эксперимента и определение параметров, влияющих на эффективность работы мельницы;
3. Проведение численного эксперимента в программном обеспечении EDEM, путем изменения массовой загрузки ШБМ;
4. Выбор плана проведения многофакторного эксперимента [18], позволяющего систематический и эффективно определить влияния различных факторов на результат эксперимента;
5. Сопоставление полученных результатов экспериментальных исследований, найти оптимальные режимы работы ШБМ с учетом технических и экономических аспектов.

Повышение К.П.Д шаровых барабанных мельниц послужило основанием к проведению ряда исследовательских работ для нахождения оптимальных условии работы ШБМ [3]. Применяя законы измельчения при проведении эксперимента, сделали вывод, что для эффективной работы ШБМ необходимо изучить характеристики мелющей загрузки, которые приведут к снижению энергозатрат систем пылеприготовления ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темитрау».

Очевидно что вращение барабана заметно влияет на интенсивность размола угольных частиц. При вращении барабана неизбежно возникает центробежная сила, отбрасывающая шары к стенке барабана и она тем. больше, чем больше скорость вращеия барабана. В результате возникающая центробежная сила препятствует падению шара и тем самым ухудшает процесс измельчения угольной частицы. С другой сторны в нижней части барабана эта же центробежная сила увеличивает кинетичксую энергию шара.

Используя расчетную схему, определим предельное число оборотов ШБМ, который, представленную на рисунке 3.1 [68].

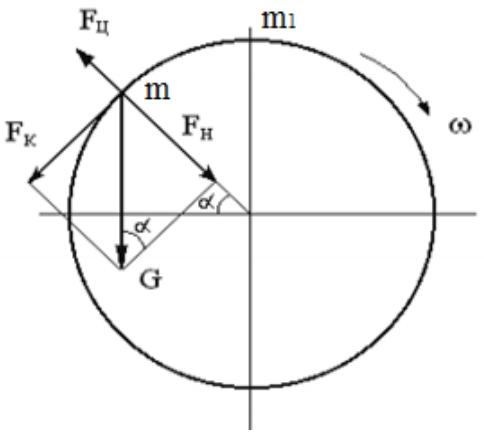


Рисунок 3.1 – Расчетная схема к определению предельного числа оборотов шаровой мельницы

Центробежную силу определим по формуле [60]:

$$F_ц = m \cdot \omega^2 \cdot r = \frac{G \cdot \omega^2 \cdot r}{g}, \qquad (3.1)$$

где m - масса шара, кг;

r - внутренний радиус барабана м [30];

G – вес шара, кг;

ω - угловая скорость вращения барабана в радианах [30, 60];

g – ускорение силы тяжести, м/сек^2.

Величина центробежной силы, возникающей при вращении барабана, несопоставимо меньше кинетической энергии падающих шаров. С другой стороны увеличение частоты вращения барабана ускоряет частоту перемешивания объема угля, что спосоствует ускорению измельчения. Этот фактор заметно приближают интенсивность размола на модели к интенивности на реальной мельнице

Нормальную силу $F_н$ определим из треугольника сил:

$$F_n = G \cdot \sin \alpha \qquad (3.2)$$

Чтобы поддерживать равновесие на стенке, необходимо, чтобы радиус кривизны изгиба барабана совпадал с радиусом шара. Это условие, согласно которому шар касается крышки барабана в одном месте. В этом случае сила, действующая на шар со стороны барабана, будет строго направлена и будет обеспечивать соблюдение системы. Математически это можно выразить следующим образом: радиус кривизны стенки барабана (R)= радиусу шара (r).

Если радиус кривизны стенки барабана не соответствует радиусу шара, шар не сможет оставаться в равновесии и начнет двигаться внутри барабана под воздействием силы тяжести или других внешних воздействий [60].

Условие совпадения радиусов кривизны шара и барабана в шаровых мельницах крайне важно для эффективной работы процесса измельчения материалов.

Это условие имеет важное значение для понимания работы шаровых мельниц, так как позволяет оптимизировать размеры и формы шаров и барабана для эффективного измельчения материалов и предотвращения износа оборудования. $F_ц \geq F_n$.

Предельное число оборотов определяется по формуле [68]:

$$n = \sqrt{\frac{60^2 \cdot g}{4\pi^2 r}} = \sqrt{\frac{60^2 \cdot 9{,}81}{4 \cdot 3{,}14^2 \frac{D}{2} r}} = \frac{42{,}3}{\sqrt{D}}, \qquad (3.3)$$

где n - число оборотов, об/мин;

D - диаметр барабана, м;

r - радиусу шара, м.

Критическое число оборотов для мельницы определяется таким образом, что при превышении этой скорости мельница перестает выполнять функцию измельчения материала и начинает просто «крутить» содержимое, не принося никакой полезной работы. Практически, обычно используют около 75% от критической скорости [52, 72]:

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}}, \qquad (3.4)$$

где D - внутренний диаметр барабана мельницы, м.

Оптимальное число оборотов мельницы определяется по формуле [62]:

$$n = \frac{37{,}2}{\sqrt{D}}, \qquad (3.5)$$

где D - внутренний диаметр барабана мельницы, м.

Относительная частоты оборотов барабана мельницы рассчитывается как отношение фактической частоты вращения барабана (n) к критической частоте вращения ($n_{кр}$) Критическая частота зависит от параметров системы, относительная частота оборотов может влиять на эффективность измельчения угля и характеристики работы мельниц [72]:

$$\psi = \frac{n}{n_{кр}}, \tag{3.6}$$

Эффективность работы ШБМ зависит от степени загрузки мелющими шарами, которая характеризуется коэффициентом загрузки мелющими шарами φ [72]:

$$\varphi = \frac{m_ш}{V \cdot \rho_ш^н} = \frac{m_ш}{\pi \cdot R \cdot L \cdot \rho_ш^н}, \tag{3.7}$$

где V - объем шаровой барабанной мельницы, м^3 [72].;

R, L - внутренний радиус и длина барабана соответственно, м [72];

$\rho_ш^н$ - насыпная плотность мелющих шаров 4,9 т/м^3 [72];

$m_ш$ - общая масса шаров, загруженных в барабан, кг [72].

Энергетическая эффективность измельчения угля в мельнице зависит от геометрических параметров мельницы (длины, диаметра барабана), массы (диаметра) мелющего шара, показателей измельчаемого угля (размольной способности, крупности частиц угля на входе в мельницу), влажности, режимных параметров (тонкости помола) и степени заполнения мелющими телами и углем [68].

Степень измельчения меняется при разной длине барабана, по мере роста длины барабана $L_б$ происходит рост производительности мельницы. Однако, при повышенной длине барабана частицы угля, уже измельченные до требуемого уровня, подвергаются дополнительному измельчению (именно в таких мельницах происходит так называемое «переизмельчение» угля), что означает излишний расход энергии. С увеличением диаметра $D_б$ увеличивается высота подъема шара (отражается в увеличении кинетической энергии мелющих шаров) и соответственно возрастает интенсивность разрушения частиц угля. Влияние длины и диаметра барабан, степени заполнения мелющими шарами и измельчаемым углем проявляется в виде изменения расхода энергии, затрачивемой на измельчение. Оптимальное соотношение между длиной L и диаметром D барабана точно не установлено, но обычно принимают соотношеие L/D =1,56 - 1,64 [62, 63], т. к. оно в определенной степени может несколько изменяться в связи с показателями измельчаемого угля [2]. Проведение исследований влияния соотношения длины и диаметра шара достаточно сложно, однако на моделях ШБМ с помощью моделирования можно изучить достоверное отражение процесса измельчения в зависимости от отношения длины и диаметра барабана L/D.

Производительность конкретной шаровой барабанной мельницы можно определить по следующей формуле [2, 66]:

$$G = 25{,}7 \cdot V_б \cdot \sqrt{D} \cdot (M_ш / V_б)^{0{,}8} \cdot k \cdot q \tag{3.8}$$

где $V_б = \pi D^2 \cdot L/4$ - объем барабана, м^3;

k=0.6-0.95 – требуемый коэффициент тонины помола;

q - нормативная удельная производительность мельницы, в кг/с;

$M_ш$ - обобщеный показатель, который рассчитвается по формуле [62].

$$M_ш = V_б \cdot \rho \cdot \varphi \cdot \mu, \tag{3.9}$$

где $M_ш$ - масса шаров, кг;

ρ - плотность материала шаров, кг/м^3;

φ - степень заполнения объема барабана шарами, %;

μ - коэффициент не плотности (полноты) загрузки зависит от диаметров мелющих шаров, однако меняется не значительно [66].

По заданной приводительности определяется диаметр барабана мельницы D и длина L определяется по нормативному значению отношение длины к диаметру барабана L/D=1,5- 1,64 [62, 63].

Необходимый диаметр шаров [24] определяется по формуле:

$$d_ш = 0{,}006 \cdot \lg(d_к \cdot 10) \cdot \sqrt{d_и \cdot 10^3} \tag{3.10}$$

где $d_и$ – исходящая крупность угля, мм;

$d_к$.- конечная крупность измельченного угля, мм.

Число шаров определяется по формуле: $N_ш = M_ш / m_ш$, $M_з = 1{,}14 \cdot M_ш$, где $M_ш$ - масса шаров, кг; $m_ш$ – масса одного шара, кг; $M_з$ –масса загрузки, кг.

Обобщеный показатель, который рассчитвается по формуле [66],

$$M_ш = V_б \cdot \rho \cdot \varphi \cdot \mu, \tag{3.11}$$

где $V_б$ - объем барабана, м^3;

ρ - плотность материала шаров , кг/м^3;

φ - степень заполнения объема барабана шарами, %;

μ - коэффициент не плотности (полноты) загрузки зависит от диаметров мелющих шаров, однако меняется не значительно [66].

Потребляемая мощность мельницы равна:

$$N = 0{,}78 \cdot \pi \cdot n \cdot M_з \cdot g(D/2)/\eta, \tag{3.12}$$

где $M_з$ – масса загрузки, кг;

$\eta = 0{,}8 \div 0{,}9$ КПД мельницы [67].

При рассмотрении возможности создания уменьшенной модели ШБМ - это выбор размера мелющих шаров т. к. изменение размера шара, приведет к изменению массы шара в кубической степени. Мелющие шары следует выбирать таким образом, чтобы эффективно измельчить уголь. Так, как более крупные мелющие шары могут потреблять больше энергии для измельчения угля, но они также могут быть более эффективными при разрушении более крупных частиц. Необходим баланс между эффективностью и электропотреблением.

3.4 Выбор типа моделируемой шаровой барабанной мельницы

На ТЭС как правило используются вентилируемые мельницы, с воздухом, вдуваемом в мельницу с определенной высокой температурой и который обспечивает вынос из мельницы угольной частицы, измельченной до требуемого размера. Именно объем этого воздуха определяет работу центробежного сепаратора, устанавливаемого на выходе из мельницы и возврашающего частицы с размерами, превышающими заданную величину обратно в мельницу этот тип принято называть «вентилируемой мельницей». Модель вентилирумой мельницы требует наличия вентилятора, центробежного сепаратора и циклона (отделителя пыли), из которого выносятся наиболее мелкие частицы угля, что при повторном использовании угольных частиц будет вносить искажения в гранулометрический состав. Сброс отработавшего воздуха с этими мелкими частицами угля создает запыленный объем. В результате сравнения достоинств и недостаков вентилируемой и неветилируемой барабанных мельниц для модели был принят вариант мельницы без вентиляции.

Это означает, что кинетическая энергия шара на модели может изменяться при совместном влиянии двух факторов - пропорционально уменьшению скорости шара при уменьшении диаметра барабана в первой степени и уменьшению массы шара при уменьшении его диаметра пропорционально кубической степени. С другой стороны, при уменьшении размера шара, меняется площадь соприкосновения шаров с углем или по другому - улучшается процесс измельчения. Этот анализ показал, что кинетическая энергия удара шара на единицу площади поверхности угля весьма сложно изменяется при изменении диаметра барабана и при изменении размера шара. Эти факторы заметно искажают интенсивность процесса измельчения угля в модели относительно реальной шаровой барабанной мельницы. Уровень этих искажений в определенной степени может быть уточнено при проведении отмеченных опытов с измельчением исследуемого объема угля с шарами разными диаметрами. С другой стороны, при этом в модели сохраняется сам механизм измельчения - преимущественно ударами шаров об измельчаемый уголь и в меньшей степени - за счет истирания между шарами. Однако прямые эксперменты по сравнению соотношения интенсивности размола этими двумя механизмами практически отсутствуют.

3.5 Создание модели шаровой барабанной мельницы

Для исследования размола твердого топлива были созданы две модели: на базе Алматинского университета энерегтики и связи» им. Г.Даукеева, г.Алматы, рисунок 3.3, на котором проводились исследования закономерности измельчения только истиранием и на базе Карагандинского индустриалного университета, г.Темиртау, рисунок 3.8, на котором проводились исследования закономерности измельчения истиранием и ударом. Наличие двух таких установок позволит оценить соотношение измельчения каменных углей ударами шарами и истиранием между шарами. Все опыты обязательно проводятся с равным количеством загруженных шаров с равными диаметрами, углями с одинковыми показателями по размолу $К_{ло}$ и по размерам загружаемых угольных частиц. Определение интенсивности измельчения истиранием или наоборот измельчения угля сочетанием ударов шаров и истиранием между ними может определена в опытах при равном числе оборота барабана при равном времени процесса измельчения.

На уменьшенных моделях ШБМ сохранены геометрические подобия барабана и размера измельчающих шаров. Еще один фактор который практически не рассматривался в других исследованиях шаровых барабанных мельниц - это соотношение интенсивности измельчения ударами падающих шаров и измельчения истиранием между шарами. В связи с этим в диссертации были использованы два варианта модели невентилируемой мельницы созданной на базе АУЭС и КарИУ. На уменьшенных моделях шаровых барабанных мельниц можно проводить сравнительные исследования:

- при измельчении разных углей,
- с разными диаметрами шаров;
- с разной толщиной слоя измельчаемого угля;
- с разным заполнением объема барабана измельчаемым шарами;
- с разными фракциями трех углей
- с разной конструкцией внутримельничныз устройств.

3.5.1 Модели шаровой барабанной мельницы созданая на базе НАО «АУЭС им Г. Даукеева»

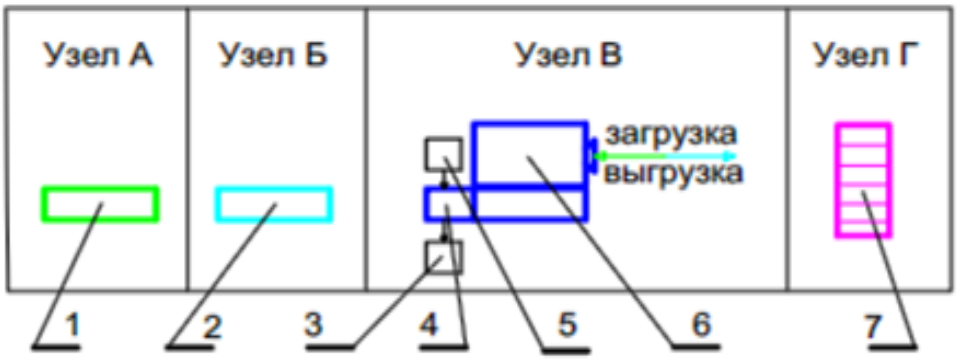
Блок-схема и схема модели установки ШБМ на базе НАО Алматинского университета энрегтики и связи им. Г.Даукеева АУЭС представлены на рисунке 3.2 (а, б) и состоит из следующих узлов:

Узел А (сушка топлива);

Узел Б (весовое измерение входного и измельченного топлива);

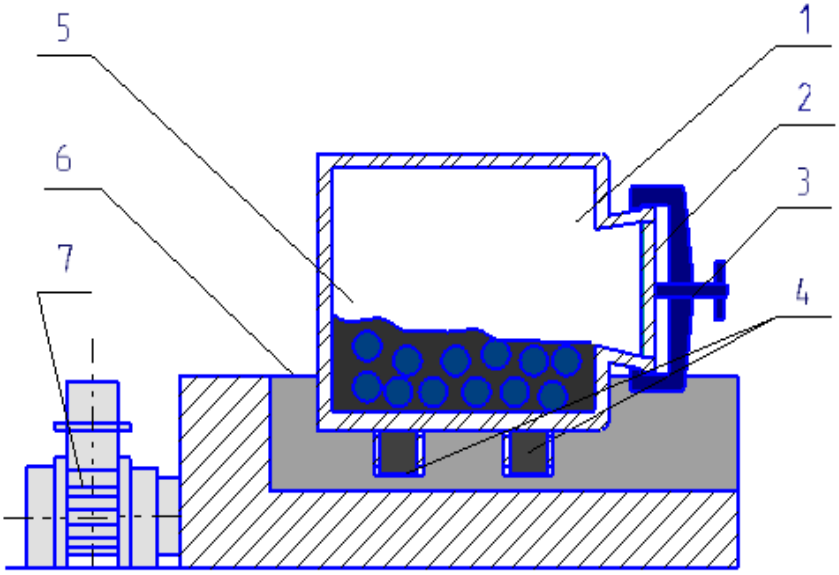
Узел В (модель шаровой барабанной мельницы);

Узел Г (ситовый анализ готовой пыли).



а)

1-сушильная камера, 2- весы, 3- мультиметр ИМС Ф-1, 4- электропривод, 5- преобразователь частоты векторный ПЧВ1-XX, 6 - шаровая барабанная мельница, 7- виброгрохот Retsch AS200,



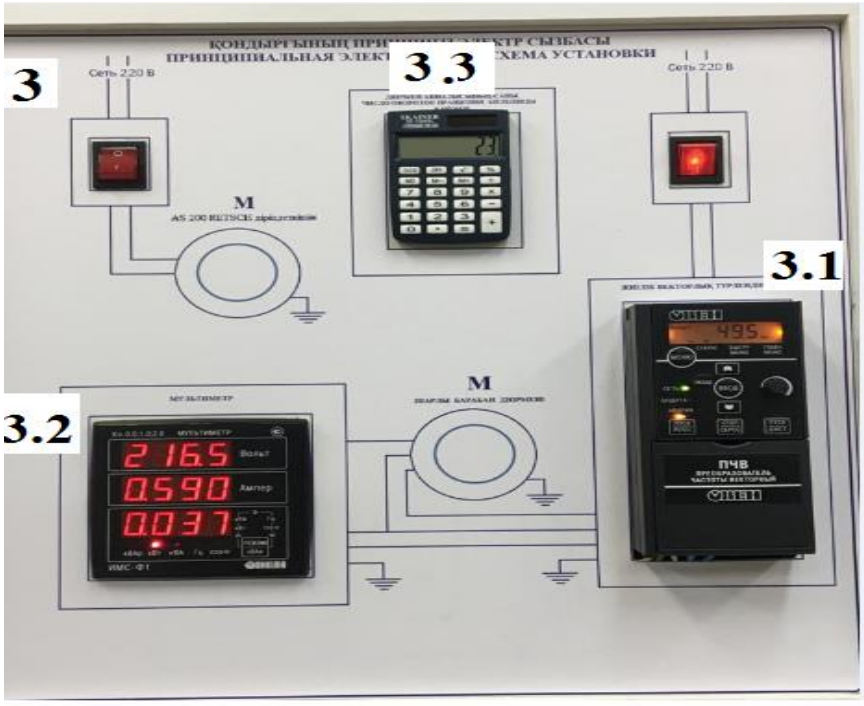
б)

1- шаровая барабанная мельница; 2 - крышка; 3- зажим; 4 - валки; 5 - мелющие шары; 6 - основа; 7-электрический привод

Рисунок 3.2 – а) Блок-схема модели шаровой барабанной мельницы; б) схема модели шаровой барабанной мельницы

Модель шаровой барабанной мельницы с заметным отклонением от рекомендуемого соотношения L/D=1,5 - 1,6 (что вполне допустима при исследовании процесса измельчения угля только истиранием) имеет диаметр барабана D=0,25 м, при длине L=0,27 м, рисунок 3.3 изготовлена из фарфора, масса шаровой загрузки составляет – 1/3 объема барабана. Частота вращения барабана составляет 64 об/мин.

а) экспериментальная установка шаровой барабанной мельницы



б)

б) принципиальная электрическая схема установки

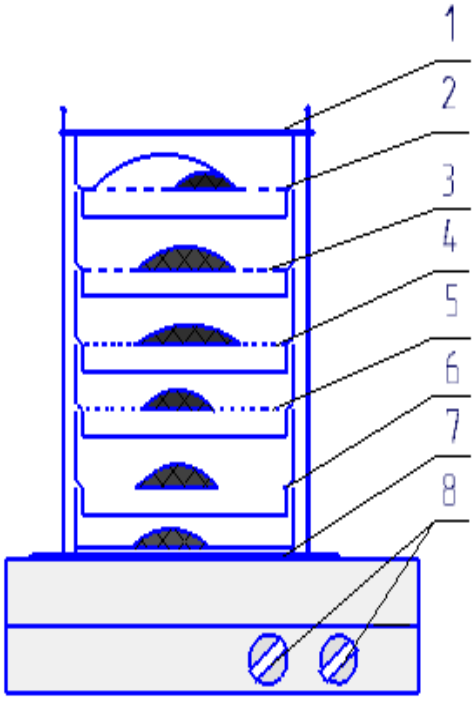
1- мельница (ШБМ); 2 - просеивающая машина Retsch AS200; 3- принципиальная электрическая схема установки: 3.1- преобразователь частоты (ПЧВ 102-1К5-А); 3.2 - мультиметр (ИМС-Ф1); 3.3 -калькулятор (SK-108XLB) для измерения числа оборотов мельницы

Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка и состав измерительных приборов

Принцип работы экспериментальной установки ШБМ представлен на рисунке 3.3 и заключается в следующем: в шаровую барабанную мельницу (1) загружают мелющие шары и уголь. Запускается электропривод (7), который вращает барабан. После останова мельницы готовая угольная пыль и мелющие шары выгружается через разгрузочный люк (2). Измельченный уголь для определения достигнутого уровня измельчения поступает на набор сит, Измерение веса (размера) шаров при завершении опыта позволяют оценить интенсивность истирания самих шаров. Модель оснащена контрольно-измерительными приборами (рисунок 3.3, б): преобразователь частоты (ПЧВ 102-1К5-А) для измерения мощности (3.1), мультиметр (ИМС-Ф1) для измерения напряжения и тока (3.2), калькулятор (SK-108XLB) для измерения числа оборотов мельницы (3.3), перед пуском и остановом мельницы регистрируются показания приборов. Время продолжительности размола угля для всех экспериментов определено одинаково и равняется 20 мин.

Ситовой анализ измельченного угля проводился на просеивающей машине RETSCH (рисунок 3.4) с набором стандартных сит диаметрами 1000, 500, 200, 90, 71 мкм в соответствии с ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1:1990) «Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия» [69]. (ГОСТ 2093–82) [70]. Общий вид и схема представлены на рисунке 3.4 (а, б)

а)



б)

1-крышка; 2 - сито x=1000 мкм; 3 - сито x=500 мкм; 4-сито x=200 мкм; 5 - сито x=90 мкм; 6 - сито x=71 мкм; 7-дно; 8 - регуляторы амплитуды и времени рассева

Рисунок 3.4 – а) общий вид просеивающей машины RETSCH с набором стандартных сит; б) схема просеивающей машины

После завершения эксперименов для проведения ситового анализа берется проба угольной пыли измельченной в ШБМ. На аналитических электронных настольных весах с дискретностью показаний в 0,01% рисунок 3.5, взвешиваются шары и навески угольной пыли массой 50 гр.

Рисунок 3.5 – Весы аналитические электронные весы

Шаровая барабанная мельница, специализированная исключительно на истирание твердого топлива, имеет недостатки, такие как, износ мельниц и мелющих шаров, что может привести к высоким расходам, потребление большего количества энергии на измельчение, а также при длительной работе существует перегрев оборудования, высокий уровень шума и вибрации. Процесс истирания эффективен, если уголь предварительно подготовлен и имеет начальную фракцию. Эти недостатки могут быть смягчены использованием современных методов управления.

3.5.2 Модель шаровой барабанной мельницы, созданная на базе НАО «КарИУ»

На базе НАО Карагандинского индустриального университета (КарИУ) г. Темиртау была изготовлена экспериментальная установка с максимальным обеспечением подобия реального процесса измельчения угля в шаровой барабанной мельнице. Геометрические размеры созданной невентилируемой модели ШБМ представлены на рисунке 3.6 и 3.7.

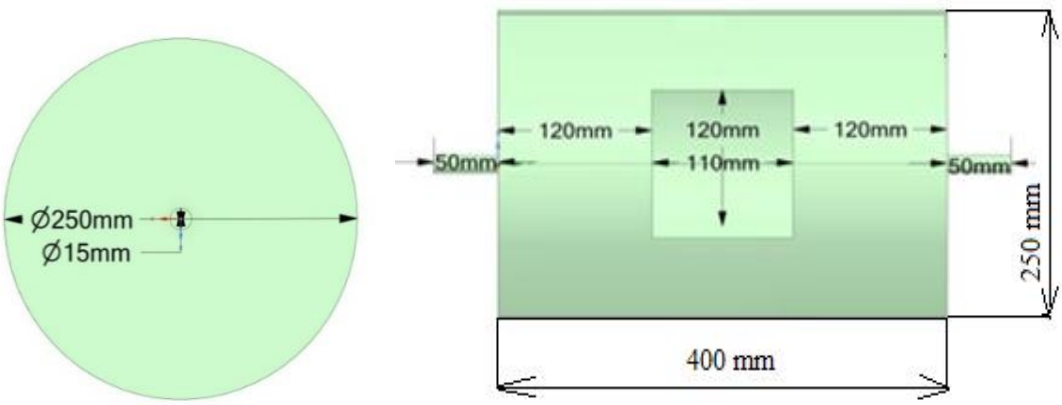
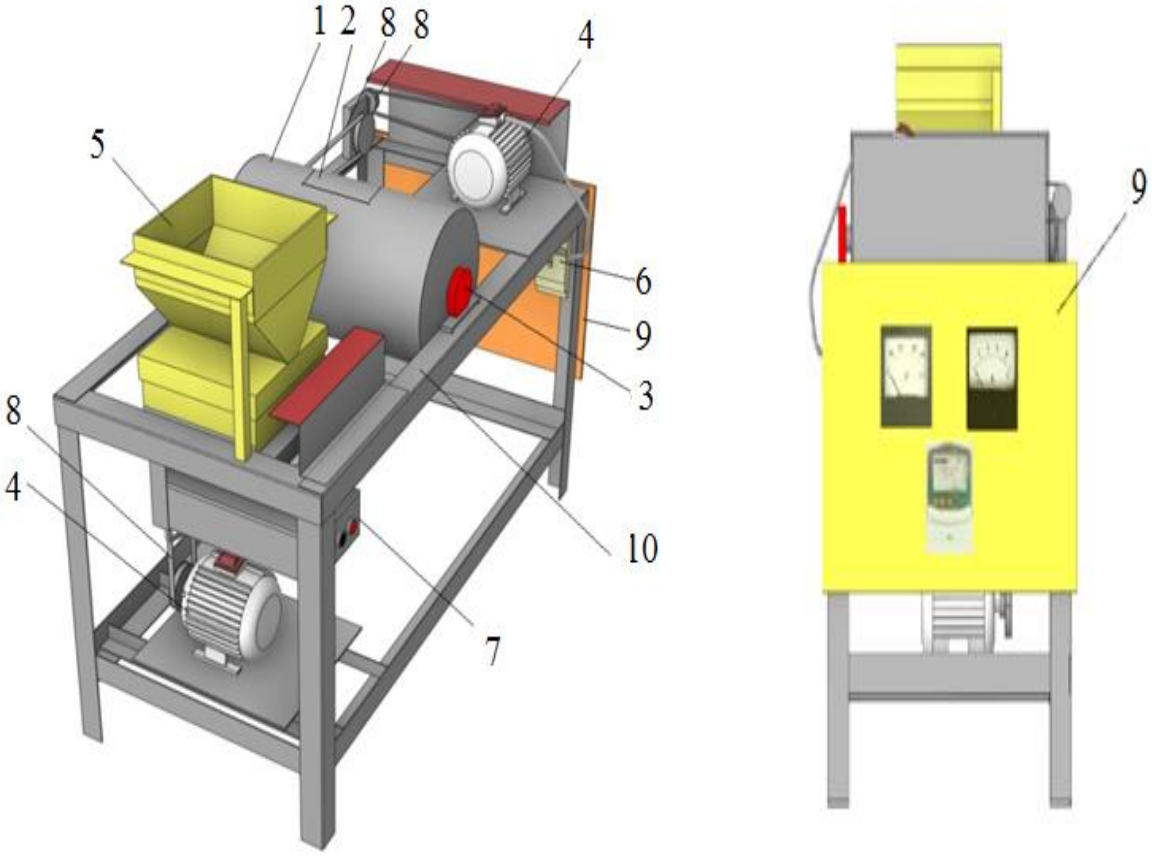


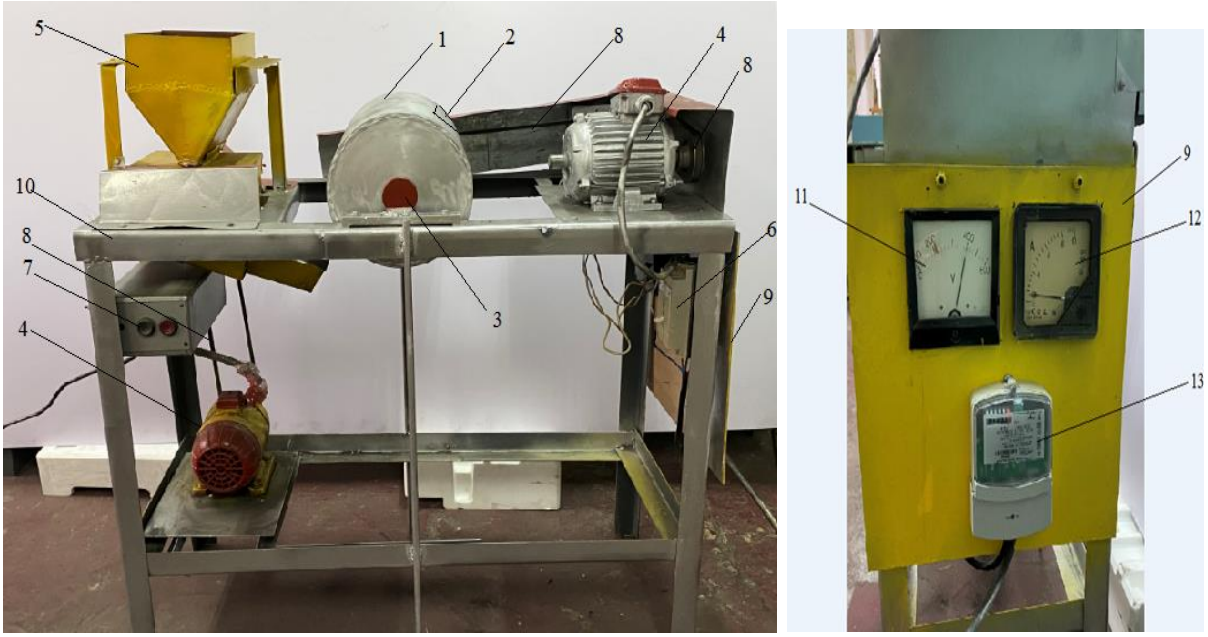
Рисунок 3.6 - Геометрические размеры модели невентилируемой шаровой барабанной мельницы



1 - шаровая барабанная мельница (ШБМ); 2 - люк для загрузки и разгрузки топлива; 3 - подшипниковая опора; 4 - привод; 5 - дробилка; 6 - включатель привода ШБМ; 7 - кнопки вкл/откл привода дробилки; 8 - ременная передача; 9 - стенд контрольно-измерительных приборов; 10 - неподвижная рама.

Рисунок 3.7 –Схема модели невентилируемой шаровой барабанной мельницы

Общий вид модели экспериментальной установки ШБМ представлена на рисунке 3.8



1 - шаровая барабанная мельница (ШБМ); 2 - люк для загрузки и разгрузки топлива; 3 - подшипниковая опора; 4 – привод [68]; 5 – шнековая дробилка; 6 - включатель привода ШБМ; 7 - кнопки вкл/откл привода дробилки [68]; 8 - ременная передача; 9 - стенд контрольно-измерительных приборов; 10 - неподвижная рама; 11 - вольтметр М42300 600В; 12 - амперметр М4202; 13 - счетчик электроэнергии фирмы «Дала» СА4У-Э720 3х220/380V 5(7,5)А.

Рисунок 3.8 - Общий вид модели шаровой барабанной мельницы

Время работы модели ШБМ подбирается опытным путем в зависимости от размера частиц угля, твердости угля и требуемой тонины помола. Перед пуском в шаровую барабанную мельницу загружают мелющие шары и уголь, регистрируются показания контрольно-измерительных приборов. После останова мельницы готовая угольная пыль выгружается и производится отбор пробы для ситового анализа. При использовании этой модели ШБМ сравнительные опыты с изменением исследуемого параметра проводились при равной продолжительности времени (20 мин) процеса измельчения [71].

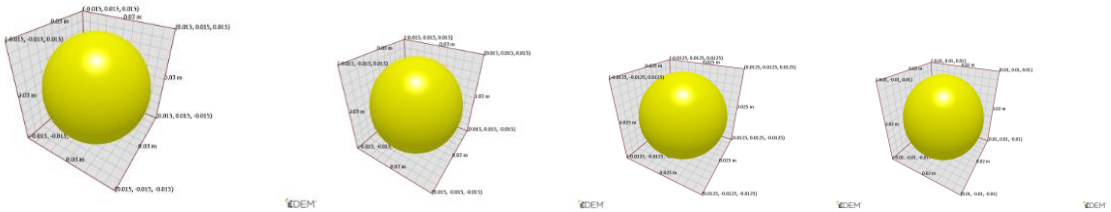
На данной модели шаровой барабанной мельнице можно проводить сравнительные исследования влияния различных факторов на процесс измельчения с большой достоверностью результатов, особенно - связанных с показателями измельчаемого угля. Уменьшенная модель позволяет исследовать режимные параметры мельницы [72].

В созданной модели шаровой барабанной мельницы [70], точно воспроизводится геометрическая форма барабана и допускается проведение опытов с разными размерами измельчающих шаров и фракциями угля.

3.6 Проведение эксперимента и определение параметров, влияющих на эффективность работы мельницы

3.6.1 Влияние мелющих шаров на интенсивность измельчения

Результаты опытов с разным размерами мелющими шарами на модели приведены на рисунке 3.9. Эти опыты в определенной степени позволяют оценить влияние диаметра шара на измельчения углей. Как было показано при обсуждении подходов по моделированию мельниц этого типа, уменьшение диаметра шаров по мере их истирания несколько снижает интенсивность измельчения. Однако в используемых мельницах шары сохраняются в пространстве барабана вплоть до полной потери размера. Это означает, что происходит затраты энергии на вращение барабана с этими «плохо» работающими шарами. Своевременное удаление шаров с недопустимо уменьшенными диаметрами может снизить затраты энергии на размол угля примерно на 5 %. Однако разработка техники удаления этих шаров выходит за пределы диссертационного исследования.



Ø 40 мм Ø 30 мм Ø 25 мм Ø 20 мм

Рисунок 3.9 - Диаметры мелющих шаров

По представленной методике подбора шаровой загрузки произведена загрузка мельницы. Максимальный размер стального шара при плотности стали $\rho = 0{,}00786$ кг/см^3 при размоле фракции $d_т$=2,5 см, принимаем $\sigma = 300$ кгс/см^2, $\varepsilon = 30000$ кгс/см^2; с=1 и $\beta = 0{,}5$ получим диаметр $d_{ш.мак}$=3,0 см=30 мм [3]:

$$d_{ш.мак} = d_Т \sqrt[3]{\frac{\sigma^2}{1{,}28 \cdot \beta \cdot c \cdot \varepsilon \cdot \rho_ш \cdot D}}, \text{ см} \qquad (3.13)$$

где $d_ш$ - диаметр шара, см;

$d_Т$ - размер куска угля, см;

σ - временное сопротивление разрушению сжатием, определенное лабораторным путем, кгс/см^2;

ε - модуль Юнга, кгс/см$^{2;}$

с - коэффициент, учитывающий переменность модуля Юнга, отсутствие пропорциональности между дефформацией и напряжением, и наличие пластических деформаций приразрушении;

$\rho_ш$ -плотность шара, кг/см^2;

D - внутренний диаметр барабана, см;

β - коэффициент, учитывающий долю энергии, идущий непосредственно на размол угля, при падении на него шара [3].

Методы подбора шаровой загрузки для вентилируемой ШБМ, учет структуры потока материала и времени его пребывания в камере, рассмотрены для каскадного режима движения, которые представлены в работах [16, 17, 18, 20, 22, 23, 24, 32, 37, 38]. Используя результаты представленных работ, наиболее подходящими режимами является, метод варьирование шаровой загрузки, учет структуры потока материала и время пребывания в камере.

Для получения оптимальной загрузки для модели ШБМ необходимо подобрать такую загрузку, при которой увеличится удельная поверхность, уменьшится пористость шаровой загрузки, а также получить максимальное распределение материала в камере в зависимости от времени. Количество мелющих шаров может варьироваться в зависимости от характеристики углей, который измельчается. Экспериментальные и теоретические методы могут применяться для определения неопределенного количества шаров с помощью разных коэффициентов заполнения мельниц в определенных условиях. Расчетные параметры мелющих шаров взяты из [ГОСТ 7524–2015] [73], различных диаметров [72].

На рисунке 3.10 представлена диаграмма заполнения объема барабана мельницы в зависимости от диаметра мелющих шаров Ø 40 мм, Ø 30 мм, Ø 25 мм, Ø 20 мм

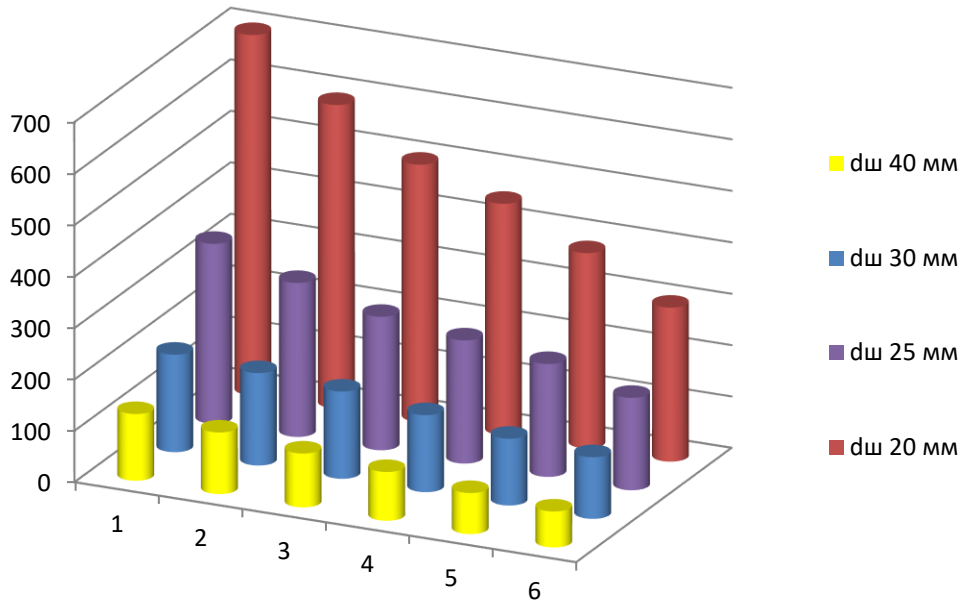


Рисунок 3.10 – Диаграмма заполнения объема барабана мельницы в зависимости от диаметра мелющих шаров

Диаметр средневзвешенного шара определим из выражения

$$d_{св} = \frac{\sum d_i \cdot G_i}{\sum G_i}, \text{ см} \quad (3.14)$$

где d_i - диаметр шара, соответственно (30, 25, 20), мм;

G_i - масса шара, соответственно (30, 25, 20), мм [13].

Чем выше частота вращения барабана $n_б$, тем выше будет высота падения шаров $h_{п.ш}$. Большое количество шаров имеют больший инертный момент и могут обеспечить большую высоту падения при вращении барабана. Повышение $h_{п.ш}$ может увеличить интенсивность и эффективность процесса измельчения. Однако важно учитывать, что слишком большая $h_{п.ш}$ может также вызывать нежелательные явления, такие как чрезмерное износ шаров или более интенсивное измельчение, что может повлиять на качество продукта [4].

Диаметры мелющих шаров 20 мм не способны разрушить крупные фракции угля, так как недостаточна их энергия удара. Чем крупнее диаметр мелющих шаров более 40 мм, тем более интенсивное разрушение.

Заполнение барабана мелющими шарами также влияет на производительность и эффективность размола. При степени заполнения объма барабана более 40% в средней части барабана происходит столкновение поднимающихся шаров с падающими, что ухудшает эффективность измельчения. При 20 - 30% заполнении мелющими шарами ШБМ часть шаров отбрасывается от сенки при высоких скоростях, при критических скоросях происходит их скольжение. При 30 - 40 % заполнения мелющими шарами скольжение ослабевается, внешние шары прилипают к стенке при критических соростях. Влияние степени заполнения мелющими шарами на измельчение определяется ситовым анализом по полученным R_{90} и R_{200} на остатках сит.

Для получения оптимальной загрузки для модели ШБМ необходимо подобрать такую загрузку, при которой увеличится удельная поверхность, уменьшится пористость шаровой загрузки [76].

Изменение величины загрузки мельницы мелющими шарами разных диаметров может привести к различным режимам работы мельницы, таким как режим перекатывания и режим скольжения.

3.6.2 Характеристики измельчаемых углей

Общими техническими характеристиками топлив являются теплота сгорания, содержание золы, влажность и наличие серы [77]. Физические свойства углей существенно влияют на формирование основных параметров, характеризующих гранулометрический и фракционный составы. При производстве технического анализа определяются влага, зола, летучие вещества, коксовый остаток (спекаемость) и сера [78, 79].

Механическая прочность углей характеризуется коэффициентом размолоспособности $К_{ло}$ [80, 81]. По методу ВТИ коэффициент размолоспособности определяется по отношение величин R_{90} исследуемого топлива [82]. Однако, коэффициент размолоспособности $К_{ло}$ не является прямым показателем механической прочности угля.

Угли Карагандинского, Экибастузского и Шубаркольского месторождений являются широко используемыми на ТЭЦ-2. Это указывает на их значимость в энергетической промышленности. Для измельчения на модели шаровой мельницы (ШБМ) взяты образцы данных углей (рисунок 3.11), элементарный состав и характеристика которых были приведены в таблице 1.5, 1.6.

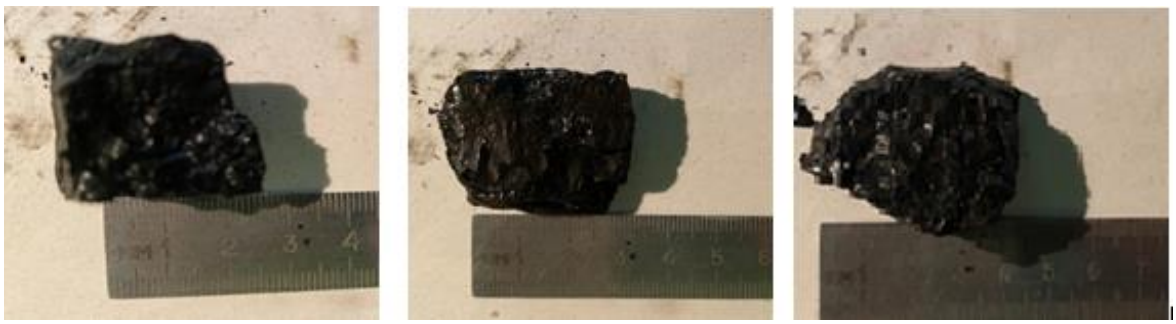
До начала опытов угли подсушили при температуре помещения 18°С влажность в помещении составила 50%.

а) б) в)

Рисунок 3.11 – Процесс естественной сушки углей: а) Карагандинский уголь, б) Экибастузский уголь, в) Шубаркольский уголь

Размеры фракции углей для измельчения в мельнице использовались предварительно раздробленными размерами фракции углей 20, 30, 40 мм. Размер частиц поступающего угля в мельницу имеет существенное влияние на процесс измельчения. Чем мельче размер частиц угля, тем более эффективно будет его измельчение. Это связано с тем, что мельче частицы, тем больше их поверхности, доступной для измельчения. Однако при слишком мелком размере частиц угля возможны проблемы с просеиванием и перегрузкой мельницы. Поэтому оптимальный размер частиц угля для мельницы зависит от типа мельницы, условий эксплуатации и требований к конечному продукту.

Для измельчения в мельнице были отобраны размеры фракции углей 20 мм, 30 мм, 40 мм (рисунок 3.12 а, б, в).



а) б) в)

Рисунок 3.12 - Размеры фракции углей а) 20 мм, б) 30 мм, в) 40 мм.

Эксперимент проводился с Карагандинским, Экибастузским и Шубаркольским углями при различных коэффициентах заполнения мельницы и различных диаметрах мелющих шаров. Для определения качественной характеристики готовой трех углей выполнен ситовой анализ гранулометрического состава угольной пыли, который основан на использовании серии сит разного диаметра [3, 82].

3.6.3 Исследование качественных характеристик угольной пыли

Эксперимент проводился при одинаковом времени 20 мин с разными фракциями углей (20 мм, 30 мм, 40 мм), при различных степенях загрузки мелющими шарами φ=0,45; φ=0,40; φ=0,35; φ=0,30; φ=0,25; φ=0,2 и при разных диаметрах шаров Ø 40 мм, Ø 30 мм, Ø 25 мм, Ø 20 мм.

После каждого измельчения углей проводился ситовый анализ, который позволяет оценить качество готовой пыли по ее гранулометрическому составу согласно ГОСТ 6613–86 «Уголь. Методы определения зернового состава» [82].

Для ситового анализа взяты пробы порции измельченного массой m =50 гр., далее просеяли через комплект набора сит с размерами отверстий в ситах 1000, 500, 200, 90, 71 мкм [82] в течение 15 минут на виброгрохоте (рисунок 3.4) при заданной амплитуде 50 Гц. Навеска угольной пыли помещается на верхнее сито, устанавливается крышка набора сит плотно прижимается к верхнему ободу сита и затягивается винтами до тугого натяжения.

После завершения просева взвешиваются остатки на промежуточных ситах фракции угольной пыли на аналитических весах. Остатки на каждом сите и донной посуде высыпают отдельно и каждый из остатков взвешивают с точностью 0,001г. Рассев проводят дважды, при этом расхождения в определении остатков на ситах не должны превышать 1%. Значения полученные после просева каждой ситы записывается в таком порядке m_{1000}, m_{500}, m_{200}, m_{90}, m_{71}, $m_{дно}$.

Результаты рассева отражают степень разделения исходного материала на различные фракции в зависимости от их размеров. Для определения результатов

рассева используются сита, которые представляют собой прямоугольные или круглые пластины с отверстиями различного размера.

Массовое количество остатка на первом самом крупном сите R_{1000} (самый крупный размер фракции). Он представляет собой долю материала, который не просеялся через это сито. Фракции F на промежуточных ситах, это количество материала, просеянное через сита с различными размерами отверстий, расположенных между крупным ситом и мелким ситом. Фракции обычно обозначаются как F_1, F_2, F_3 и т. д., где F_1 - наибольшая фракция, а F_n - наименьшая фракция. Проход через последнее самое мелкое сито D_{71}, количество материала, которое просеялось через самое мелкое сито с размером отверстий D_{71}. В процессе рассева некоторая часть тончайшей пыли может быть распылена в окружающее пространство ΔG. Результаты рассева используются для создания гранулометрических кривых, которые показывают распределение размеров частиц в исходном материале.

$$R_{1000} + F_{500/1000} + F_{200/500} + F_{90/200} + F_{71/90} + D_{71} + \Delta G_{\text{расп}} \qquad (3.15)$$

Зерновая характеристика R_x выражает определенный физический закон дробления и может быть описана математически в виде:

$$R_x = 100 \cdot e^{-bx^n}, \qquad (3.16)$$

где x- размер частиц (отверстий сита), мкм;

b - постоянный коэффициент, отражающий тонкость помола;

n - постоянный коэффициент, отражающий внутреннюю структуру пыли [62, 85].

Коэффициент b, связан с размером частиц пыли и его влиянием на процесс рассева. Чем больше значение коэффициента b, тем тоньше пыль.

Коэффициент b определяет отношение массы тончайшей пыли к массе всего материала. Если значение коэффициента b=0, это означает, что нет тончайшей пыли, и все частицы материала остаются на крупных ситах ($R \rightarrow$ 100% остаток на первом самом крупном сите).

Если значение коэффициента b=1, это означает, что весь материал раздроблен до такой степени, что превратился в тонкую пыль, и прошел через все сита ($R \rightarrow 0$ остаток на первом самом крупном сите).

Исходя из числовых значений коэффициента b в промышленных мельницах $b=4 \cdot 10^{-3}$ - для грубой пыли (значение ближе к нулю), только небольшая часть материала превращается в тонкую пыль, и большая часть остается в виде крупных частиц на первом сите, $b=40 \cdot 10^{-3}$ для тонкой пыли (значение ближе к единице) [3, 4].

Надежность воспламенения пыли напрямую зависит от количества пыли с размерами частиц, замедляющихся на сите с размерами ячеек 90 мкм (R_{90}). С

другой стороны, полнота выгорания пыли зависит от наличия крупных частиц, остающихся на сите с размерами ячеек 200 мкм (R_{200}). Эти факторы важны для определения потерь тепла, связанных с механическим недожогом топлива. Регулирование этих параметров может иметь существенное значение для эффективности процесса сжигания топлива на ТЭЦ [4].

$$R_{90} = R_{100} + F_{500/1000} + F_{200/500} + F_{90/200}\ \% \tag{3.17}$$

$$R_{200} = R_{100} + F_{500/1000} + F_{200/500}\ \% \tag{3.18}$$

Значения R_{90} и R_{200} соответствуют величинам $R_{90} = 15 \div 40\%$ и $R_{90} = 1{,}3 \div 13\%$ [4].

Постоянный коэффициент, отражающий тонкость помола [4]:

$$n = \frac{\lg\ln\frac{100}{R_{200}} - \lg\ln\frac{100}{R_{90}}}{\lg\frac{200}{90}} \tag{3.19}$$

Постоянный коэффициент, отражающий внутреннюю структуру пыли, будет равен:

$$b = \frac{1}{90^n} \cdot \ln\frac{100}{R_{90}} \tag{3.20}$$

Из (3.23) в уравнение (3.19) остаток на сите R_{71} выразим через остаток на сите [55] R_{90}.

$$R_{71} = 100\left(\frac{R_{90}}{100}\right)^{\left(\frac{x}{90}\right)^n}\ \% \tag{3.21}$$

Остаток на сите равен $R_{500} = R_{1000} + F_{500/1000}\ \%$.

На основании проведенных исследовании на двух моделях ШБМ (АУЭС, КарИУ) представлены сравнительные характеристики угольной пыли Карагандинского, Экибастузского и Шубаркольского углей. Ниже в виде графиков представлены, кривые рассева углей для сравнения полученных результатов характеристики при идеальном и грубом измельчении каменных углей в ШБМ данные взяты с [2, 3].

При коэффициенте загрузки мелющими шарами равной φ=0,45; φ=0,40; φ=0,35; φ=0,30; φ=0,25; φ=0,20, диаметр мелющих шаров приняты 20, 25, 30 и 40 мм. Масса загружаемого угля была взята для всех опытов 20% от объема барабана (1,5 кг для модели ШБМ АУЭС и 1,8 кг для модели КарИУ). Время измельчения для всех экспериментов составляло 20 мин, после измельчения взята порцию угольной пыли 50 гр, далее произвели рассев угольной пыли (для каждой фракции углей опыты проводились по отдельности).

Модель шаровой барабанной мельницы, созданная на базе АУЭС. На модели ШБМ созданной базе АУЭС проведены опыты с разными размерами фракции углей 20, 30 и 40 мм и с разными диаметрами мелющих шаров 20, 25, 30, 40 мм. При различных условиях тонкость угольной пыли R_{90} и R_{200} находятся в диапазоне для Карагандинского угля R_{90} =23,08 - 25,5 и R_{200}=3,12 – 4,15, для Экибастузского угля R_{90} =24,3 – 28,1 и R_{200}=3,8 - 5,2, для Шубаркольского угля R_{90} =20,2 - 24,1 и R_{200}= 3,5 – 3,1.

Согласно полученным экспериментальным данным, при диаметре мелющих шаров 30 мм получена оптимальная степень измельчения, далее все сравнительные характеристики будут построены при этом оптимуме. На рисунке 3.13, 3.14, 3.15 представлены графики зависимости $R_{90}=f(\varphi_{iзагр})$, степень загрузки мелющими шарами приняты φ=0,45; φ=0,40; φ=0,35; φ=0,30; φ=0,25; φ=0,20 для Карагандинского, Экибастузского и Шубаркольского углей при разных фракциях углей (20 мм, 30 мм, 40 мм).

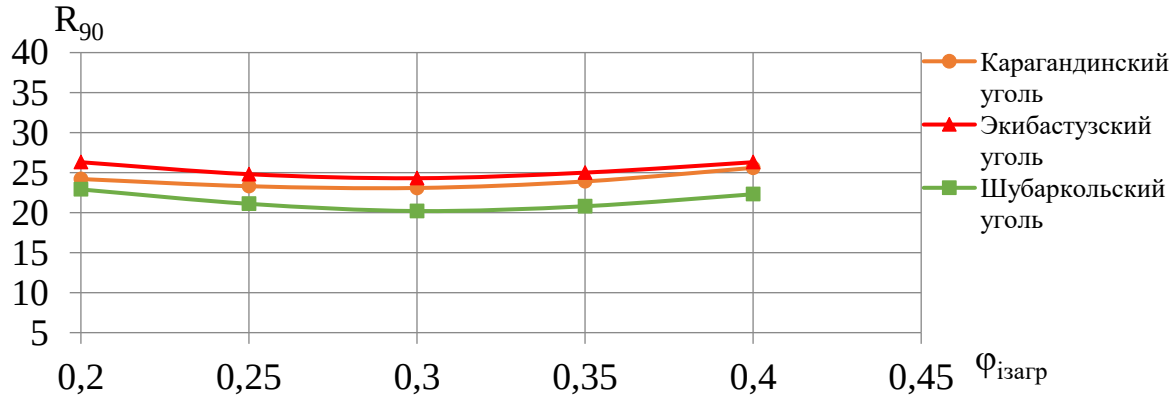


Рисунок 3.13 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{iзагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 20 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ НАО АУЭС)

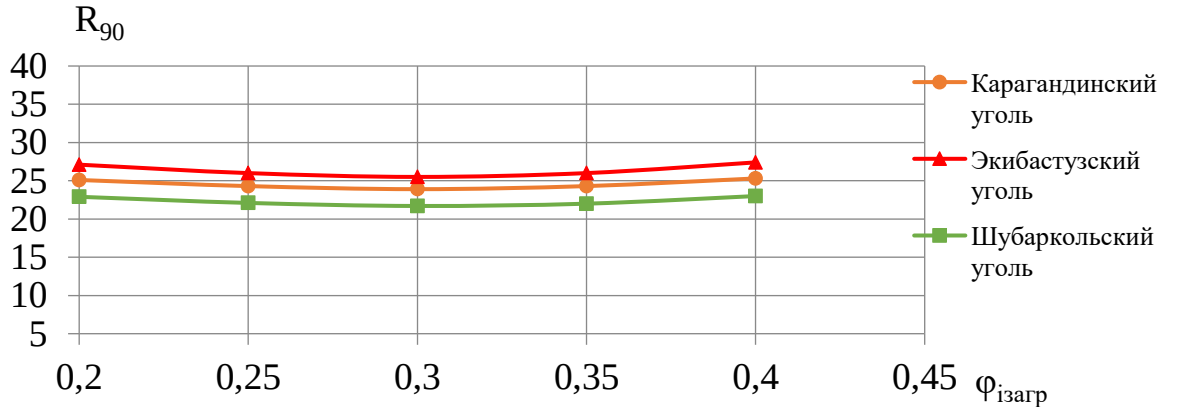


Рисунок 3.14 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{iзагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 30 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ АУЭС)

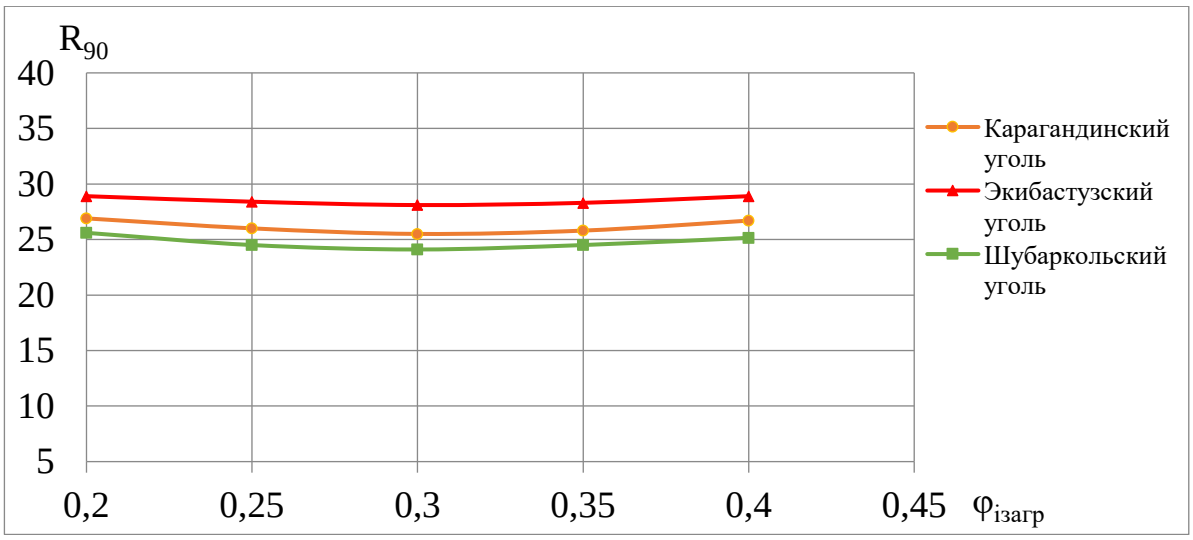
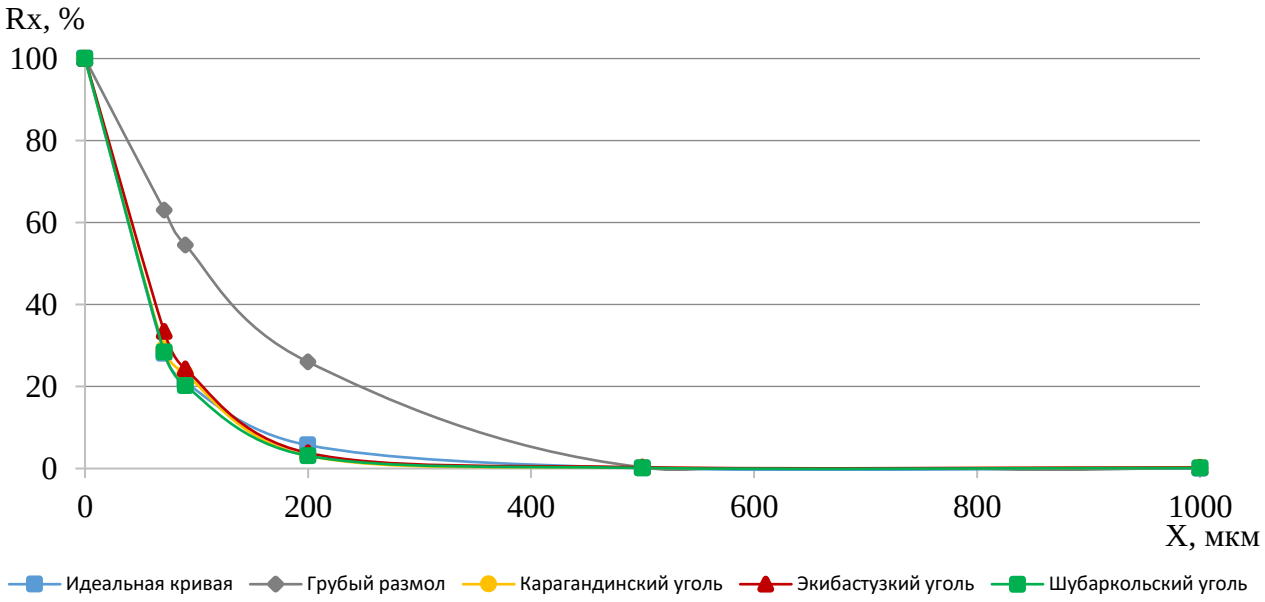
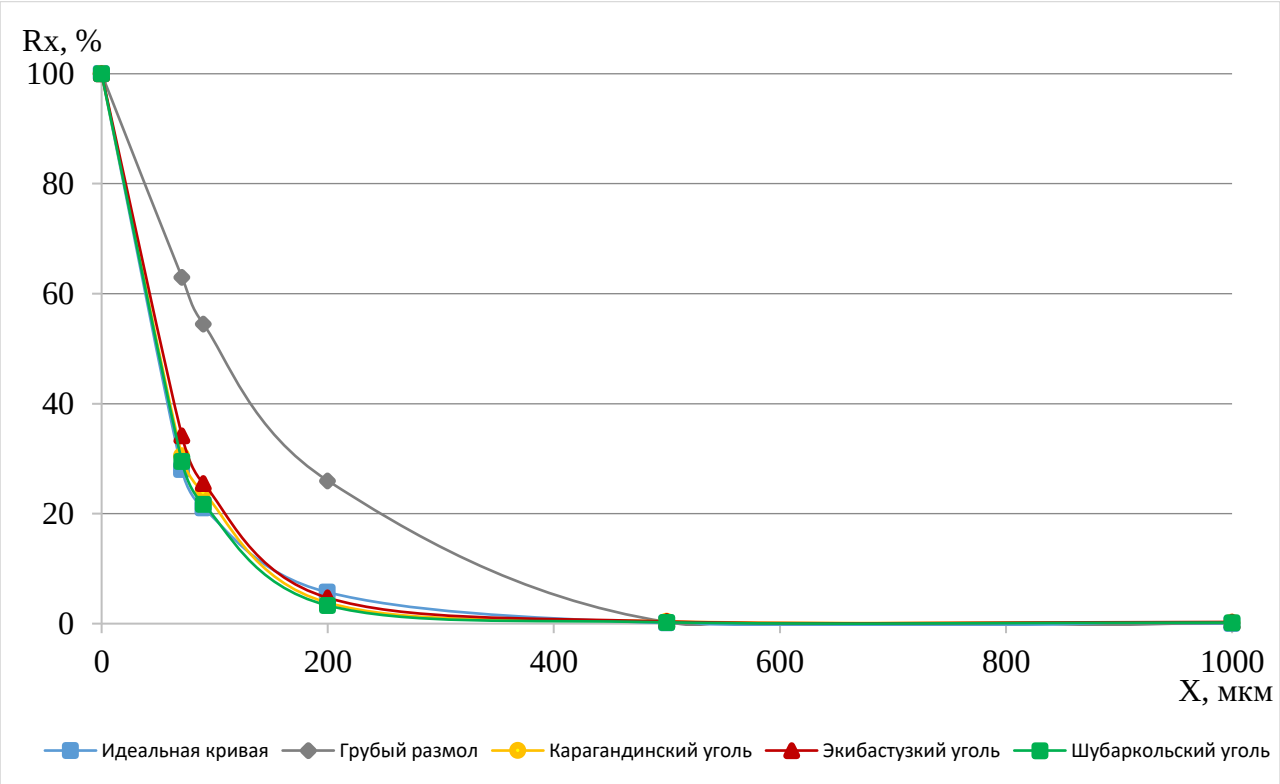


Рисунок 3.15 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{iзагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 40 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ АУЭС)

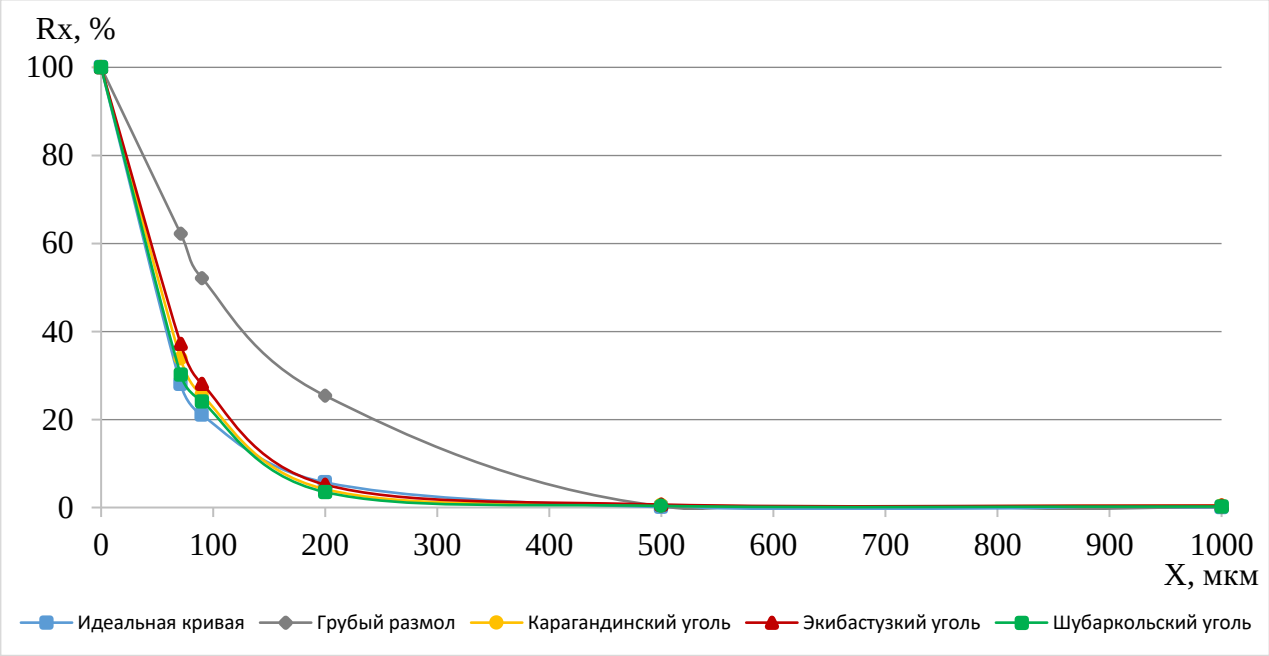
По полученным кривым представленной на рисунках 3.13, 3.14, 3.15 можно сделать вывод, для модели ШБМ АУЭС, что оптимальное значение находиться при $\varphi_{iзагр}$=30, фракция углей 20 мм, значение полных остатков на сите равен R_{90}=23,08, R_{200}=3,12 для Карагандинского угля, Экибастузского угля R_{90}=24,3, R_{200}= 3,8, Шубаркольского R_{90}=20,2, R_{200}=3,1. На основании полученных значении при $\varphi_{iзагр}$=30 построены кривые рассева (рисунок 3.16 а, б, в), для сравнительной характеристики взяты данные кривых рассева идеальной и грубой угольной пыли из расчета пылеприготовления (нормативный метод) [4, 10].



а) кривые рассева угольной пыли фракции 20 мм



б) кривые рассева угольной пыли фракции 30 мм



в) кривые рассева угольной пыли фракции 40 мм

Рисунок 3.16 – Кривые рассева угольной пыли после размола на модели ШБМ АУЭС при степени заполнения шарами φ=0,30, диаметром шара 30 мм: а) фракция углей 20 мм, б) фракция углей 30 мм, в) фракция углей 40 см

На рисунке 3.17 представлена зависимость $R_{90}=f(d_{iзагр})$.

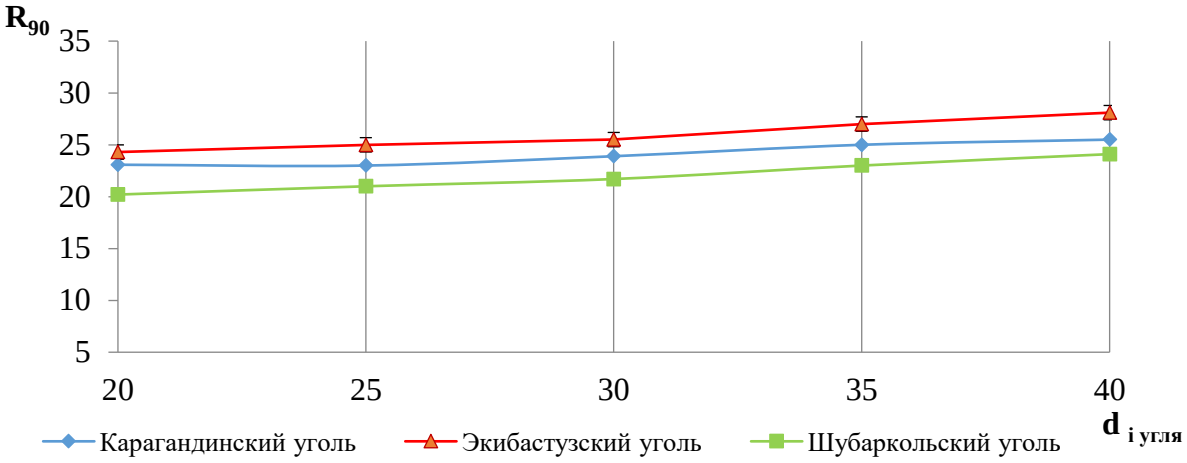


Рисунок 3.18 – Зависимость полного остатка на сите R_{90} от размера фракции углей $d_{i\ угля}$

На рисунок 3.17 видно, что фракция угля равная $d_{iугля}$=20 мм загружаемого в мельницу имеет более тонкую угольную пыли, чем фракции углей $d_{iугля}$=30 - 40 мм. Отсюда следует, что, чем больше размер фракции угля загружаемый в ШБМ, тем грубее угольная пыль. Более тонкую угольную пыль получили при. при степени заполнения шарами φ=0,30, оптимальный диаметр мелющего шара 30 мм.

Модель шаровой барабанной мельницы созданная на базе КарИУ с удержателями без прорезей. Конструктивное исполнение модели мельницы позволяют вносить некоторые изменением и оценить энергетическую эффективность предлаггаемой модернизации. В том числе, можно менять конструкцию и число удержателей шаров (они же в определенной степени выполняют роль перемешивателя измельчаемого угля). Модернизация предполагала создание прорезей на традиционных удержателях одного или нескольких прорезей с шириной меньшей исходного диаметра шаров.

Схемы шаровой барабанной мельницы с удержателями шаров традиционной конструкции (без прорезей) представлена на рисунок 3.18.

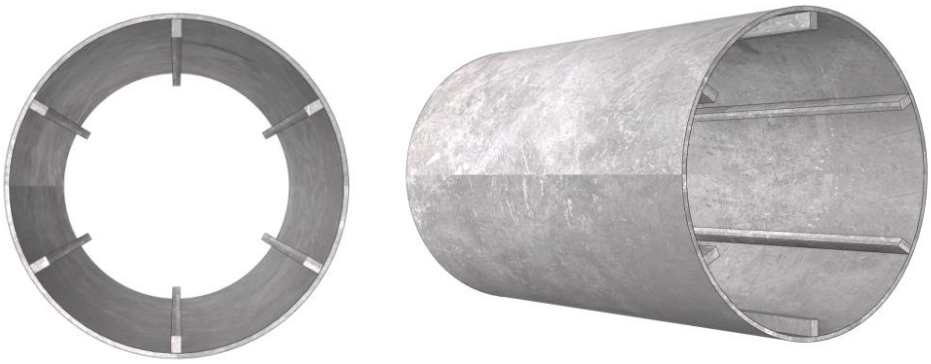


Рисунок 3.18 – Внутримельничная конструкция ШБМ с удержателями без прорезей

Удержатели без прорезей размерами (0,4х0,025) (рисунок 3.18) установлены по длине мельницы таким образом, при вращении мельницы мелющие шары и уголь поднимаются до определенной высоты, и падают вниз увеличивая ударную нагрузку. Измельчение происходит за счет удара падающих шаров на частицы угля, расположенные в нижней части барабана. Частицы угля поднимаемые вместе с шарами падают вниз также вместе с шарами (с незначительной разницей в скорости, что означает существенное снижение интенсивности размола этой части объема угля..

На модели ШБМ созданная на базе КарИУ с удержателями без прорезей проведены аналогично те же опыты, что и на модели АУЭС, с разными размерами фракции углей 20, 30 и 40 мм и с разными диаметрами мелющих шаров 20, 25, 30, 40 мм, продолжительность размола принята 20 мин. При различных условиях тонкость угольной пыли R_{90} и R_{200} находятся в диапазоне для Карагандинского угля R_{90} = 22,6 – 25,1 и R_{200}= 2,6 – 3,8, для Экибастузского угля R_{90} = 23,2 – 26,9 и R_{200}= 3,4 – 4,8, для Шубаркольского угля R_{90} =18,6 – 24,3 и R_{200}= 2,1 – 2,8.

На рисунке 3.19, 3.20, 3.21, представлены графики зависимости $R_{90}=f(\varphi_{iзагр})$, степень загрузки мелющими шарами приняты φ=0,45; φ=0,40; φ=0,35; φ=0,30; φ=0,25; φ=0,20 для Карагандинского, Экибастузского и Шубаркольского углей при разных фракциях углей (20 мм, 30 мм, 40 мм).

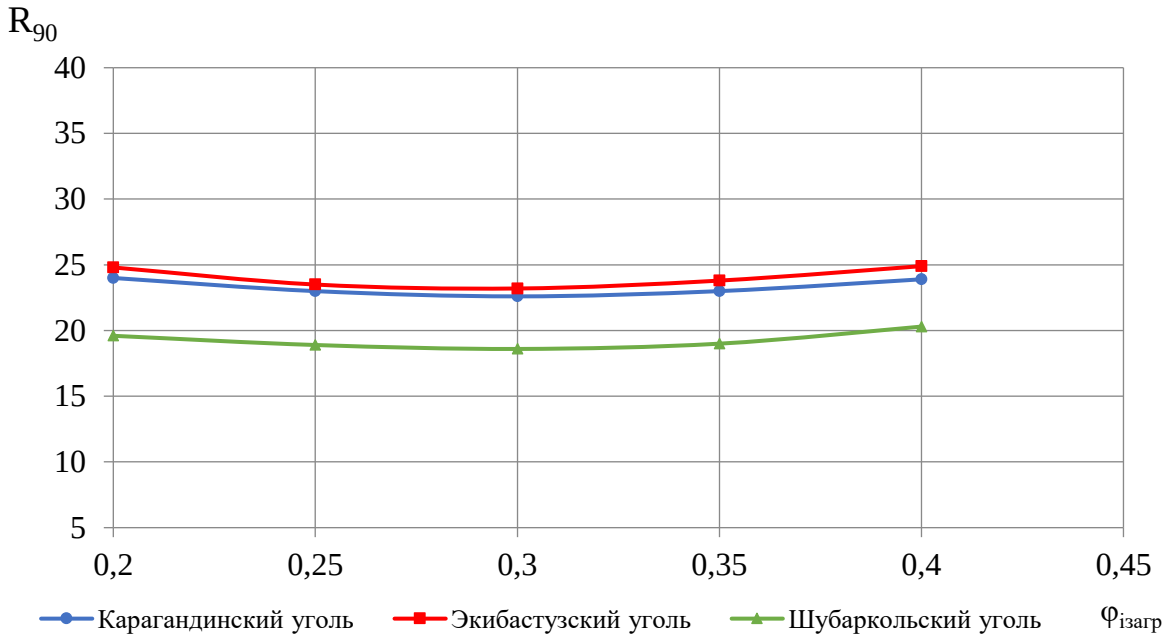


Рисунок 3.19 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{iзагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 20 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей)

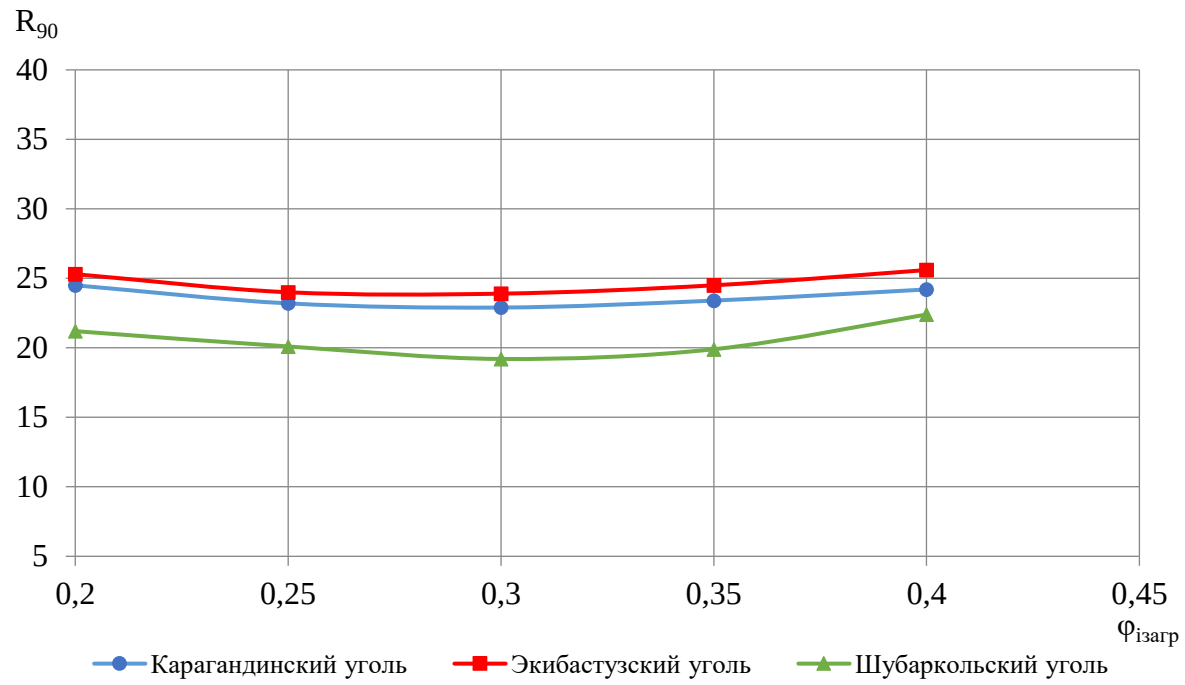


Рисунок 3.20 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{изагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 30 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей)

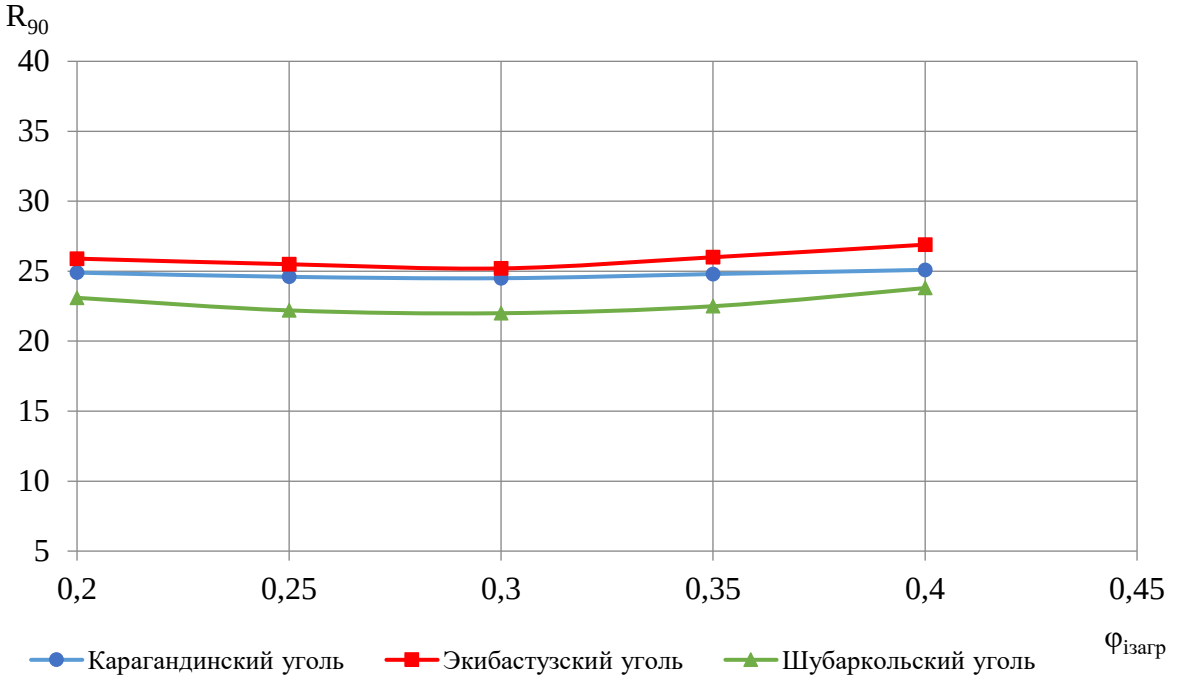


Рисунок 3.21– Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{изагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 40 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей)

По полученным результатам рассева угольной пыли трех углей на модели ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей, можно сделать вывод, что область оптимальных значении остатка на сите R_{90} получены при φ=0,30, $d_{ш}$=30 мм и $d_{угля}$=20 мм.

На рисунке 3.22 видно, что в зависимости R_{90} от степени загрузки мелющими шарами при φ= 0,30 получена тонкая пыль при измельчении трех углей фракции 20 мм на модели ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей.

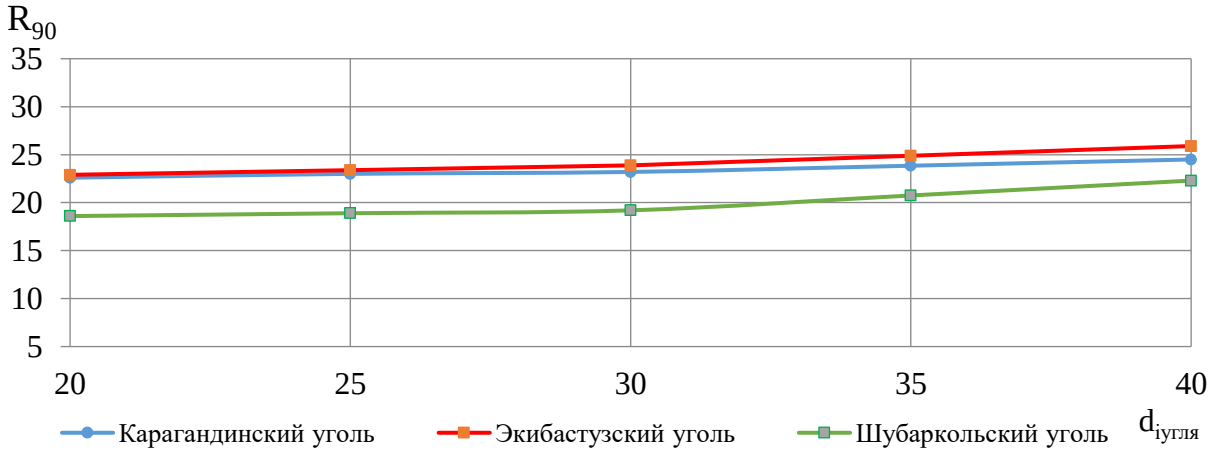
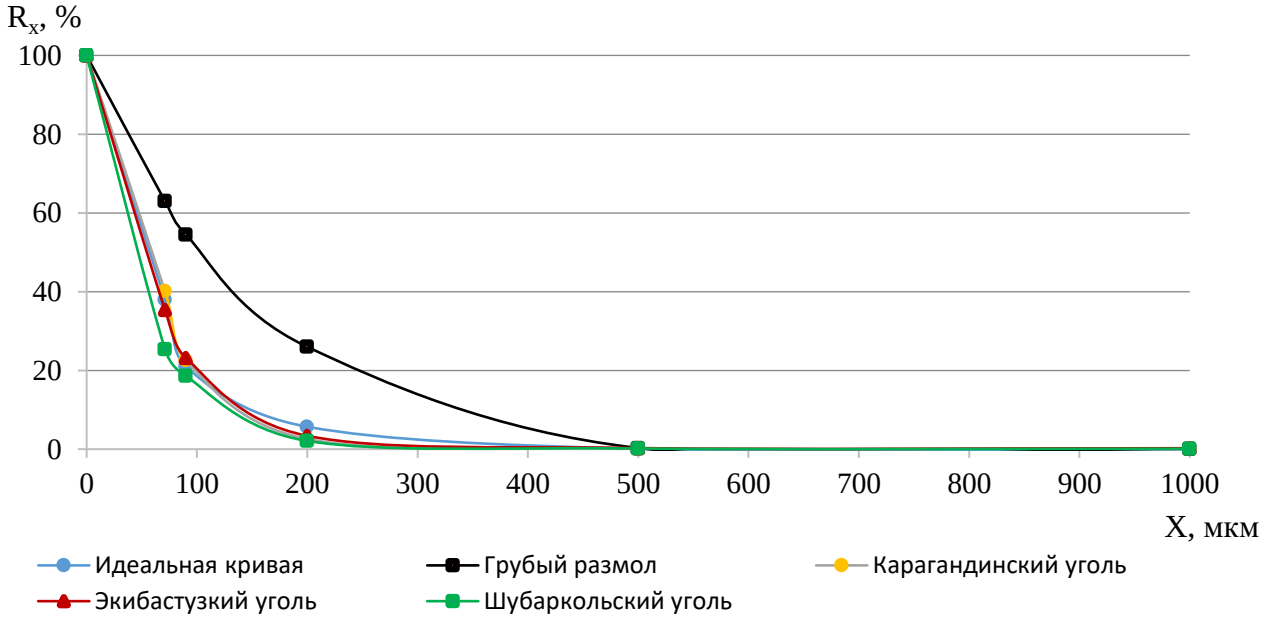
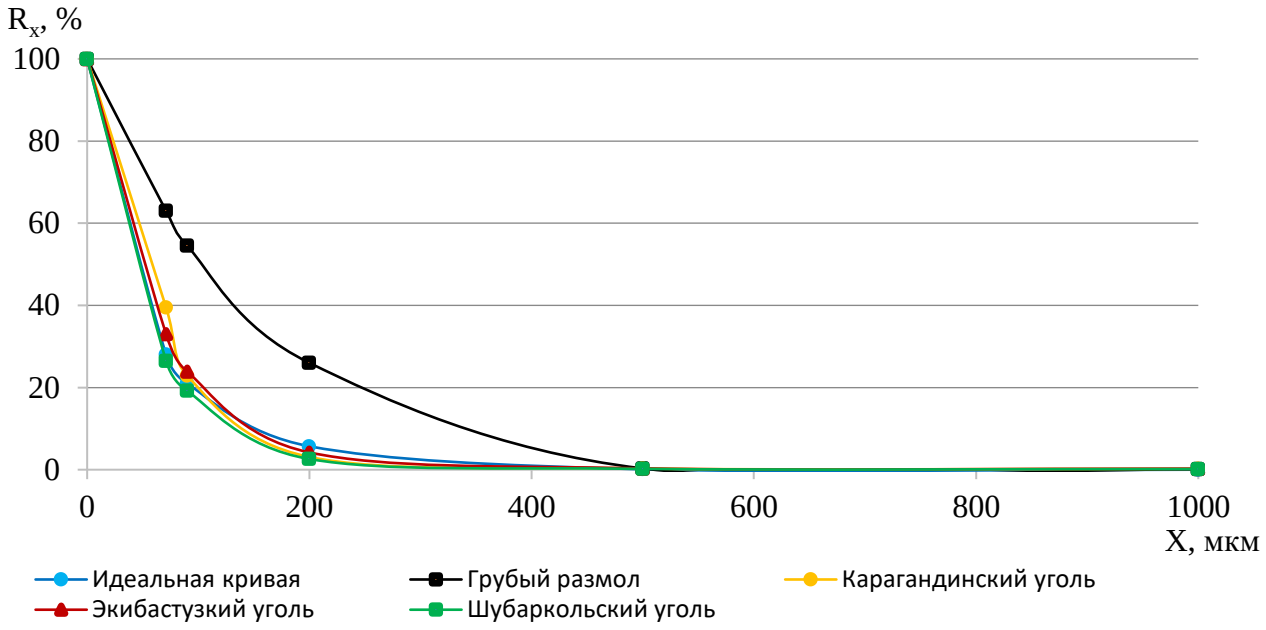


Рисунок 3.22 – Зависимость полного остатка пыли на сите R_{90} от фракции углей $d_{i\ угля}$

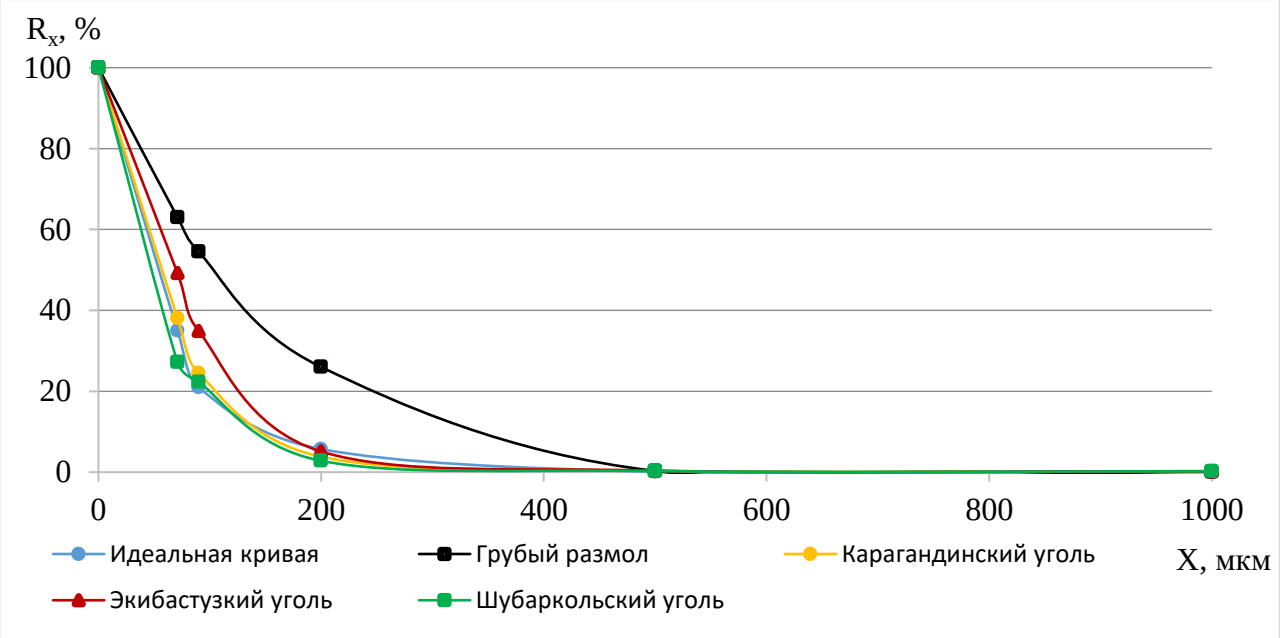
Кривые рассева угольной пыли представлены на рисунке 3.23 (а, б, в) при φ=0,30 и $d_{ш}$=30 мм, фракция углей $d_{i\ угля}$=20 мм (Карагандинский, Экибастузский, Шубаркольский). На основании полученных значении при $φ_{iзагр}$=30 построены кривые рассева, для сравнительного анализа взяты данные кривых рассева идеальной и грубой угольной пыли [4, 10].



а) кривые рассева угольной пыли фракции 20 мм



б) кривые рассева угольной пыли фракции 30 мм



в) кривые рассева угольной пыли фракции 40 мм

Рисунок 3.23 – Кривые рассева угольной пыли после размола на модели ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей при степени заполнения шарами φ=0,30, диаметром 30 мм: а) фракция углей 20 мм, б) фракция углей 30 мм, в) фракция углей 40 см

Модель шаровой барабанной мельницы на базе КарИУ с удержателями с прорезями. Удержатели с прорезями (рисунок 3.24) имеют размер прорезей с 25 мм по длине барабана (0,40х0,025). Удержатели с прорезями установлены таким образом, что при вращении мельницы мелющие шары и частицы угля, имеющие размеры менее 20 мм просыпаются через прорези и попадают на верхний слой истираемого слоя. В результате и эта часть

угля подвергается измельчению ударами шаров. Шары с диаметрами менее 20 мм не поднимаемые в верхнюю часть мельницы больше участвуют в процессе измельчения через механизм истирания. Эти факторы значительно интенсифицирует процесс измельчения угля, что позволяет сократить расход электроэнергии и повысить производительность мельниц.

Шаровая барабанная мельница с удержателями с прорезями представлена на рисунок 3.24.

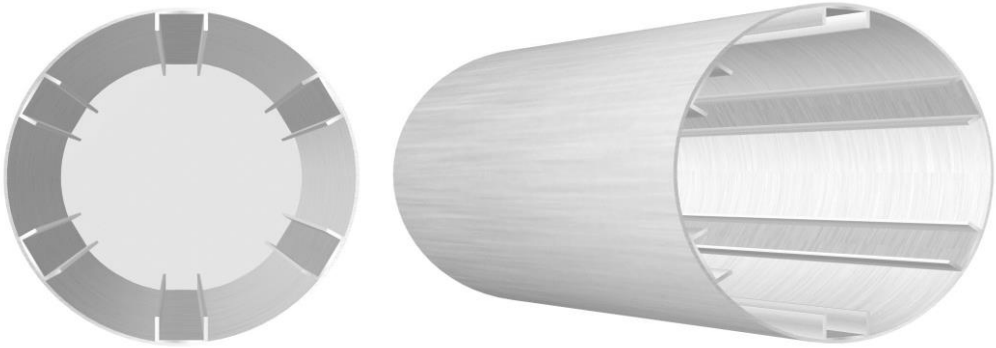


Рисунок 3.24 – Внутримельничная конструкция ШБМ с удержателямис прорезями

На рисунке 3.25, 3.26, 3.27 представлены графики зависимости $R_{90}=f(\varphi_{iзагр})$, степень загрузки мелющими шарами приняты φ=0,45; φ=0,40; φ=0,35; φ=0,30; φ=0,25; φ=0,20 для Карагандинского, Экибастузского и Шубаркольского углей при разных фракциях углей (20 мм, 30 мм, 40 мм).

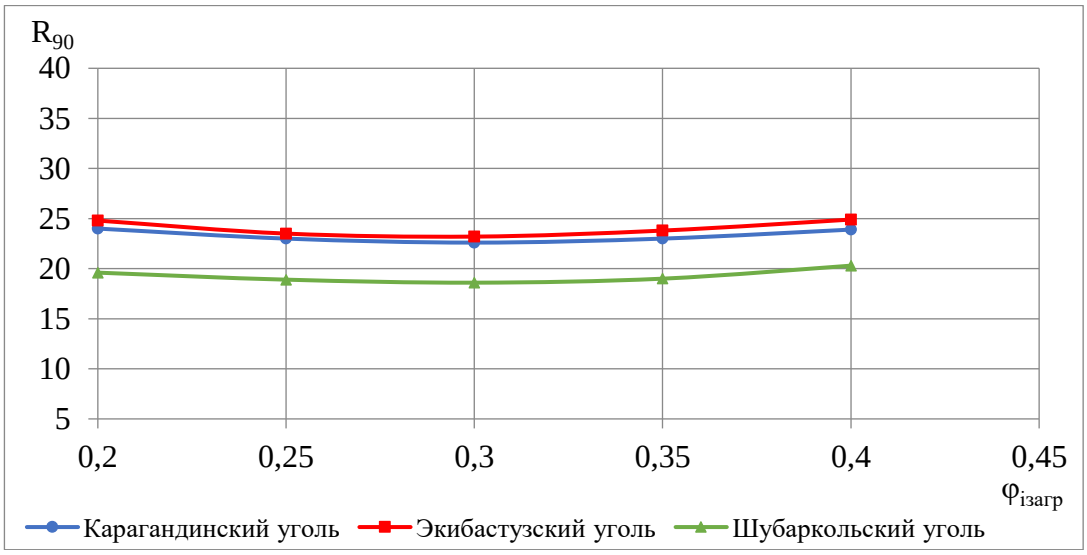


Рисунок 3.25 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{iзагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 20 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ КарИУ с удержателями с прорезями)

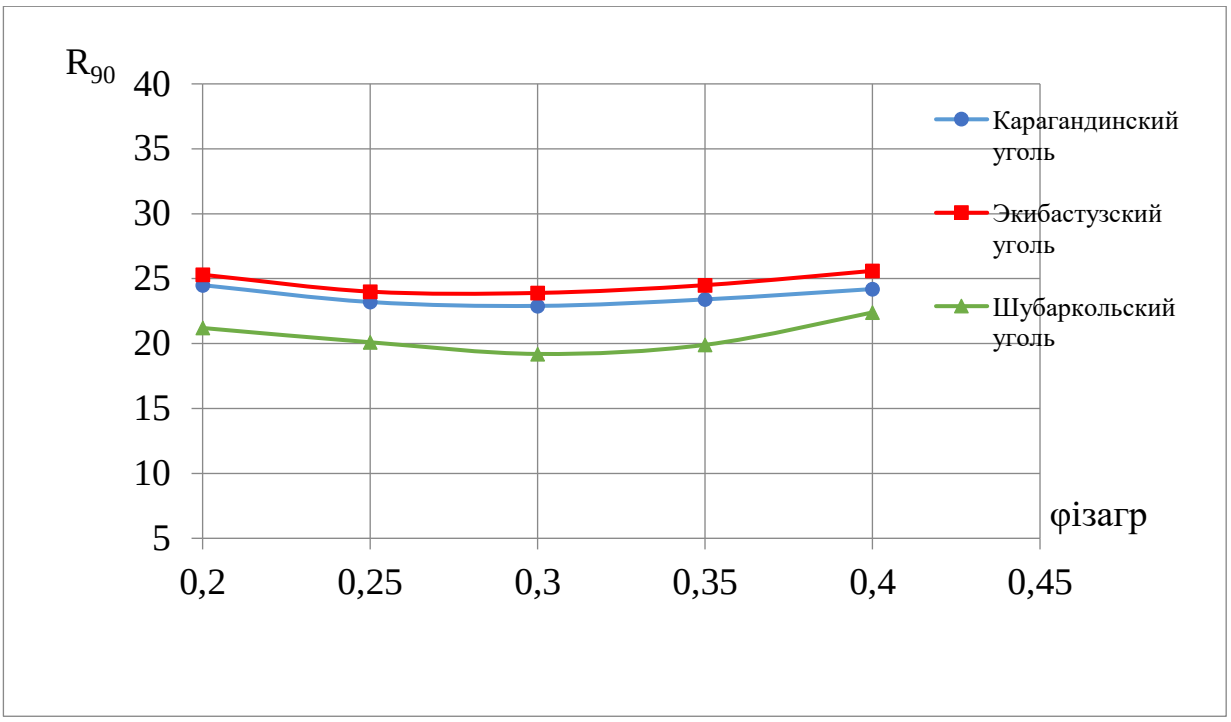


Рисунок 3.26 – Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{изагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 30 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ КарИУ с удержателями с прорезями)

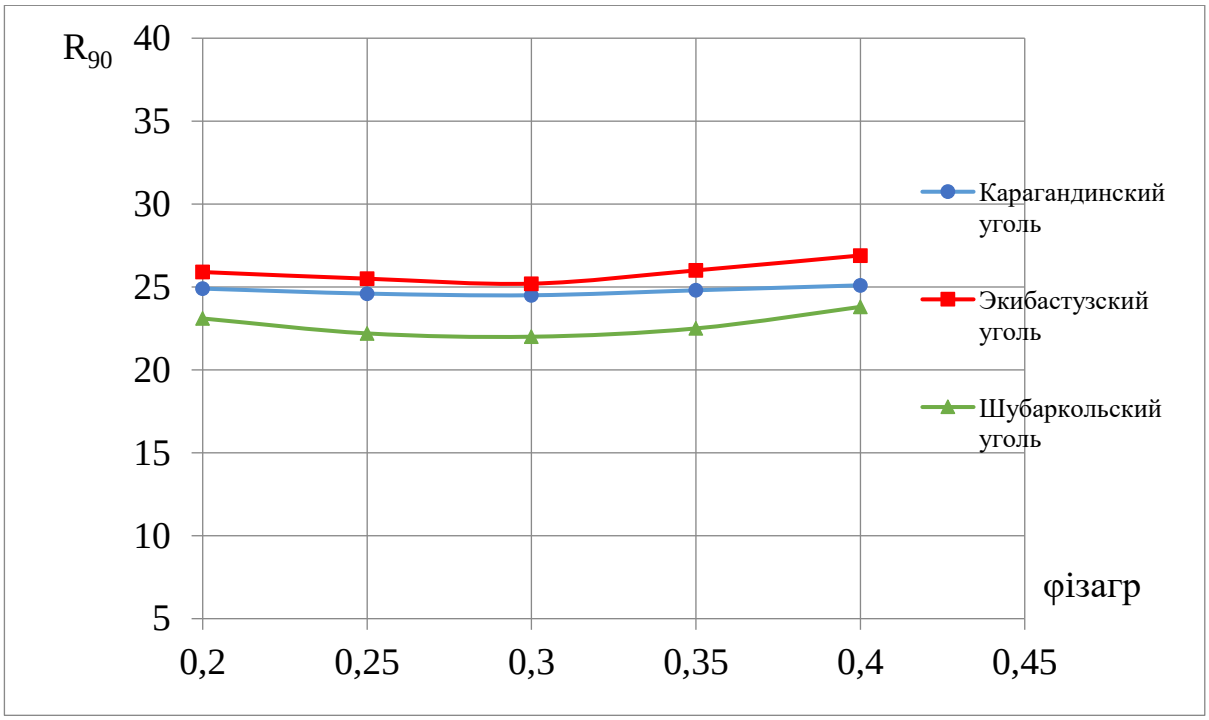


Рисунок 3.27– Зависимость R_{90} от степени загрузки мелющими шарами $\varphi_{изагр}$ на модели ШБМ с фракциями углей 40 мм, диаметр мелющего шара 30 мм (модель ШБМ КарИУ с удержателями с прорезями)

По полученным результатам рассева угольной пыли трех углей на модели ШБМ КарИУ с удержателями с прорезями, можно сделать вывод, что область

оптимальных значении остатка на сите R_{90} получены при φ=0,30, $d_ш$=30 мм и $d_{угля}$=20 мм.

На рисунке 3.28 видно, что в зависимости R_{90} от степени загрузки мелющими шарами при φ= 0,30 получена тонкая пыль при измельчении трех углей фракции 20 мм на модели ШБМ КарИУ с удержателями без прорезей.

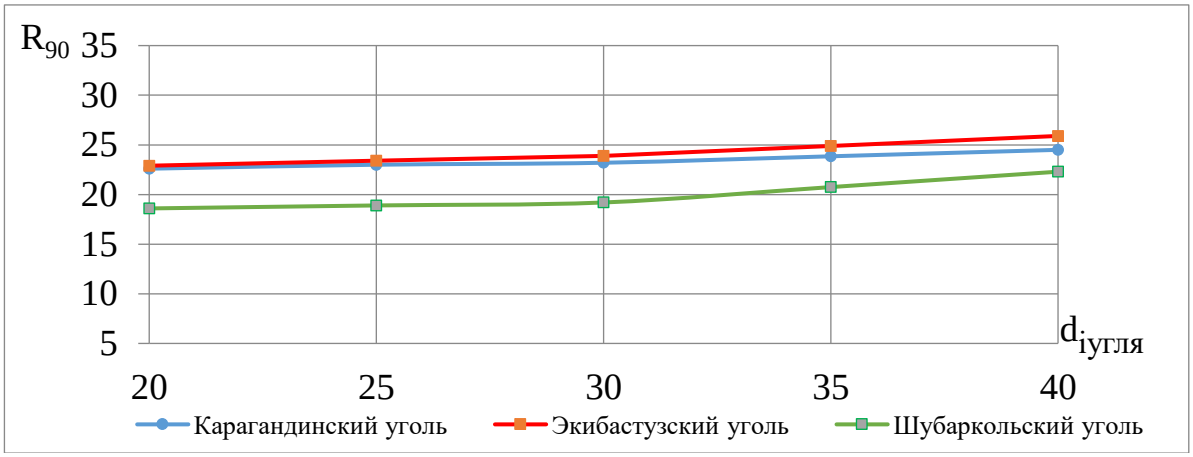
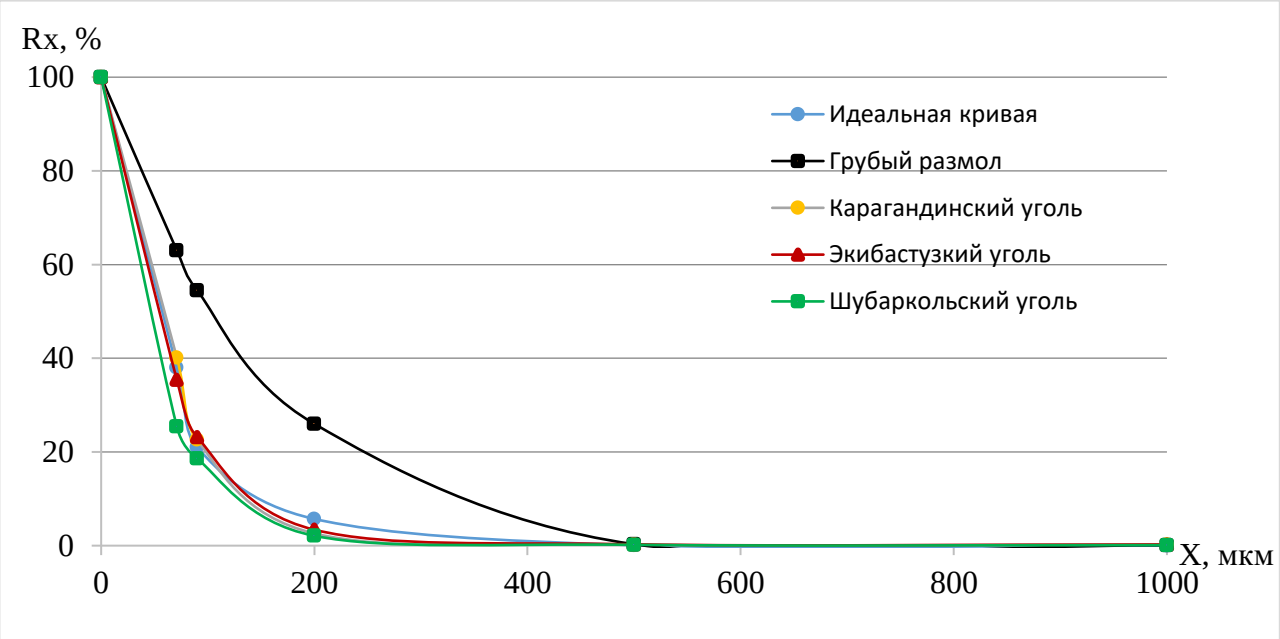
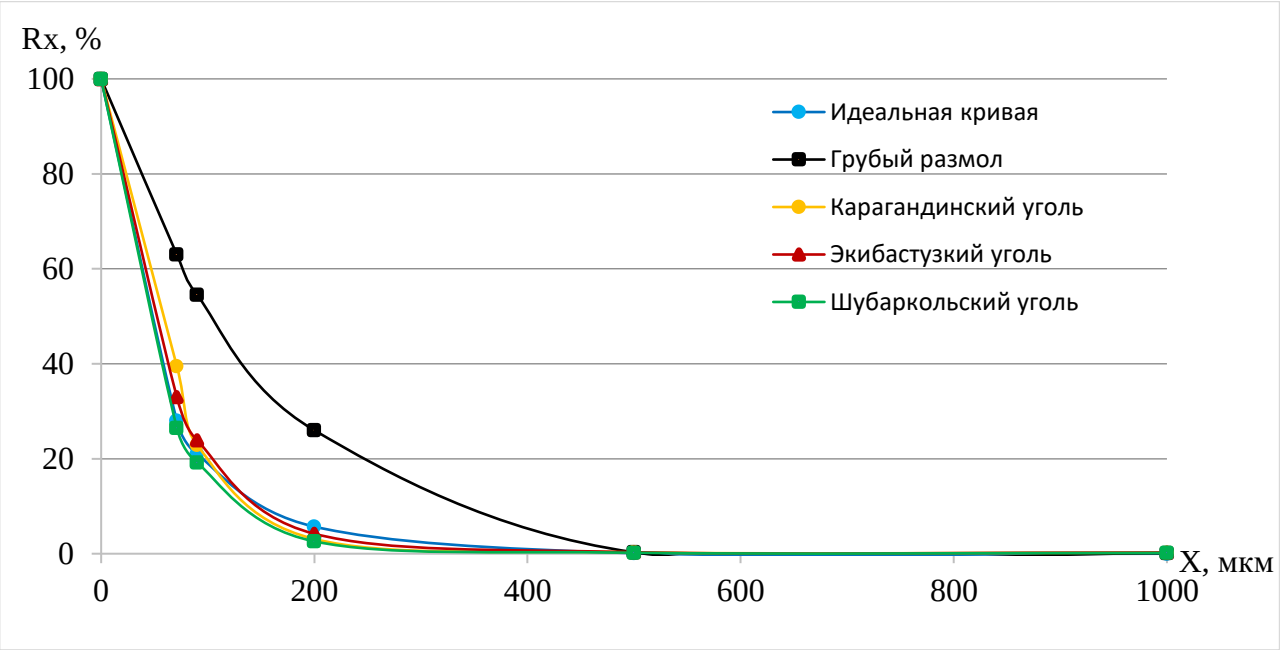


Рисунок 3.28 – Зависимость полного остатка пыли на сите R_{90} от фракции углей $d_{i\ угля}$

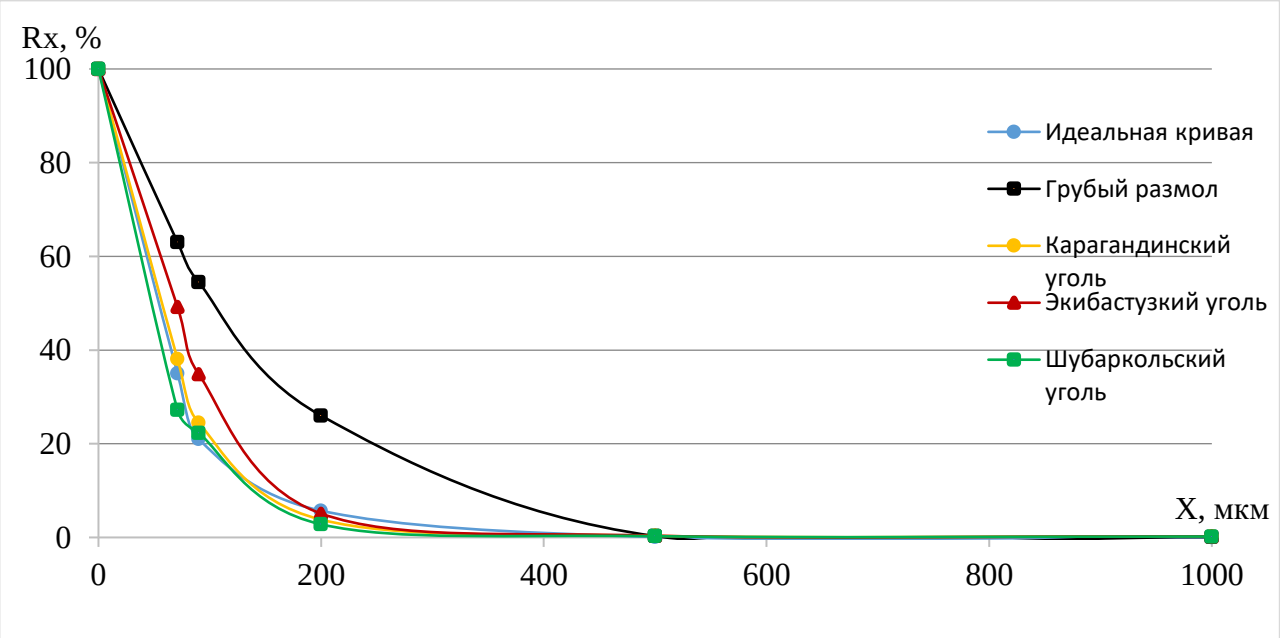
Кривые рассева угольной пыли представлены на рисунке 3.29 (а, б, в) при φ=0,30 и $d_ш$=30 мм, фракция углей $d_{i\ угля}$=20 мм (Карагандинский, Экибастузский, Шубаркольский). На основании полученных значении при $φ_{iзагр}$=30 построены кривые рассева, для сравнительного анализа взяты данные кривых рассева идеальной и грубой угольной пыли [4, 10].



а) кривые рассева угольной пыли фракции 20 мм



б) кривые рассева угольной пыли фракции 30 мм



в) кривые рассева угольной пыли фракции 40 мм

Рисунок 3.29 – Кривые рассева угольной пыли после размола на модели ШБМ КарИУ с удержателями с прорезями при степени заполнения шарами φ=0,30, диаметром 30 мм: а) фракция углей 20 мм, б) фракция углей 30 мм, в) фракция углей 40 см

Представленный график кривых рассева угольной пыли на разных уровнях загрузки мелющими шарами, для трех углей, позволяет оценить эффективность процесса измельчения на моделях ШБМ. Разные модели мельниц имеют свои особенности в работе. На модели ШБМ АУЭС измельчение происходит только истиранием, а на модели ШБМ КарИУ истиранием и ударом мелющими шарами.

Сравнение результатов гранулометрического состава для разных уровней загрузки позволяет оценить эффективность размола в зависимости от производительности мельницы и потребления электроэнергии.

Для ШБМ с удержателями без прорезей соответствует степень шаровой загрузки φ=0,35, а для ШБМ с удержателями с прорезями φ=0,30 при n=64 об/мин. Интервал загрузки мелющими шарами была пересчитана от φ 20 до 45%.

На модели с удержателями с прорезями при размоле разных углей в результате рассева полученные R_{90} показывают что, при фракции углей 20 мм, при загрузке мелющими шарами барабана на уровне φ=0,30 – 0,3 и диаметром шаров 30 мм измельчение оптимальное.

Следует подчеркнуть, что на данной модели ШБМ с удержателями с прорезями процесс измельчения угля производится в основном за счет удара шаров, падающих с определенной высоты, в незначительной степени - истиранием между шарами. Часть угля поднимается вместе шарами, а мелкая часть просыпается через прорезей и истираются в нижней части. Мелюшие шары цепляются на удержателях и падают на уголь ударяя и размалывая. Через прорези мелкая фракция угля просыпается в нижную часть барабана. При таком конструкивном решении происходит процесс измельчения как истриранем, так и ударом. В результате такого режима работы получили оптимальную R_{90} при степени загрузки мелющими шарами на уровне φ =0,30. По результатам ситового анализа содержание фракции 0 до 25 мкм свидетельствует, что модель ШБМ с удержателями с прорезями являются эффективным для измельчения разных топлив, если фракции углей в среднем будет составлять 20 мм.

3.6.4 Определение размольной производительности и удельного расхода энергии

Размольная производительность мельниц определяется энергетическими параметрами процесса [17]. При расчете производительности ШБМ для выбора шаровой загрузки необходимо ориентироваться на степень заполнения барабана шарами в зависимости от относительной скорости его вращения $n_б/n_{кр}$, критическая скорость вращения барабана [17] представлена в формуле 3.3 [68].

Производительность модели невентилируемой ШБМ определим по формуле [21]:

$$B_м = 6{,}45 \cdot V \cdot \sqrt{D} \cdot (G/V)^{0,8} \cdot q_у \cdot K_п \qquad (3.22)$$

где $B_м$ - производительность мельницы, кг/ч;

$q_у$ – удельная производительность, кг/кВт. ч мощности, при сухом 0,03–0,4;

$K_п$ - поправочный коэффициент на тонкость помола, значение k от 0,5 до 1,5), принимаем k=0,8;

D - внутренний диаметр, мельницы, м;

G – масса мелющих шаров, кг;

V - внутренний объем барабана, м^3 [21].

Мощности электродвигателя мельницы определяем по формуле [21]:

$$N_{дв} = 1{,}07 \cdot GR/\eta \tag{3.23}$$

где η - КПД привода мельницы, равный 0,9–0,94 [61].

Потребления электроэнергии ШБМ зависит от режима работы мельницы, рекомендуется учитывать и другие факторы, чтобы получить более полное представление об её производительности и пригодности для конкретных задач:

$$Э_м = \frac{N_{дв}}{B}, \quad (кВт{\cdot}ч)/кг \tag{3.24}$$

По полученным результатам проведенных опытов по размолу Карагандинского, Экибастузского и Шубаркольского углей определены производительность и расход электроэнергии ШБМ (невентилируемой) в зависимости от числа оборотов мельницы. На рисунках 3.30, 3.31, представлены результаты расчета производительности и расхода электроэнергии **модели ШБМ созданная на базе АУЭС** в зависимости остатка на сите (R_{90}) для трех углей при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ=0,30, диаметром шара 30 мм.

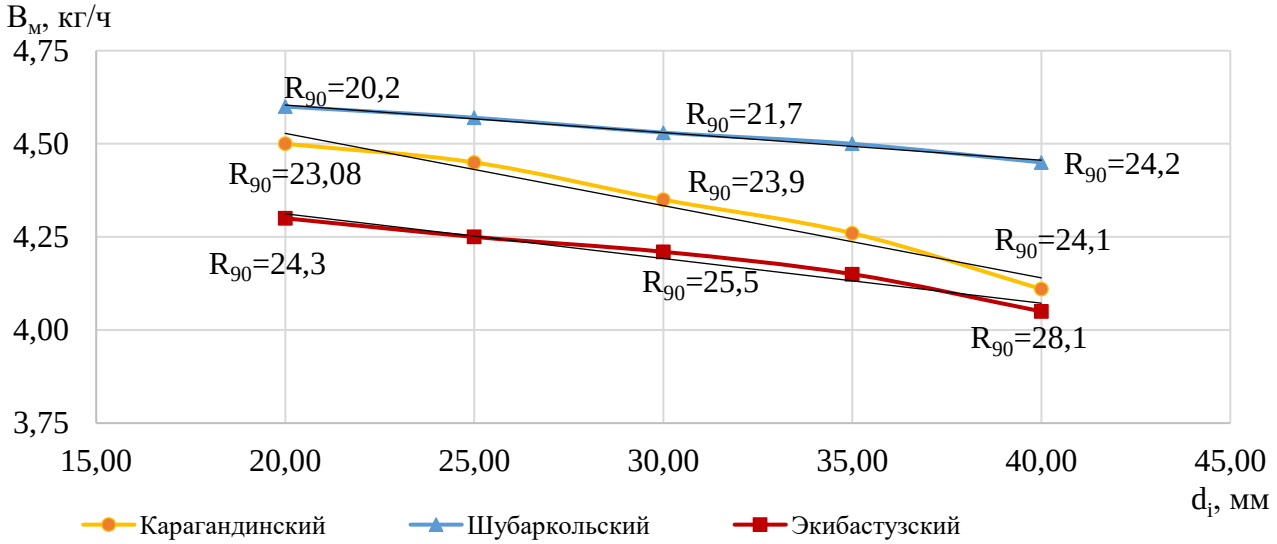


Рисунок 3.30 – Производительность модели ШБМ в зависимости R_{90} трех углей при различных фракциях угля 20, 30, 40 мм при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ=0,30

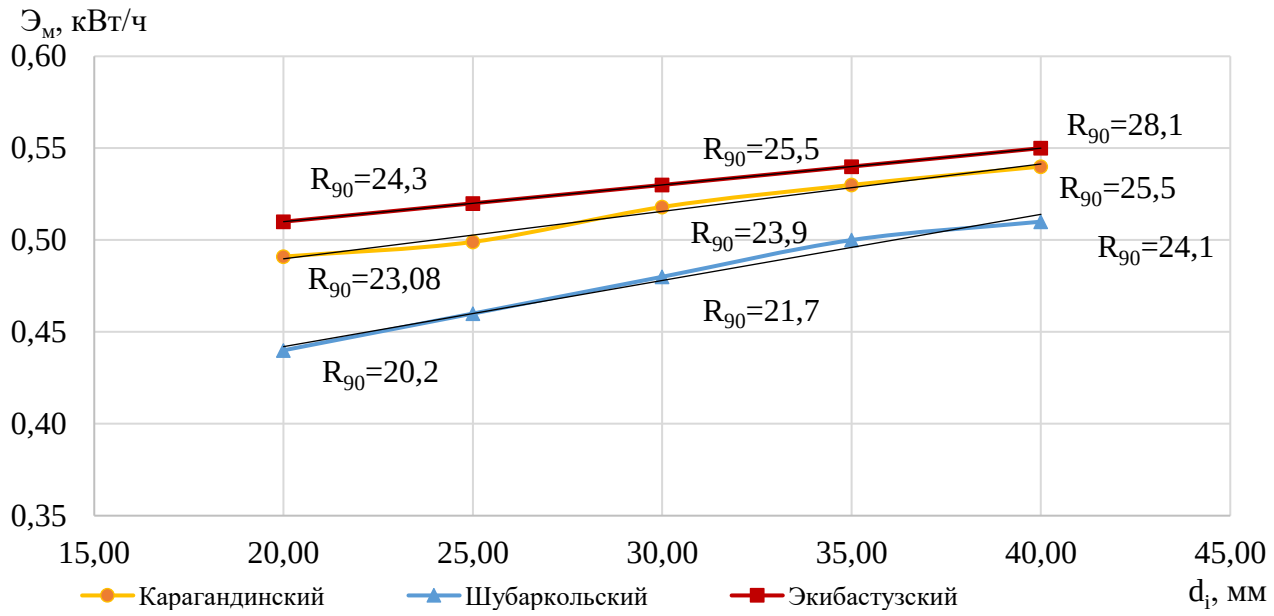


Рисунок 3.31 – Расход электроэнергии модели ШБМ в зависимости R_{90} трех углей при различных фракциях угля 20, 30, 40 мм при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ=0,30

На рисунке 3.32 и 3.33, представлены результаты расчета производительности и расхода электроэнергии **модели ШБМ созданная на базе КарИУ с удержателями без прорезей** в зависимости остатка на сите (R_{90}) для трех углей при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ =0,30.

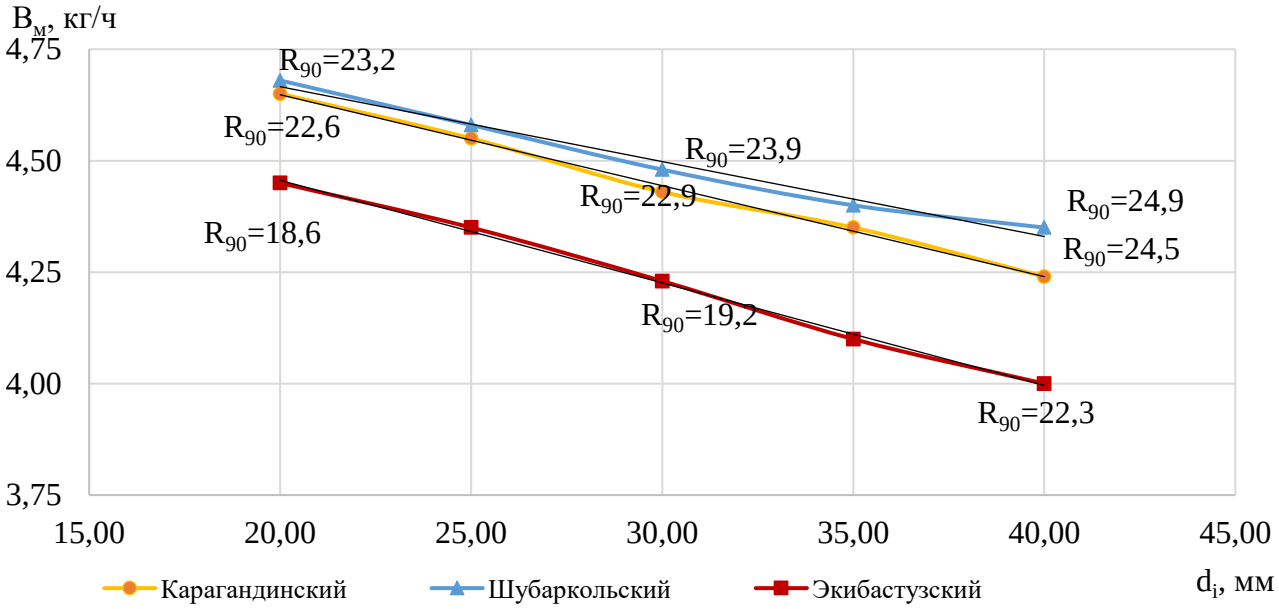


Рисунок 3.32 – Производительность модели ШБМ в зависимости от остатка на сите [19] R_{90} трех углей при различных фракциях угля 20, 30, 40 мм при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ=0,30

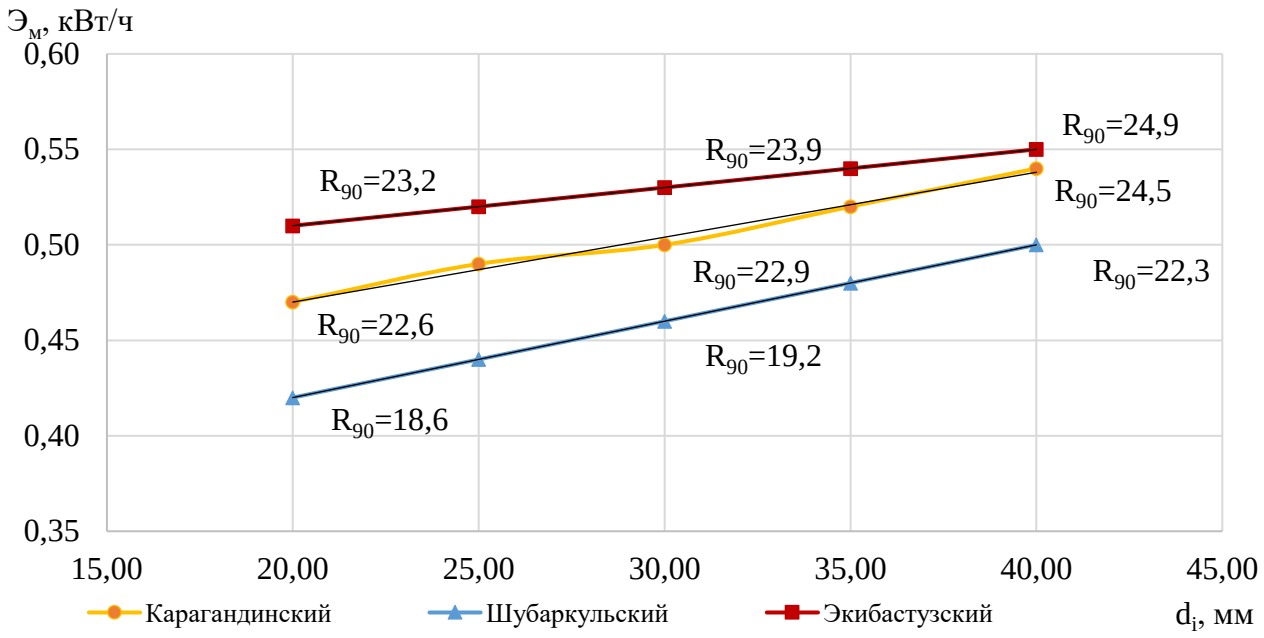


Рисунок 3.33 – Расход электроэнергии модели ШБМ в зависимости от остатка на сите R_{90} трех углей при различных фракциях угля 20, 30, 40 мм при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ =0,30

На рисунке 3.34 и 3.35, представлены результаты расчета производительности и расхода электроэнергии **модели ШБМ созданная на базе КарИУ с удержателями с прорезями** в зависимости остатка на сите (R_{90}) для трех углей при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ =0,30.

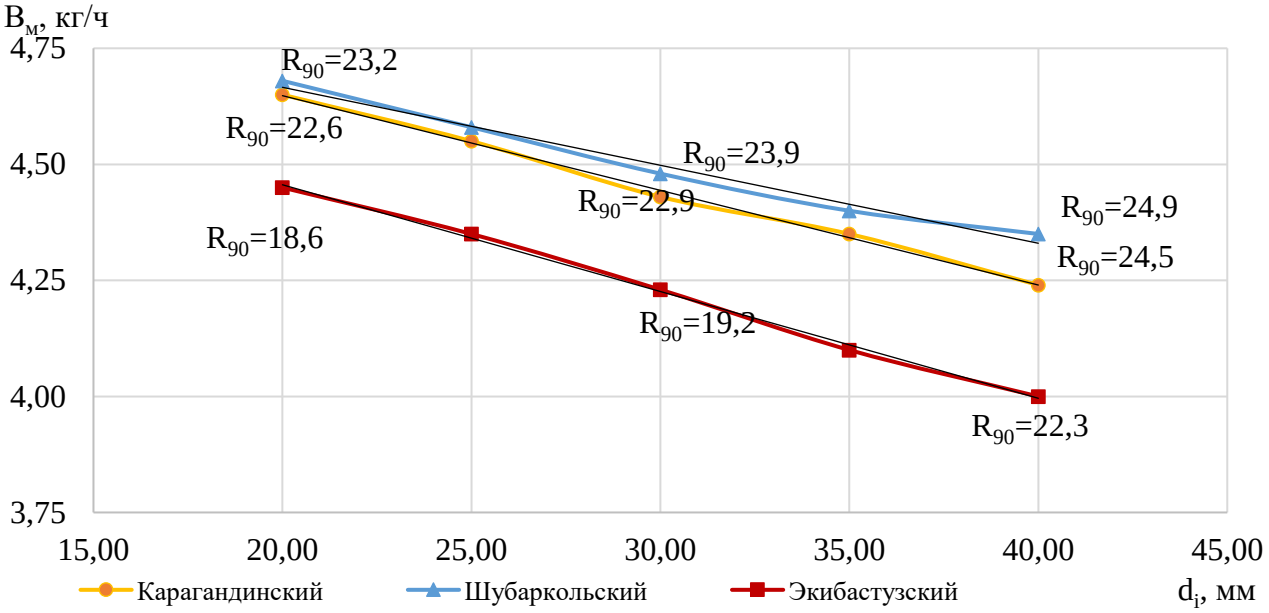


Рисунок 3.34 – Производительность модели ШБМ в зависимости от остатка на сите [19] R_{90} трех углей при различных фракциях угля 20, 30, 40 мм при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ=0,30

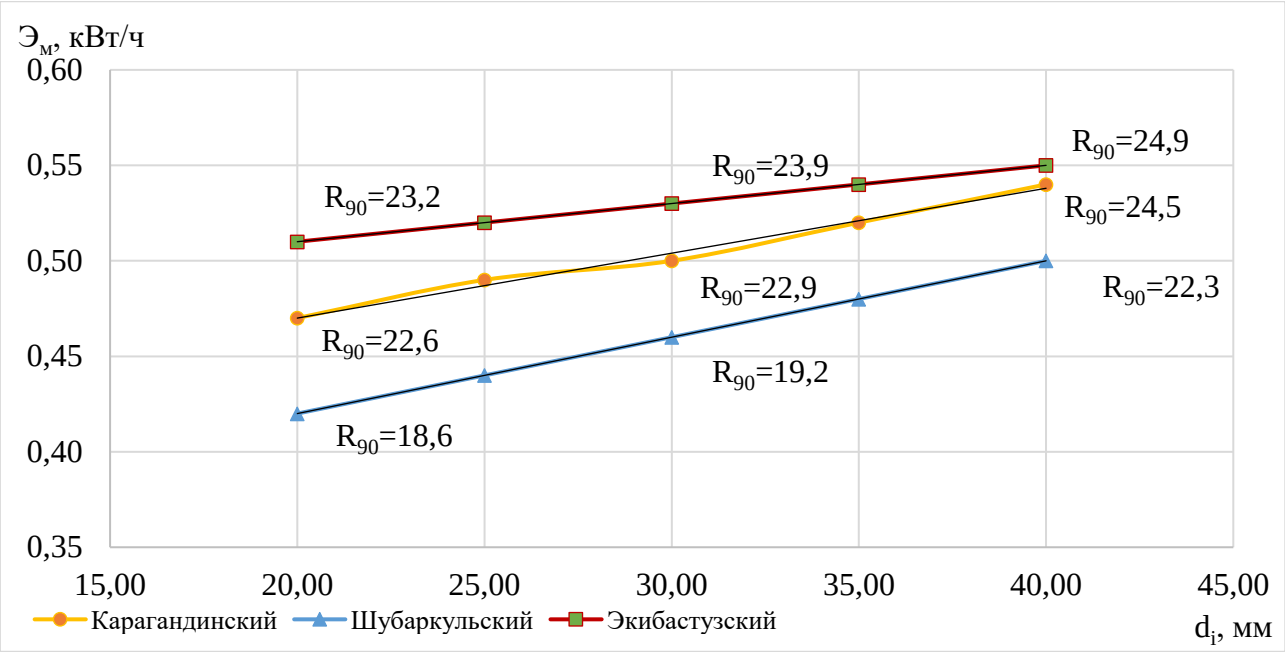


Рисунок 3.35 – Расход электроэнергии модели ШБМ в зависимости от остатка на сите R_{90} трех углей при различных фракциях угля 20, 30, 40 мм при коэффициенте заполнения мелющими шарами φ =0,30

По результатам расчета построены графики зависимости от фракции углей, загружаемых в мельницу и потребления электроэнергии, и производительности ШБМ. Высокая производительность и меньший расход энергии получили на модели ШБМ КарИУ при загрузке мелющими шарами φ=0,30 и $d_ш$=30 мм, фракции угля 20 мм. На основании результатов эксперимента, предлагаются рекомендации по выбору типа угля при заданных режимах работы мельницы для достижения оптимальных результатов измельчения.

3.7 Моделирование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице EDEM

Для определения влияния значений характеристик мелющих шаров с помощью компьютерного моделирования использовалась модель шаровой барабанной мельницы с программным обеспечением «EDEM». С помощью Altair EDEM можно моделировать различные перемещения сыпучих материалов, симулировать работы мельниц и дробильных установок, моделировать столкновения материалов с оборудованием, что помогает улучшить конструкцию и долговечность оборудования [18, 86]. На рисунке 3.36 представлено графическое изображение движение мелющих тел в камере мельницы, длина барабана равна L=0,40 м, диаметр составляет D=0,25 мм, объем равен V=0,019 м^3.

Создание модели шаровой барабанной мельницы должна связывать следующие параметры размеры барабана (отношение L/D), шаровая загрузка

барабана, скорость вращения барабана, время размола топлива, свойства угля и коэффициент полезного действия процесса [60].

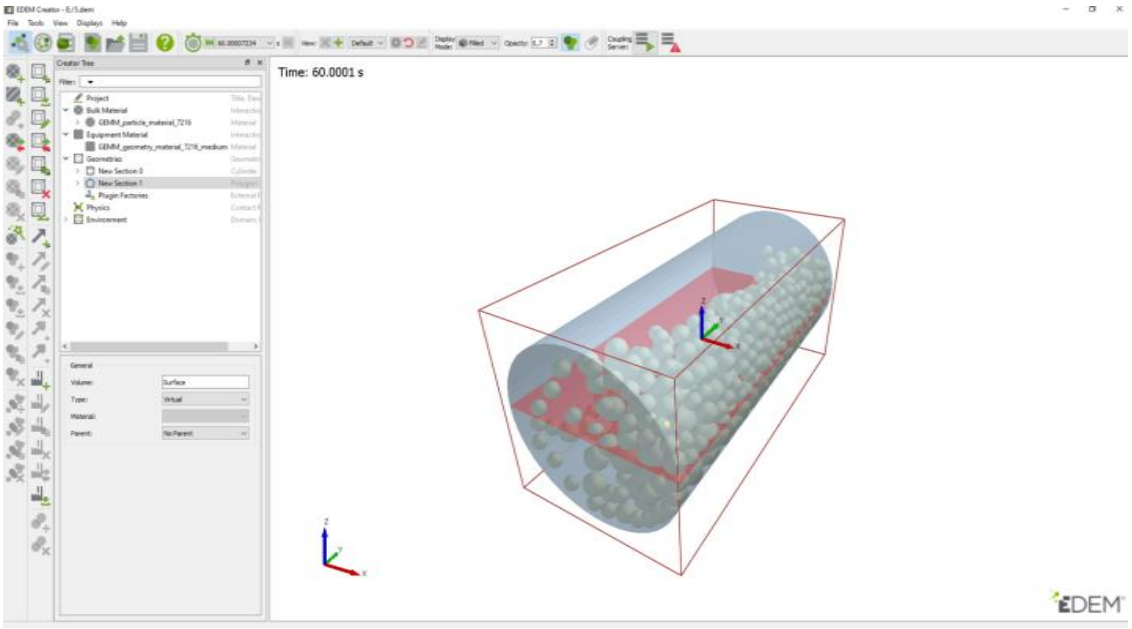


Рисунок 3.36 - Графическое изображение движение мелющих тел в камере мельницы в программном обеспечении EDEM

В нормативах по проектированию шаровых барабанных мельниц [4], указана степень заполнения пространства барабана с измельчаемым углем на уровне 0,40 - 0,45. Очевидно, что при этом образуется излишняя толщина слоя, которая, для частиц, располагаемых в нижней части слоя угля, служит своего рода демпфером от удара мелющих шаров, что несколько снижает интенсивность размола угля. Однако постояное поднимание части угля вместе с мелющими шарами производит некоторое перемешивание измельчаемого слоя. Степень заполнения мелющими шарами пространства барабана показана на рисунке 3.36, из которого видно, что возможен некоторый оптимум по этому показателю, который может быть определен прямыми экспериментами на модели. Можно предполагать, что при оптимальной степени заполнения объема барабана мелющим шарами и измельчаемым углем затраты энергии на размол угля могут заметно уменьшится при практическом сохранении производительности мельницы.

На рисунке 3.37 представлена иллюстрация движения шаров в барабане созданная в программой EDEM при степени заполнения барабана мелющими шарами φ =0,30 и углем 0,20%. Критическое и рабочее число оборотов для модели ШБМ составляют: $n_{кр}$=85 об/мин; рабочее число оборотов $n_р$=64 об/мин.

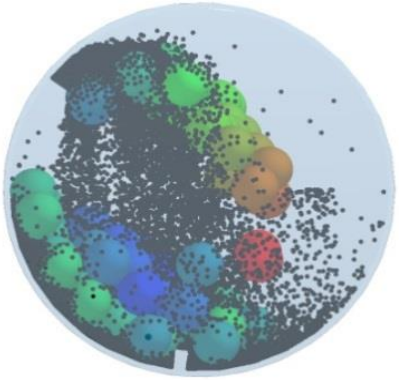
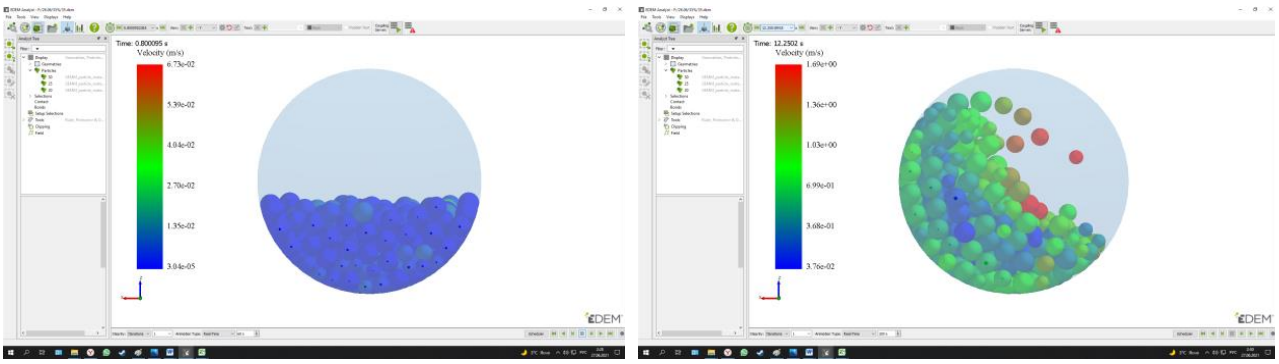


Рисунок 3.37 - Влияние степени заполнения пространства барабана на уровне φ =0,30, углем и загрузка мелющими шарами 30 мм

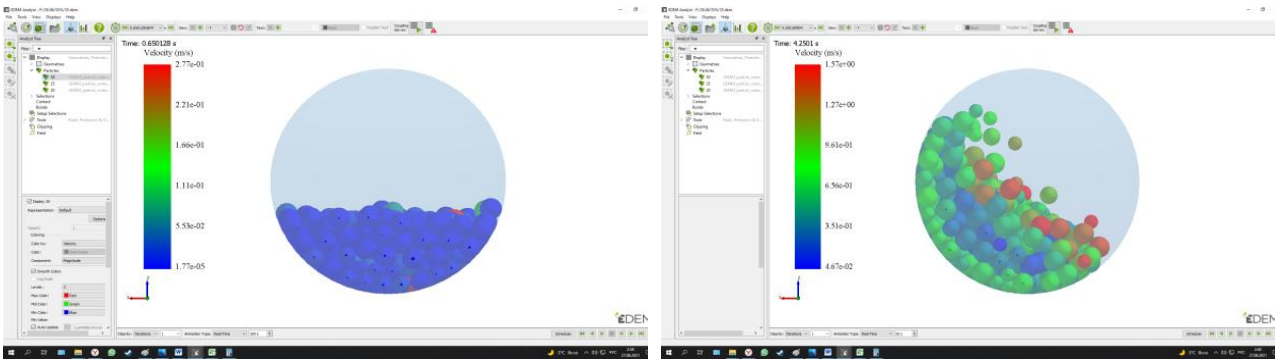
Моделирования позволяет исследовать движение загрузки в мельницах разных конструкций камеры, при любых значениях степени заполнения барабана, частоты его вращения и при любом составе мелющих тел. Это дает возможность при испытаниях эксплуатируемых машин заменить значительную часть трудоемких технологических исследований вычислительными экспериментами.

В связи с затруднением фиксирования движения мелющих шаров внутри реальной мельницы во время работы, в программе EDEM произведены снимки серии загрузки мелющими шарами ШБМ и определено перемещение мелющих шаров внутри барабана. Наглядно представлены стоп-кадры моделирования в EDEM при различных степени шаровой загрузки φ =0,45; 0,40; 0,35; 0,30; 0,25; 0,20, где мелющие шары окрашены по их кинетической скорости. Это позволяет моделировать движение частиц, включая шары, и определить их траектории и скорости в зависимости от различных параметров, таких как высота падения и шаг футеровки.

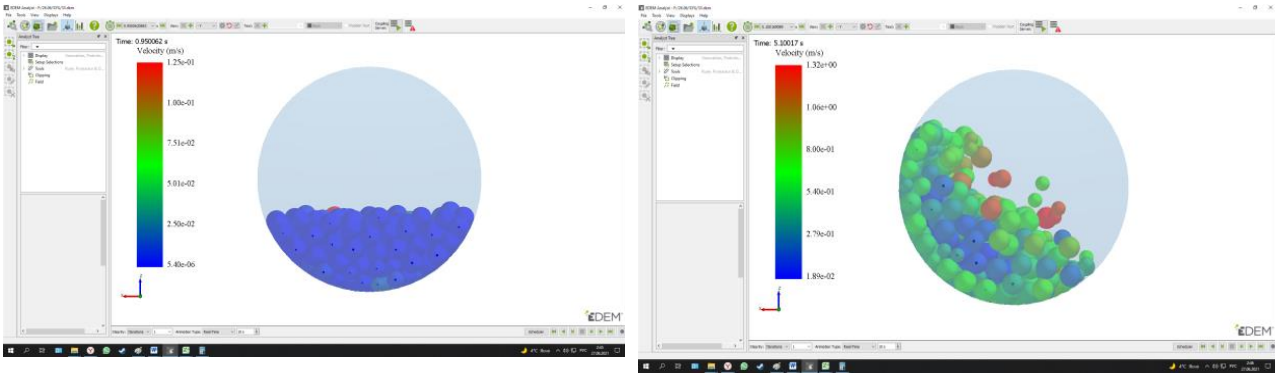
На рисунке 3.38, показаны схемы движения мелющих шаров на модели ШБМ АУЭС в программе EDEM при полученных степенях загрузки мелющими шарами φ 0,45; 0,40; 035; 0,30; 0,25; 0,2.



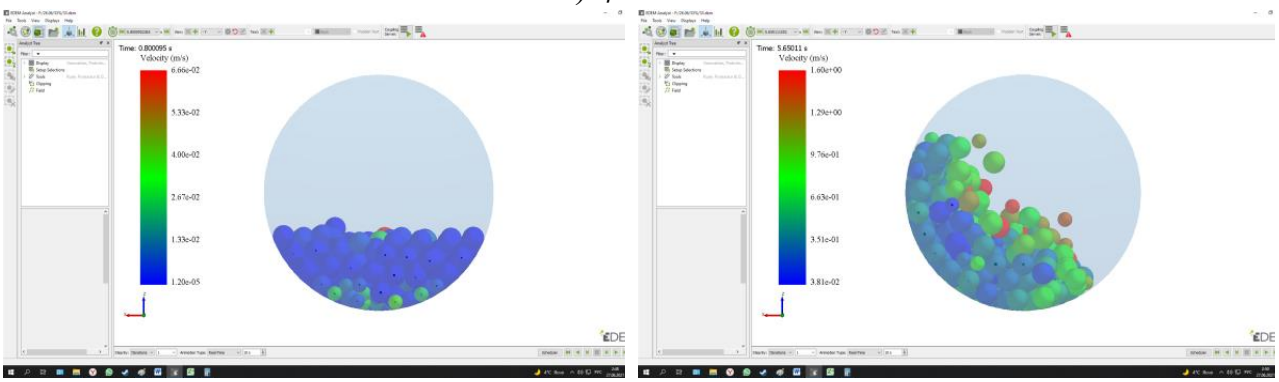
а) φ = 0,45



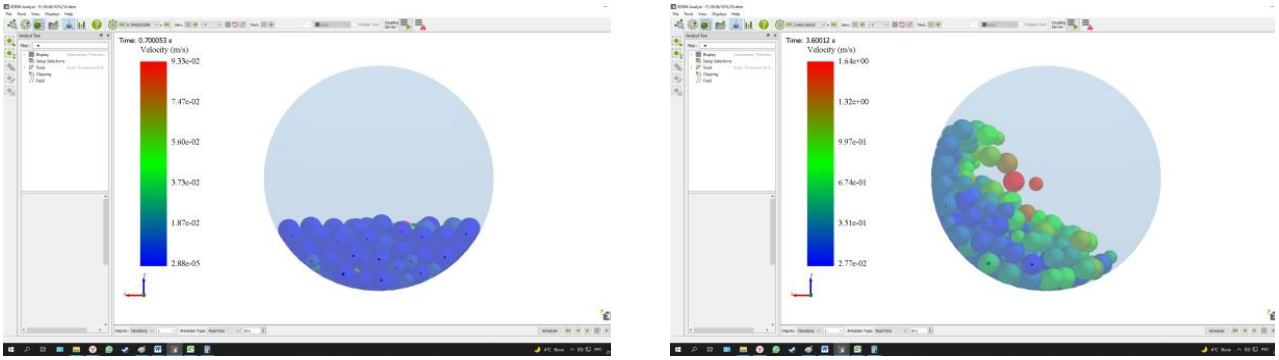
б) φ = 0,40



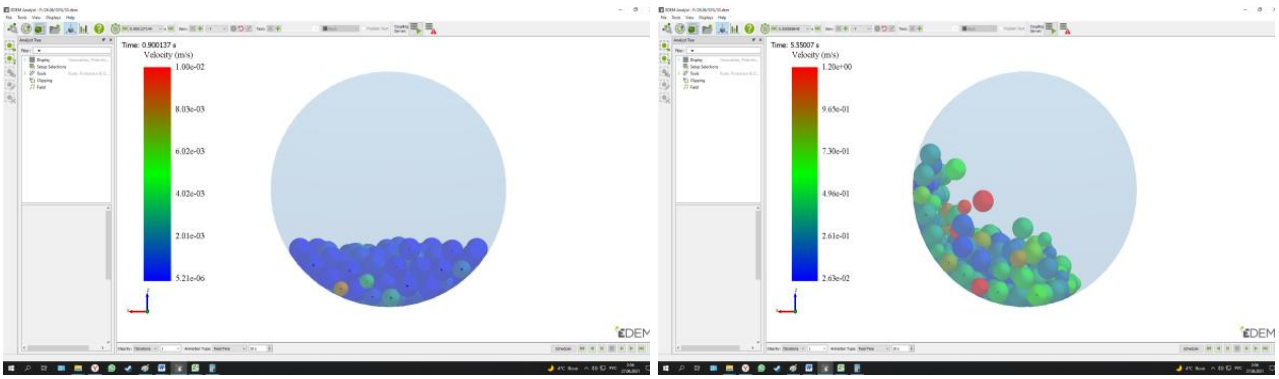
в) φ=035



г) φ=0,30



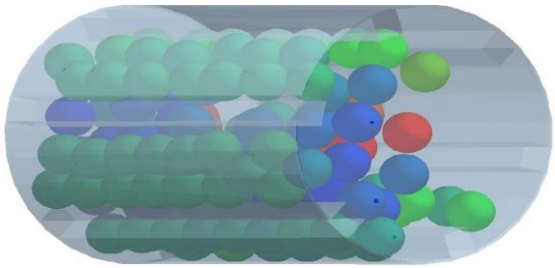
д) φ=0,25



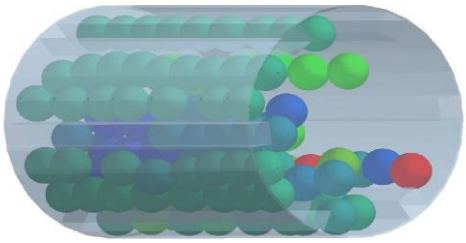
е) φ=0,20

Рисунок 3.38 - Схемы движения мелющих шаров в модели ШБМ НАО АУЭС при коэффициентах заполнения мелющими шарами а) φ=0,45; б) φ=0,40; в) φ=035; г) φ=0,30; д) φ=0,25;е) φ=0,2

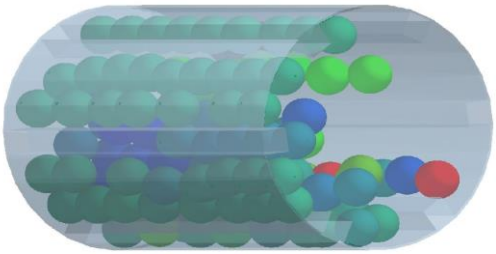
На рисунке 3.39 наглядно представлены стоп-кадры модели ШБМ КарИУ, при различных значениях степени загрузки мельницы мелющими шарами φ =0,45; 0,40; 035; 0,30; 0,25; 0,2 и частоты вращения барабана n=64 об/мин. Программа дает также возможность вывода результатов в наглядном «потоковом» виде.



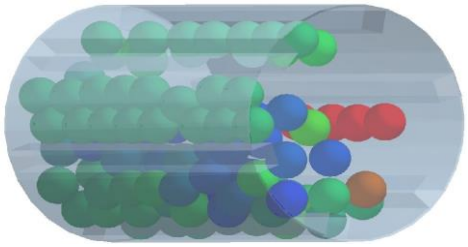
а) Стоп-кадр при φ=0,45



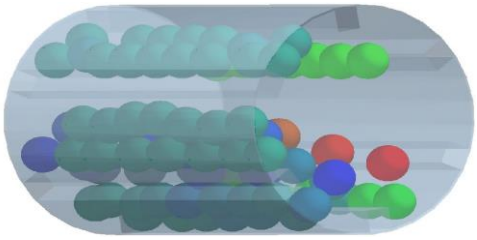
б) Стоп-кадр при φ=0,40

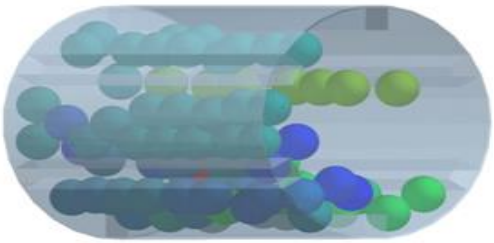


в) Стоп-кадр при φ=0,35



г) Стоп-кадр при φ=0,3





г) Стоп-кадр, при φ =0,25 д) Стоп-кадр, при φ =0,20

Рисунок 3.39 - Схемы движения мелющих шаров в модели ШБМ НАО КарИУ при коэффициентах заполнения мелющими шарами а) φ=0,45; б) φ=0,40; в) φ =035; г) φ=0,30; д) φ=0,25;е) φ=0,2

а) На стоп-кадре при степени шаровой загрузки φ=0,45 синие и зеленые мелющие шары при вращении ШБМ удерживаются на удержателях с прорезями и начинают перемешаться вверх до определенной высоты. Скорость их перемещения одинаковая, достигая определенную высоту падают вниз ударяясь с друг другом, тем самым уменьшая кинетическую энергию удара шара.

б) На стоп-кадре при степени шаровой загрузки φ=0,40 синие мелющие шары при вращении ШБМ начинают перемешаться удерживаясь на удержателях с прорезями и набирают высоту, скорость их перемещения выше, чем у зеленных. Зеленые мелющие шары имеют низкую скорость и участвуют в процессе как на измельчение и истирание, красные имеют высокую скорость.

в) На стоп-кадре при степени шаровой загрузки φ=0,35 синие и зеленые мелющие шары при вращении ШБМ удерживаются на удержателях с прорезями до определенной высоты. Скорость перемещения шаров практически одинаковая. Соударение их с друг другом незначительна. Измельчение происходит как истиранием, так и ударом.

г) На стоп-кадре при степени шаровой загрузки φ=0,30 синие и зеленные мелющие шары при вращении ШБМ удерживаются на удержателях с прорезями до определенной высоты, скорость их падения выше чем φ=0,35. Практический отсутствуют соударение шаров друг с другом и не теряется их кинетическая энергия удара.

д) На стоп-кадре при степени шаровой загрузки φ=0,25 синие мелющие шары при вращении ШБМ удерживаются на удержателях с прорезями до определенной высоты, скорость их перемещения ниже, чем при φ=0,30.

е) На стоп-кадре при степени шаровой загрузки φ=0,20 синие и зеленые мелющие шары при вращении ШБМ удерживаются на удержателях с прорезями до определенной высоты, скорость их перемещения практический одинаковая. Отсутствуют практически шары имеющие низкую скорость. Из-за низкой степени загрузки шарами производитьность ШБМ будет снижена.

3.8 Оценка погрешностей измерения

На размол твердого топлива может влиять различные факторы, такие как параметры мельницы, состав топлива, время размола и другие переменные. Вариации в этих факторах могут привести к погрешностям в результатах измерений. Повторение измерений может помочь оценить степень повторяемости результатов. Также рекомендуется использовать статистический анализ для оценки погрешностей и определения доверительных интервалов [115].

В наших экспериментах к прямым измерениям в процессе размола угля в шаровой барабанной мельнице относятся: прямое измерение температуры внутри мельницы позволяет контролировать и оптимизировать процесс размола угля. Температура может быть измерена с помощью термометров или термопар; измерение уровня мелющих шаров и угля; измерение скорости вращения барабана мельницы позволяет контролировать энергию, передаваемую материалу для размола.

К косвенным измерениям относиться: измерение потребляемой электроэнергии; анализ фракционного состава размолотого угля; измерение плотности, сыпучести или влажности угля.

По результатам каждого зависимого параметра определено среднее арифметическое из n измерений.

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i}, 1 \tag{3.25}$$

Среднеквадратичное откланение результатов измерения от среднего арифметрического будет равен:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\tilde{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} 1 \tag{3.26}$$

Доверительный интервал содержит истинное значение параметра с определением уровня доверия. При многократных измерениях доверительный интервал может быть использован для оценки диапазона, в котором с определенной вероятностью находится истинное среднее значение измеряемой величины. Для построения доверительного интервала для среднего значения используют стандартное отклонение и количество измерений.

$$\Delta\widetilde{x_{сл}} = t_{an}.\tilde{\sigma} \tag{3.27}$$

Доверительный интервал для однократного измерения:

$$\Delta\widetilde{x_{ои}} = a \cdot d \tag{3.28}$$

Формула, которая описывает общую погрешность (σ) серии измерений (при использовании равномерного распределения и параметра d) может быть выражена следующим образом:

$$\widetilde{x} = \sqrt{\widetilde{\Delta x_{сл}^2} + \widetilde{\Delta x_{ои}^2}} \quad (3.29)$$

Определение значения искомого параметра с помощью средних измеряемых величин происходит посредством вычисления среднего арифметического всех измеренных значений. Этот метод особенно полезен при многократных измерениях, так как позволяет уменьшить влияние случайных ошибок и повысить точность результата. $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3 \dots, \widetilde{x_m}$,

$$\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3 \dots, \widetilde{x_m}), \quad (3.30)$$

Квадратичное суммирование предельных погрешностей позволяет учесть эту взаимосвязь и получить более реалистичную оценку общей погрешности измерений и абсолютное значение погрешности можно определить из выражения:

$$\widetilde{\Delta y} = \sum_{i-1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{x}_i}\right)^2 \cdot \widetilde{\Delta x^2}, \quad (3.31)$$

Основным условием получения правильных результатов определения количества процесса измельчения твердого топлива является правильное и точное измерение начального и конечного размеров частиц топлива .В процессе измельчения твердого топлива, тонкостьугольной пыли может изменяться. Это важный параметр, так как он влияет на эффективность горения, химический режим и другие аспекты процесса.

Результаты, полученные в результате модельных и физических экспериментов, качественно и количественно согласуются между собой, относительная погрешность в определении тонины помола и расхода электроэнергии в пределах 2 и 3% с доверительной вероятностью 0,95.

3.9 Выводы по разделу

В данном разделе рассмотрена особенность моделирования шаровых барабанных мельниц. Модели шаровой барабанной мельницы должна точно воспроизводить геометрическую форму и сохранять близким соотношение геометрических параметров (L/D) барабана. Для модели ШБМ был принят неветилируемыйвариант с сохранением геометрического подобия барабана с сохранением или с изменением размера измельчающих шаров. Для исследования процесса измельчения с разными механизмами измельчения угля неветилируемой шаровой барабанной мельницы созданы модели на базе НАО «Алматинский университет энерегтики и связи» им. Г.Даукеева (измельчение

угля производится только истиранием) и на НАО «Карагандинский индустриалный университет» г.Темиртау (практически полностью воспроизводится процесс измельчения угля – ударами шаров и истиранием между шарами). На этой модели ШБМ можно проводить сравнительные исследования влияния различных факторов на процесс измельчения ударами шаров и истиранием между шарами с большой достоверностью результатов.

Производительность мельницы увеличиться, если увеличить скорость вращения барабана ближе к критическому при небольшой загрузке шарами φ =0,2, диаметром мелющих шаров 30 и 40 мм. Мощность ШБМ будет увеличиваться до определенного предела и после резко снизиться при заполнении барабана мелющими шарами φ=0,2.

Для проведения исследования процесса размола угля на модели шаровой барабанной определены параметры, определяющие эффективность работы новой конструкции ШБМ.

На основании этих исследований можно оценить уровень влияния многих конструктивных и режимных показателей на интенсивносить измельчения угля.

Использование современных программных продуктов для моделирования процесса измельчения позволит предсказать изменение параметров работы и внести коррективы в режиме реального времени. Для определения влияния значений характеристик мелющих шаров с помощью компьютерного моделирования использовалась математическая модель шаровой барабанной мельницы с программным обеспечением «EDEM». Для получения оптимальной загрузки для неветилируемой ШБМ проведены серии экспериментов и варьировании степени загрузки мелющими шарами различных диаметров. Выбор диаметра и количества шаров является важным фактором.

4 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО УГЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗМОЛА

4.1 Выбор параметров оптимизации процесса измельчения на модели ШБМ

Результаты активного эксперимента на невентилируемой ШБМ и численного моделирования позволяют получить уравнения регрессии, устанавливающие рациональные значения основных факторов эксперимента: степени загрузки мелющими шарами и топливом, относительной частоты вращения барабана мельницы, средне взвешенного диаметра шаров и относительности скорости воздуха в мельнице от энергетических показателей процесса измельчения. Рационализация значений основных факторов дает возможность выбора из всевозможных значений этих факторов тех значений при которых процесс помола будет происходить очень эффективно.

В качестве энергетических показателей процесса измельчения выбираются производительность мельницы - Q, кг/ч; потребляемая мощность на привод мельницы - P, кВт и удельная поверхность угольной пыли - $S_{вых}$, см^2/г).

Закономерности изменения этих показателей исследованы совместно на основе выполнения следующего условия: $Q \to max, P \to min, S_{вых} \to max$.

Поиск экстремальных значений указанных показателей ведется методом покординатной оптимизаций. Для решения задачи уравнения регрессии представляются в виде зависимости целевых функции $Q = f(\varphi, \psi, d_{с.в}, v_в)$;

$P = f(\varphi, \psi, d_{с.в}, v_в)$; $S_{вых} = f(\varphi, \psi, d_{с.в}, v_в)$ от четырех переменных φ- относительной частоты вращения барабана мельницы; ψ - относительной частоты вращения барабана мельницы; $d_{с.в.}$- средневзвешенного диаметра шаров;

$\upsilon_в$.- относительности скорости воздуха в мельнице. Эти переменные далее выступают в роли основных факторов: x_1- степень загрузки мелющими шарами и топливом; x_2- относительная частота вращения барабана мельницы; x_3 - средневзвешенный диаметр шаров и x_4- относительная скорость воздуха, путем варьирования которых устанавливаются зоны варьирования этих факторов. В зоне варирьования каждого фактора рассчитываются экстремумы целевых функций.

На основе теории полнофакторного эксперимента (ПФЭ) [ссылка] составляется матрица экспериментальных данных с числом опытов $N = 2^к$, где к - число факторов, каждый фактор варьируется на двух уровнях. Матрица планирования в кодированном виде представлена в табл. 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты экспериментальных исследований

№ п.п.	Матрица плана						
	x_1 (φ, доли.ед.)	x_2 (ψ, доли.ед.)	x_3 ($d_{с.в.}$, доли.ед)	x_4 ($\upsilon_{в.}$, доли.ед)	Q, кг/ч	N, Вт	$S_{уд}$, $м^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+1	+1	+1	+1	65,9	1236	2384
2	-1	+1	+1	+1	63,1	11821 232	2434
3	+1	-1	+1	+1	68,2	1142	2362
4	+1	-1	+1	+1	64,4	1190	2290
5	+1	+1	-1	+1	66,8	1195	2310
6	-1	+1	-1	+1	67,2	1200	2252
7	+1	-1	-1	+1	71,2	1115	2282
7	+1	-1	-1	+1	71,2	1115	2282
8	-1	-1	-1	+1	63,4	1205	2304
9	+1	+1	+1	-1	65,1	1172	2241
10	-1	+1	+1	-1	61,2	1154	2352
11	+1	+1	+1	-1	68,5	1141	2264
12	-1	-1	+1	-1	62,1	1144	2215
13	+1	-1	-1	-1	64,3	1195	2284
14	-1	+1	-1	-1	60,2	1122	2311
15	+1	-1	-1	-1	64,2	1174	2272
16	-1	-1	-1	-1	62,4	1135	2297
17	1,414	0	0	0	60,8	1184	2272
18	-1,414	0	0	0	62,1	1118	2358
19	0	1,414	0	0	61,8	1164	2362
20	0	-1,414	0	0	63,7	1123	2298
21	0	0	1,414	0	64,2	1141	2386
22	0	0	-1,414	0	64,8	1135	2274
23	0	0	0	1,414	63,4	1205	2415
24	0	0	0	-1,414	66,6	1148	2205
25	0	0	0	0	65,3	1162	2310

Поиск уравнения регрессии осуществляется на основе использования статистических методов, где математическая модель представляется в виде отрезка ряда Тейлора. Уравнение регрессии имеет вид [89, 90]

$$y = b_o + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq 1}}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} x_{ii}^2 \qquad (4.1)$$

где b_o, b_i, b_{ij}, b_{ii} – свободный член уравнения, линейные коэффициенты, коэффициенты взаимодействия, квадратичные коэффициенты.

Метод наименьших квадратов (МНК), используется для апроксимации данных и определения лучших параметров модели, минимизируя разность велечин квадратов между наблюдаемым и предсказанными величинами.

Коэффициенты уравнения определяются методом наименьших квадратов (МНК) из условия:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N}(y_i - \widehat{y_i})^2 = \min \qquad (4.2)$$

где N—объем выборки; $y_i, \widehat{y_i}$ - соответственно экспериментальное и теоретическое значения функции отклика, которая характеризует параметр оптимизации.

4.2 Моделирование процессов размола топлива в шаробарабанных мельницах для условий работы тепловых электрических станции

Влияние каждого фактора на постоение матмодели процесса измельчения исследовалось отдельно. Поэтому в данном разделе исследовалась зависимости влияния каждого основного фактора на энергетические показатели мельницы.

К примеру влияние средневзвешенного диаметра мелющих шаров на эффективность размола описывается следующим образом.

При реализации водопадного режима работы шаровой мельницы шары вместе с топливом совершают круговое движение с дальнейшим ее изменением под силой тяжести [90, 91]. Теория о механизме разрушения материала при водопадном режиме движения загрузки мельницы подтверждает, что при определенных условиях работы шаровой барабанной мельницы можно достичь более эффективного процесса измельчения и повышения однородности фракционного состава материала. В водопадном режиме движения загрузки мельницы шары (мелющие тела) поднимаются вверх по внутренней поверхности мельницы под действием центробежных и гравитационных сил [93]. Затем они падают обратно вниз, размалывая материал, который находится внутри мельницы.

Средние геометрические размеры сферических частиц равен:

$$d_i = 5{,}05 \cdot \sqrt{\frac{(\sqrt{2})-1}{\pi}} \cdot \frac{\mu \cdot (1-2\mu)}{2-\mu} \cdot \left[\frac{4\pi}{3\sigma_o} \cdot \sqrt{1+f} \cdot r^3 \cdot \right.$$
$$\left. \cdot \rho_m \cdot \Psi_n^2 r^3 \cdot \sum_{j=1}^{i} k_j \left(1 + 0.0331 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_ш} \left(1 - \frac{1}{k_j} \right)^{1/2} \right) \right], \qquad (4.11)$$

где r -средневзвешенный радиус шара;

f -коэффициент трения шаров о топливо [17];

ρ_m - плотность топлива, кг/м^3;
$\rho_ш$ - плотность шаров, кг/м^3.

Аналогично определяется диаметр частиц d_{i-1} (i-1) слоя шаровой загрузки барабана мельницы [15] и оценивается средний диаметр частиц [95]:

$$d_{cpi} = \frac{d_i + d_{i-1}}{2}, \tag{4.12}$$

На основе проведенных измерении на мельничной установке и расчета средних размеров частиц угольной пыли, полученной в результате размола, был построен график зависимостей d_{cpi} от частоты вращения ω барабана [17] рисунок 4.1.

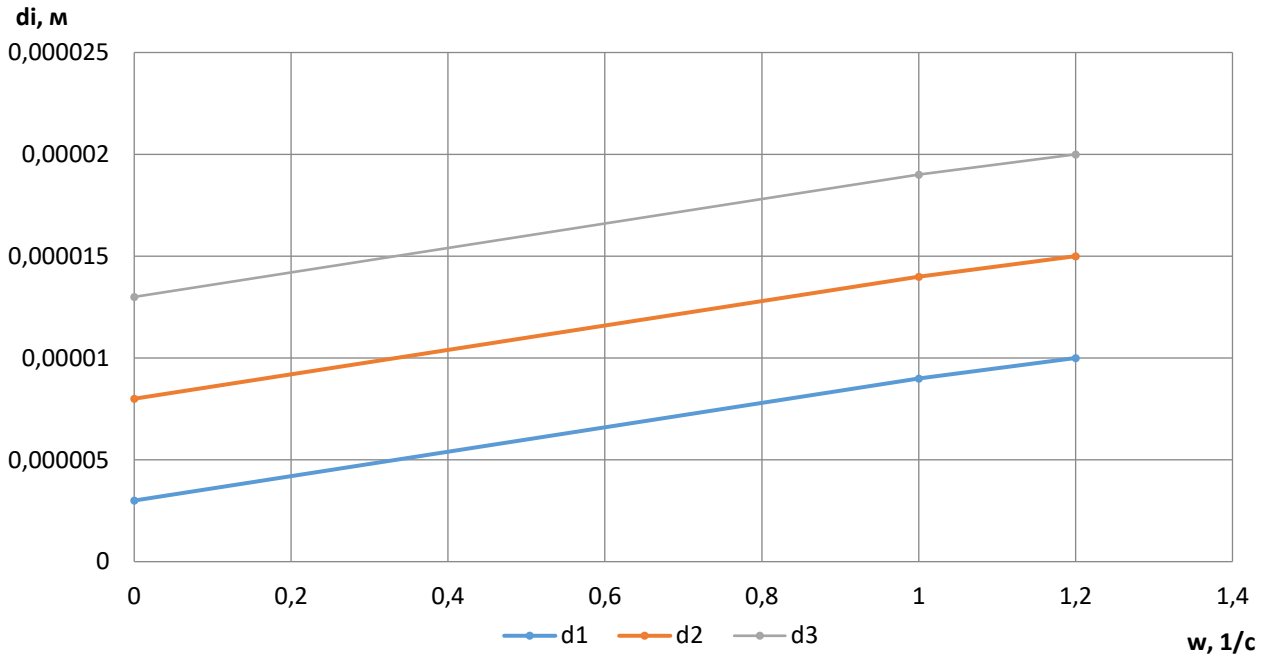


Рисунок 4.1 - Зависимости d_{icp} фракции угольной пыли от частоты оборота ШБМ [53]

.

Энергия мелющих шаров увеличивается и приводит к более интенсивному разрушению крупных частиц угольной пыли, при повышении скорости оборотов шаровой мельницы, а это приводить к уменьшению времени пребывания топлива внутри барабана. Путем изменения частоты вращения барабана мельницы можно повлиять на процесс измельчения угля и, следовательно, на размер частиц угольной пыли. Это может ограничить возможность дополнительного размола мелких частиц и привести к увеличению среднего размера частиц угольной пыли. При различных частотах вращения мельницы может изменяться степень измельчения материала, его пластичность или агломерационные свойства, что влияет на средний размер частиц пыли.

Изменения частоты вращения мельницы влияет средний размер конечного продукта угольной пыли. При φ=0,30 и частоте вращения барабана 0,98 $с^{-1}$, средний размер частицы угольной пыли составляет 0,00000852, если увеличить частоту вращения барабана мельницы до 1,2 $с^{-1}$, то средний размер частицы угольной пыли увеличивается до 0,000019 м. При φ=0,45 и частоте вращения барабана 0,98 $с^{-1}$, средний размер частицы угольной пыли составляет 0,00000195. Если увеличить скорость вращения шаровой мельницы до 1,2 $с^{-1}$, то средневзвешенный диаметр угольных частиц увеличиться до 0,000022 м. Это может привести к неэффективному сжиганию и увеличению механического недожога топлива.

Загрузка мельницы углем при эксплуатации шаробарабанной мельницы тоже имеет большое значение. При малом количестве угля увеличивается число холостых ударов шаров, при большом - сила удара смягчается слоем угля повышенной толщины.

На рисунке 4.2 представлен график зависимости модели ШБМ при его различной загрузке мелющими шарами (φ=45; 0,40; 0,35; 0,30; 0,25; 0,20%) и исходным топливом. Наибольшая производительность получена при загрузке шарами φ=30 % и весовой загрузке мельницы углем 1500 г, равная 187 г/ч.

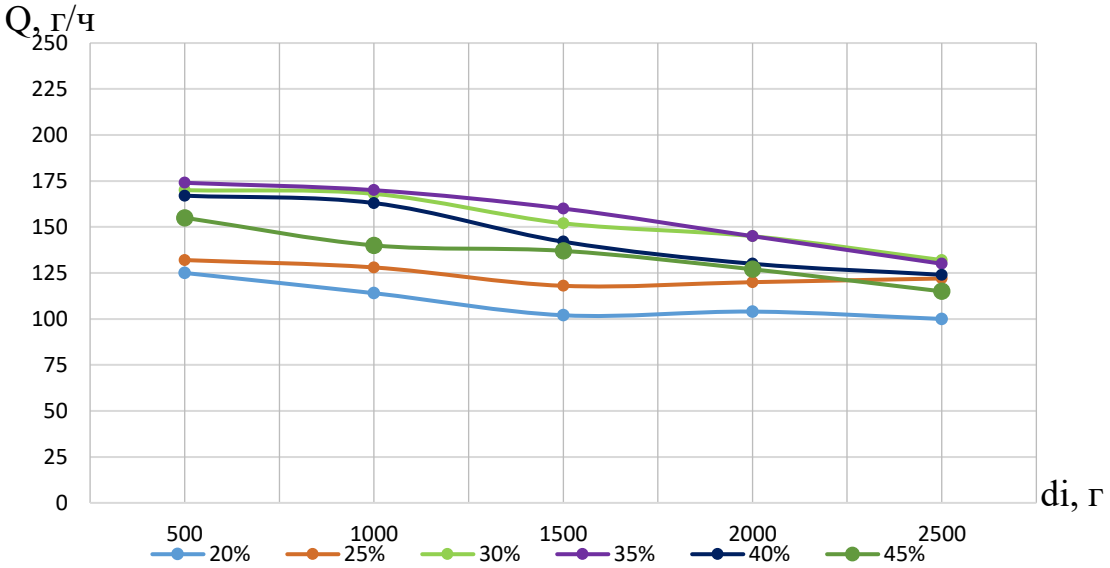


Рисунок 4.2 – Зависимость производительности мельницы от степени загрузки мелющими шарами и топливом

Для определения влияния на показатели эффективности работы шаровой мельницы, используемой для измельчения промпродукта каменного угля исследованы следующие факторы: коэффициент загрузки (доли ед.), относительная частота вращения барабана (доли ед.), средневзвешенный диаметр шара (доли ед.), скорость движения аспирационного воздуха.

Для определения влияния каждого фактора на эффективность работы мельницы, использованы методы статистического анализа, такие как регрессионный анализ или анализ дисперсии. Это позволило определить степень

влияния каждого фактора и оптимизировать условия работы мельницы для достижения желаемых показателей эффективности измельчения угля.

Изменение параметров мельницы может привести к определению тонкости помола, производительности и энергопотребления.

Тонкость помола и удельная поверхность готового продукта определены методом ситового анализа путем просева пробы угольной пыли [96] с помощью вибросит различных диаметров 1000, 500, 200, 90, 71 мкм .

Режим работы мельницы характеризуется временем помола и частотой вращения барабана. Сам продукт помола при прочих равных условиях характеризуется удельной поверхностью ($S_{вых}$, см^2/г), наибольшей крупностью его ($d_{вых}$, см) и в некоторых случаях зерновым составом (гранулометрической характеристикой R_{90}, %) [93].

По результатам статической обработки результатов экспериментальных исследовании с использованием стандартных программ выполнен регрессионный анализ и получены уравнения в виде $Q = Q(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $P = P(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $S = S(x_1, x_2, x_3, x_4)$, таблица 4.1.

Полученное расчетным путем уравнение регрессии [90, 95] показывает зависимость производительности мельницы Q от факторов воздействия x_1, x_2, x_3, x_4 , в кодированной форме представления имеет вид:

$$\begin{aligned} Q = {} & 67{,}34 + 1{,}83 \cdot x_1 - 1{,}241 \cdot x_2 - 0{,}93 \cdot x_3 - 0{,}52 \cdot x_4 + 0{,}270018 \cdot x_1^2 + \\ & + 0{,}22 \cdot x_2^2 + 0{,}17 \cdot x_3^2 + 0{,}19 \cdot x_4^2 - 0{,}33 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0{,}1125 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ & - 0{,}14 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0{,}38 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0{,}2 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0{,}41 \cdot x_3 \cdot x_4 \end{aligned} \quad (4.13)$$

После соответствующих преобразований с учетом уровней варьирования основных факторов получаем уравнение регрессии [95], описывающее процесс измельчения в натуральном виде [17, 98, 99]:

$$\begin{aligned} Q = {} & 354{,}62 - 176{,}29 \cdot \psi - 2{,}19 \cdot d_{св} + 100{,}89 \cdot \upsilon - 1401{,}08 \cdot \varphi + 75 \cdot \psi^2 + \\ & + 0{,}22 \cdot d^2_{св} + 17 \cdot \upsilon^2 + 1940 \cdot \varphi^2 - 5{,}42 \cdot \psi \cdot d_{св} + 18{,}67 \cdot \psi \cdot \upsilon + 228{,}33 \cdot \psi \cdot \varphi - , \\ & - 3{,}75 \cdot d_{св} \cdot \upsilon + 20 \cdot d_{св} \cdot \varphi - 412 \cdot \upsilon \cdot \varphi \end{aligned} \quad (4.14)$$

Фактор x_1 имеет наибольшее влияние на производительность мельниц., коэффициент при этом факторе положителен, что означает прямую пропорциональность между относительной частотой вращения барабана и производительностью мельницы. Таким образом, при увеличении продолжительной частоты вращения барабана производительность барабана растёт. В сочетании с повышенной относительной частотой вращения барабана фактор x_2 способствует улучшению производительности мельницы.

Увеличение значений этих факторов приведет к снижению производительности мельницы. Увеличение диаметра мелющих шаров (фактор x_2) приводит к снижению производительности, это связана с проблемами перемешивании и размоле угля при больших диаметрах мелющих шаров. Увеличение скорости движения воздуха (фактор x_3) уменьшает производительнось ШБМ. Коэффициент загрузки мельницы мелющими шарами (фактор x_4) отрицательно влияет на производительность мельниц, это связано с перегрузкой мельницы, что приводит к снижению эффективности процесса.

В целом, для повышения производительности мельницы рекомендуется соблюдать оптимальные значения факторов, которые положительно влияют на производительность (например, увеличивать относительную частоту вращения барабана и использовать мелющие тела различного размера), и одновременно избегать значений, которые отрицательно влияют на производительность [100, 101].

Уравнение регрессии, описывающее зависимость мощности, потребляемой приводом мельницы, от исследуемых факторов имеет вид [42]:

$$\begin{aligned} P = {} & 10965{,}62 + 2950{,}29 \cdot \psi - 209000 \cdot d_{св} + 214{,}06 \cdot \upsilon - 48361{,}37 \cdot \varphi - \\ & -1632{,}69 \cdot \psi^2 + 2380000 \cdot d_{св}^2 - 162.55 \cdot \upsilon^2 + 46276 \cdot \varphi^2 - 69791.67 \cdot \psi \cdot d_{св} - , \\ & -343.75 \cdot \psi \cdot \upsilon + 7812.5 \cdot \psi \cdot \varphi - 1875 \cdot d_{св} \cdot \vartheta + 356000 \cdot d_{св} \cdot \varphi + 937{,}5 \cdot \upsilon \cdot \varphi \end{aligned} \quad (4.15)$$

Уравнение регрессии, описывающее зависимости в виде переменной, характеризующее зависимость удельной поверхности угольной пыли [100, 101]:

$$\begin{aligned} S = {} & 116{,}39 + 6344{,}33 \cdot \psi - 274000 \cdot d_{св} - 4671{,}3 \cdot \upsilon + 255669 \cdot \varphi - \\ & -2055{,}56 \cdot \psi^2 - 860000 \cdot d_{св}^2 - 715 \cdot \upsilon^2 - 96500 \cdot \varphi^2 - 70833{,}33 \cdot \psi \cdot d_{св} - , \\ & -938 \cdot \psi \cdot \upsilon - 2300 \cdot \psi \cdot \varphi + 76300 \cdot d_{св} \cdot \vartheta + 1190000 \cdot d_{св} \cdot \varphi + 10500 \upsilon \cdot \varphi \end{aligned} \quad (4.16)$$

На рисунке 4.3 представлено изменение функции, срабатывающих от последовательности скорости вращения ШБМ.

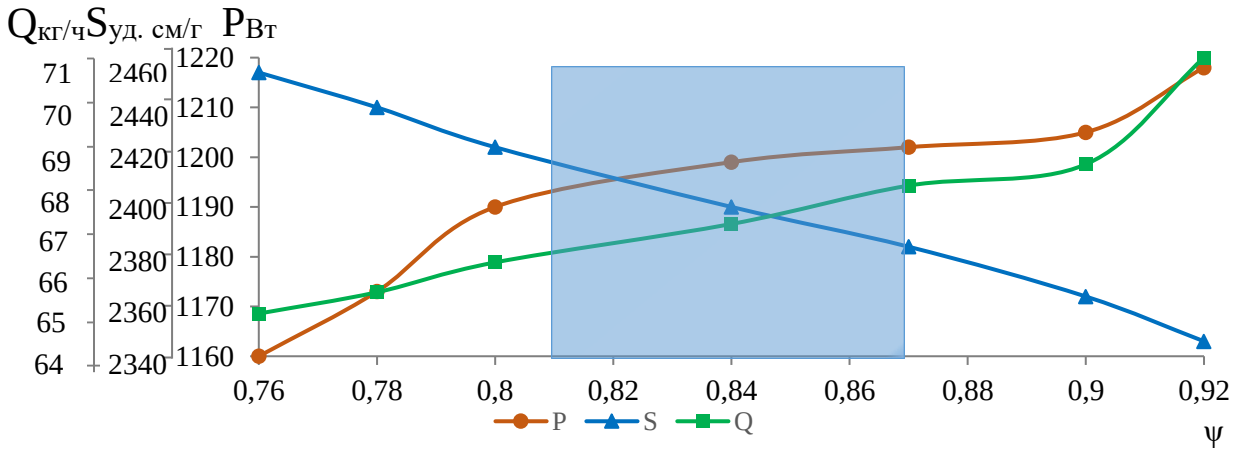


Рисунок 4.3 – Изменение функции, срабатывающих от последовательности частоты вращения барабана мельницы (Q, P, S от φ)

Удельная поверхность готовой угольной пыли имеет решающее значение в процессе подготовки топлива. В данных увеличениях уменьшение удельной поверхности при кратковременном увеличении частоты вращения барабана может привести к более грубому размолу топлива. Этот вывод может иметь важное практическое применение при многократной оптимизации систем пылеприготовления.

Изменения функции осрабатывания производительности, мощности, потребяемой приводом и поверхности готовой угольной пыли от средневзвешенного диаметра мелюших шаров представлен на рисунке 4.4.

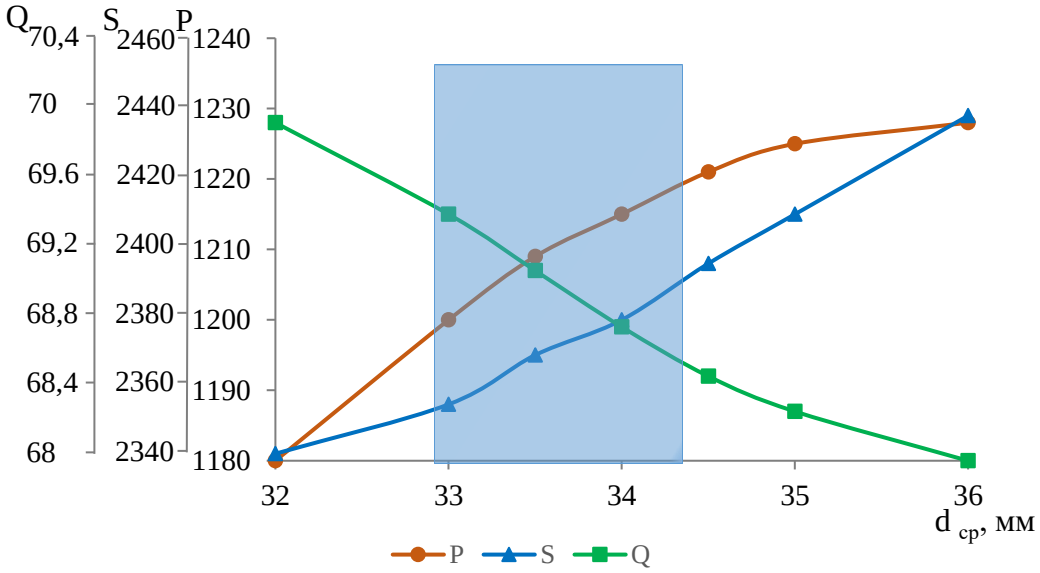


Рисунок 4.4 – Изменение функции, срабатывающих от последовательности частоты вращения барабана мельницы (Q, P, S от $d_{ср}$, мм)

Увеличение средневзвешенного диаметра материала может создавать большую мощность от привода мельниц, так как более крупные частицы могут потребовать больше энергии для измельчения. Производительность ШБМ увеличивается с появлением средневзвешенного диаметра мелющего шара. Это связано с тем, что крупные частицы обычно мельчают быстрее и требуют меньше времени на обработку по сравнению с уменьшением частиц.Удельная поверхность готового изделия, как правило, выносится с образованием средневзвешенного диаметра мелющих шаров. Это происходит потому, что крупные частицы имеют меньшую продольную поверхность по сравнению с воздействием частиц.

При увеличении загрузки мелющими шарами, увеличивается производительность мельницы. Так, как большее количество мелющих шаров создает более интенсивное воздействие на материал, что способствует более эффективному измельчению. Однака это требует большей мощности от привода мельницы. Повышение количества шаров может увеличить сопротивление измельчаемого материала, что требует дополнительной энергии для его обработки. Увеличении загрузки мелющими шарами приводит к увеличению поверхности угольной пыли, это связано с более интенсивным измельчением

угля. Стоит отметить, что существует текущий предел, после которого увеличение загрузки мелющими шарами может привести к нежелательным последствиям, таким как перегрузка ШБМ, износ оборудования и т.д. Поэтому оптимальные параметры загрузки мелящими шарами могут быть обусловлены условиями работы мельниц и свойствами измельчаемого угля.

Изменения функции срабатывания производительности, мощности, потребялемой приводом и поверхности готовой угольной пыли от загрузки мелюшими шарами представлен на рисунке 4.5.

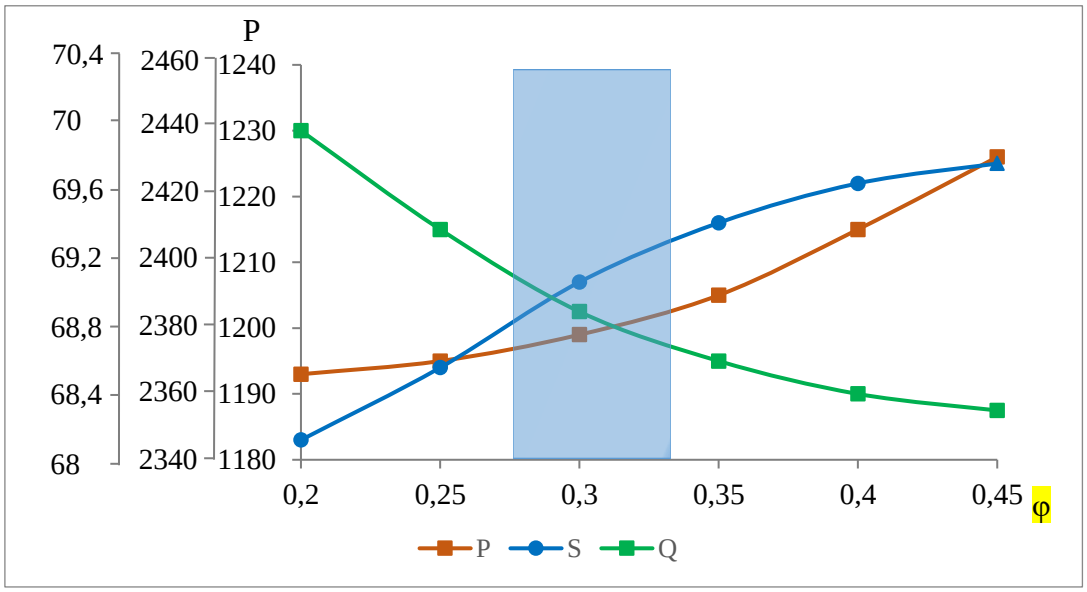


Рисунок 4.5 - Изменения функции осрабатывания производительности, мощности, потребялемой приводом и поверхности готовой угольной пыли от загрузки мелюшими шарами

Интервал измерения средневзвешенного диаметра шара находится в области результатов от 77 до 81 мм, на основе проведенного анализа зависимости производительности мельниц, мощности потребляемого привода и поверхности угольной пыли $d_{св}$ (Q, P, S от $d_{св}$) установлены наиболее оптимальная область его изменения. Оптимальный интервал величины средневзвешенного диаметра шара находятся в области значений: $d_{ср}$=30,1 -33,4 мм.

Оптимальным интервалом варьирования коэффициента загрузки мелющих шаров является φ=0,30 – 0,35. При этих значениях φ устанавливается область изменения Q, P, S.

На основании этих работ проведен пробный постановочный эксперимент измельчения топлива в шаровой барабанной мельнице, который позволил составить матрицу плана для полнофакторного эксперимента.

Значимость коэффициентов матмодели произведен статистическими методами с критериями Стьюдента, адекватность уравнений регресссии проверена при помощи коэффициента Фишера [93].

4.3 Выводы по разделу

Разработана методика выбора оптимальных параметров для процесса измельчения твердого топлива в условиях его сжигания на ТЭЦ-2 г. Темиртау АО «АрселорМиттал Темиртау». Для этого были использованы экспериментальные модели шаровой мельницей на базе АУЭС и на базе КарИУ. Результаты исследований, показывают оптимальные параметры, такие как состав мелющих шаров и режимы работы мельниц, которые препятствуют эффективности процесса измельчения продукции. Эти данные могут быть очень ценными для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности шаровых барабанных мельниц.

Даны рекомендации для эффективного усовершенствования процесса загрузки мельницы мелющими шарами и исходным топливом.

В ходе применения к проблеме измельчения твердого топлива теории полнофакторного эксперимента получены уравнения регрессии, описывающие характер поведения технологических и энергетических показателей работы мельницы (Q – производительности, P – мощности привода, потребляемая и S-удельная поверхности угольной пыли).

5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ПЫЛЕСИСТЕМЫ С ШАРОВЫМИ БАРАБАННЫМИ МЕЛЬНИЦАМИ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ АСУ ТП

5.1 Автоматическое регулирование системы пылеприготовления ТЭС

Целью данного раздела диссертации является разработка автоматической системы регулирования технологического процесса (АСР ТП) системы пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау, позволяющая оптимизировать технологический процесс подготовки угольной пыли для котлоагрегата ТП-81.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм автоматизированного пуска и останова технологического процесса, а также аварийный останов при срабатывании технологических защит.
2. Определить контролируемые технологические параметры системы пылеприготовления.
3. Разработать функциональную автоматизированную схему регулирования ШБМ для повышения ее производительности.
4. Централизовать контроль оборудования пылесистемы в зависимости от качества топлива обеспечивающую максимальную производительность ШБМ и получить качественную угольную пыли требуемой фракции $(R_{90} = 18 \div 20\%)$ по режимной карте ТЭЦ-2 г. Темиртау.
5. Разработать автоматическую схему измерения уровня угольной пыли в промежуточном бункере готовой угольной пыли и выбрать датчики измерения уровня соответствующее весовой нагрузке бункера.

5.2 Входные и выходные переменные взаимосвязанных функции для управления работой системы подготовки топлива

В свою очередь на ТЭЦ-2 г. Темиртау автомаическая система технологического процесса (ФСУ ТП) системы подготовки угольной пыли слабо автоматизирована и требует перевооружения. Автоматизация пылесистемы переопределяет перспективы дальнейшего использования ШБМ, позволит обеспечить автономный режим и предоставлять достоверную информацию о входных и выходных параметрах, и включает в себя различные процессы и операции. Дополнительные функции управления важны для обеспечения эффективной работы системы пылеприготовления, примеры некоторых входных и выходных функций, а также их взаимосвязь [102] представлена на рисункке 5.1.

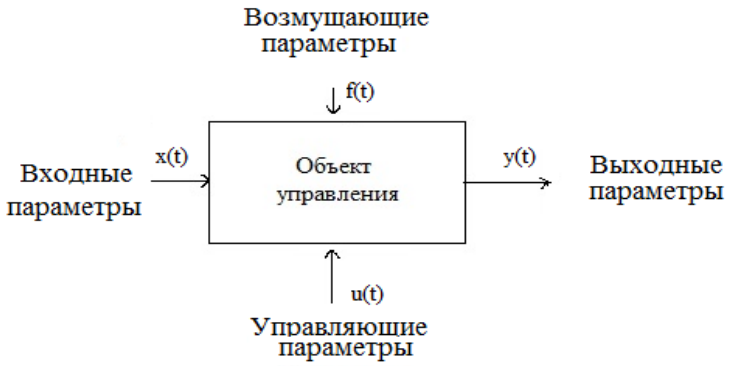


Рисунок 5.1 - Входные и выходные переменные функции системы подготовки топлива на ТЭС [107]

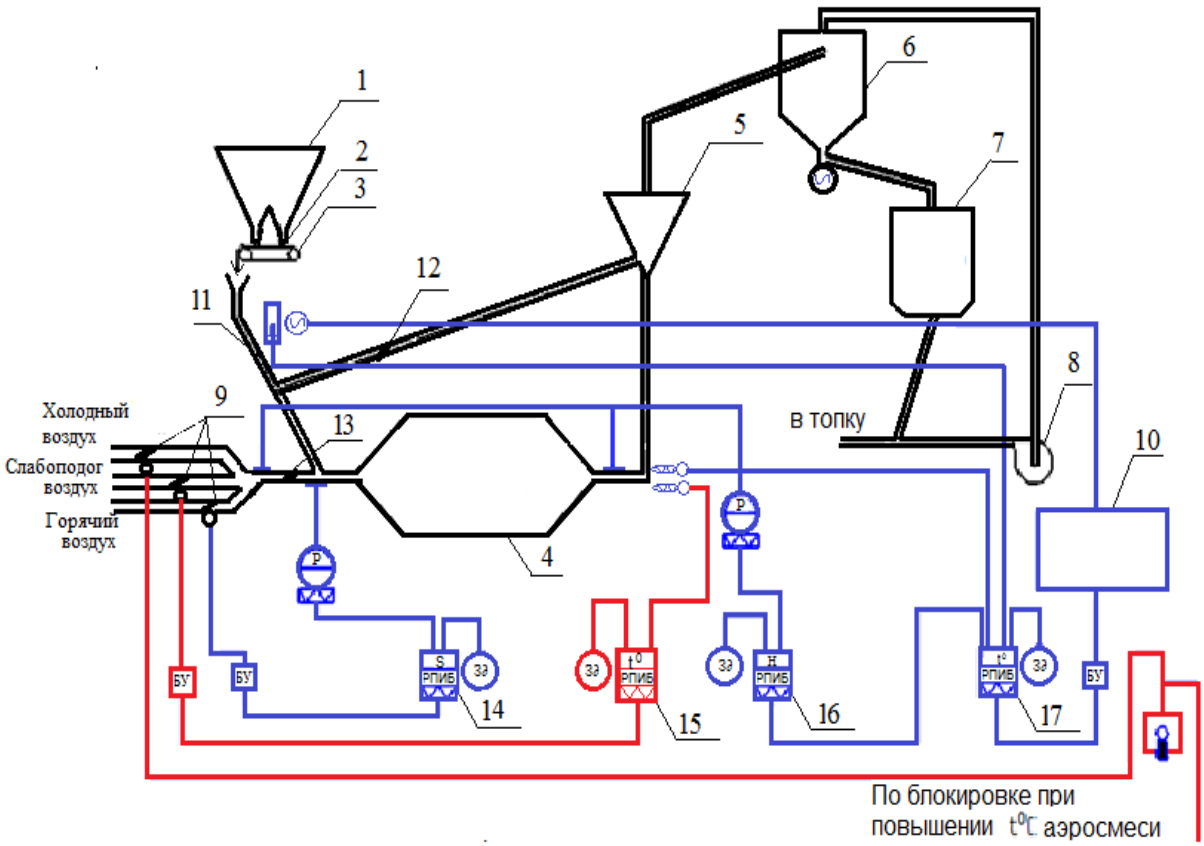
5.3 Существующая система автоматического регулирования ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау»

Транспорт угольной пыли к горелкам осуществляется отработанным сушильным агентом [103, 104]. Приборы теплового контроля, переключатели регуляторов автоматического и дистанционного управления, а также пусковые устройства вентиляторов, дымососов, мельниц и другие механизмов расположены на щите управления котла [104]. На рисунке 5.2 представлена существующая принципиальная схема регулирования ТЭЦ-2 г. Темиртау.

Автоматическое регулирование и защита системы пылесистемы с ШБМ ТЭЦ-2 осуществляется следующими электронными регуляторами: регулятор загрузки мельниц топливом; регулятор воздуха за мельницей; регулятор разряжения перед мельницей. В схеме защит предусмотрены специальные ключи, позволяющие выводить из работы защиты во время размола топлива.

Ключ имеет три положения: а) защита включена; б) защита выключена на сигнал; в) защита включена на сигнал.

При повышении t_a =75 °С аэросмеси за мельницей, а также при аварийном отключении питателей сырого угля, открывается клапан на подводе холодного воздуха к мельнице и отключается клапан горячего воздуха. При падении давления на напоре мельничного вентилятора (МВ) подается импульс на открытие клапана присадки холодного воздуха на всасе вентилятора. При падении давления аэросмеси перед горелками (за смесителями) отключаются соответствующие питатели.



1 – бункер сырого угля; 2 – шибер ленточного питателя; 3 – ленточный питатель топлива (ПСУ); 4 – шаробарабанная мельница; 5 – сепаратор; 6 – циклон; 7- бункер готовой пыли; 8 – мельничный вентилятор; 10 – шкаф дроссельных преобразователей; 9, 11, 12, 13 – заслонки; 14 - регулятор разряжения перед мельницей; 15 - регулятор температуры аэросмеси за мельницей; 16 - регулятор загрузки мельниц топливом; 17 - регулятор аварийной присадки холодного воздуха; Зд – задатчик ручного управления.

Рисунок 5.2 - Принципиальная схема автоматического регулирования пылесистемы с ШБМ ТЭЦ-2.

При повышении температуры подшипника ($t_{подшип}$) мельниц выше установленного предела (60-сигл., 75-отк.) происходит отключение соответствующей мельницы с последующим действием блокировок. При прекращении подачи топлива в мельницу подается импульс на включение вибратора, укрепленного на бункере сырого угля. При появлении топлива на ленте питателя сырого угля (ПСУ) вибратор отключается.

Световая и звуковая сигнализация, указывает на отклонение параметров, действия защит и блокировок. $t_{подшипн}$. ШБМ +70 °С, сигнализация вызов к панели К-24 t=75 °С останов ШБМ. МВ, ДС, ДВ - +80 °С; $t_{а.с.}$ за мельницей выше +75 °С; обрыв угля ПСУ; исчезновение напряжения; повышение температуры в пылевом бункере.

При отключении обоих МВ производится: отключение питателей пыли; отключение электродвигателей ШБМ. При аварийном отключении

электродвигателя ШБМ производится отключение ПСУ данной мельницы. Запрет на включение шаровой мельницы при закрытом шибере на всасе МВ. Запрет на включение ПСУ при отключенной мельнице. Периодически срабатывается до номинального уровня, допустимого по условиям надежной работы питатели угольной пыли, из бункера и заполняя его свежей угольной пылью. Запас пыли в бункерах поддерживается постоянным, при необходимости запускается в систему пылевой шнек, регулирование уровня бункера пыли производиться по срабатыванию мигалок (нижний уровень 2 м, верхний 12 м) вручную.

Срабатывание любой технологической защиты и блокировки сопровождается световой и звуковой сигнализацией на пульте котла (блока); звуковой сигнал этих защит отличается по тембру от сигнала противопожарных защит.

Проведенный анализ состояния существующей автоматизации системы пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау показывет снижение производительности и энергоэффективности. В связи с этим требуется модернизация автоматического регулирования, позволяющий организовать качественное регулирование и поддерживать стабильность технологического процесса, а также выравнивать процесс при аварийных ситуациях [105].

5.4 Модернизация АСУ ТП системы пылеприготовления ТЭЦ-2 г. Темиртау

5.4.1 Алгоритм управления пуска и останова системы пылеприготовления

Для качественного управления технологического объекта [106] системы подготовки угольной пыли ТЭЦ-2 г. Темиртау, разработана принципиальная схему АСУ ТП [107]. По заданным условиям системы пылеприготовления ТЭЦ-2, разработан алгоритм АСУ ТП в виде блок-схемы который представлен в приложении А (рисунок 1 - Блок-схема алгоритма «Пуск пылесистемы А (Б)», лист 1, лист 2, рисунок 2 - Блок-схема алгоритма «Останов пылесистемы А(Б)»), которые описывают получение информации возникающих в процессе эксплуатации [103, 104]. При наличии размещенного условия «Пуск пылесистемы», формируется «Пуск пылесистемы А (Б)»:

- ШБМ-А(Б) отключена;
- температура дымовых газов в поворотной камере больше заданного значения;
- включен маслонасос смазки зубчатого венца;
- включен маслонасос станции жидкой смазки;
- введены накладки линии технологической защиты (ЛТЗ) пылесистемы А(Б);

- введена накладка ЛТЗ «Не воспламенение первой или погас факелов всех МФ при растопке котла» или технологическая защита (ТЗ) «Погасание общего факела»;

- не сработали ТЗ на останов котла.

«Останов пылесистемы А(Б)» блок-схема который представлен в Приложении А, рисунок 2. Команда на автоматизированный запуск «Пуск пылесистемы А(Б)» формируется при наличии разрешающего условия – ПСУ А(Б) включен». При работе технологической защиты (ТЗ) или блокировок работа активного алгоритма прекращается путем подачи команды сброса на все его шаги с последующим их переходом в неактивное состояние. Дальнейшее состояние объекта управления (ОУ) определяется работой алгоритмов указанных ТЗ и блокировок. Управление режимами работы алгоритмов и шагов с АРМ организовано через панели управления [104, 110, 111].

Основными задачами пылесистемы является: обеспечение максимальной производительности ШБМ в зависимости от качества угля; вывод в экономический режим; автоматическое регулирование параметров; автоматический пуск, останов и аварийного останова.

5.4.2 Разработка схемы системы автоматического управления пылеприготовления ТЭЦ-2

Система автоматического регулирования и оптимизации ШБМ позволяет повысить эффективность работы мельницы, в котором предусмотрено несколько различных рабочих режимов и климатические условия.

Из-за большой влажности твердого топлива понижаться температура сушильного агента, а из-за завалов входной и выходной горловины ограничивается вентиляция ШБМ (при этом $\Delta P_{ШБМ} > \Delta P_{МАК}$) [112]. Во время эксплуатации мельницы не допускается повышения максимально допустимого значения $t_{аэросм}$, это приводит к взрыву пылесистемы. Для этого устанавливают механизмы, препятствующие перегреву аэросмеси, а также сигнализацию предаварийной ситуации с возможностью отключения подачи греющего агента. Значения $t_{аэросм}$ за ШБМ должна находиться в заданных пределах, а перепад давления не превышал максимально допустимого значения [112].

5.4.2.1 Контроль и регулирование технологических параметров

При разработке схемы АСУТП системы пылеприготовления необходимо учитывать комплекс программного обеспечения обеспечивающий заданный технологический режим работы мельницы, а также пуска, останова и аварийного останова. Точки контроля и визуализации технологических параметров, используемые при проектировании автоматической системы управления выбраны по требованиям к проектным решениям и постановке задачи. Контролируемые регулируемые параметры с диапазонами измерений, в пределах которых осуществляется контроль приведены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблице 5.1 - Контролируемые параметры тракта пылеприготовления

№	Точка контроля	Наименование параметра	Диапазон измерений
1.	Бункер сырого угля	Уровень угля	0–12 м
		Весовая загрузка	0–570 т
		Забив материалом	0–100%
2.	Питатель сырого угля (ленточный)	Частота оборотов	20–1500 об/мин
		Сила тока в цепи электропривода	1–5 А
3.	Трубопровод горячего воздуха	Давление	3,09 кПа
4.	Трубопровод	Температура горячего воздуха перед ШБМ	80 ^{0}С
5.	Шаровая барабанная мельница	Температура реагента	200 ^{0}С
		Температура пылевоздушной смеси за ШБМ	+65–+75 ^{0}С
		Разряжение перед мельницей	0,2–0,5 кПа
		Сопротивление мельницы	2,0–3,0 кПа
		Ток электродвигателя мельницы	95 А
		Вибрация	0,10–0,12 мм
		Температура подшипника эл.двигателя	80 ^{0}С
		Число оборотов	17,8 об/мин
		Температура коренных подшипников	60 ^{0}С
6.	Мельничный вентилятор	Температура в подшипниках	60 ^{0}С
		Давление перед МВ	50 кПа
		Давление в нагнетательных коробах МВ	38-40 КПа
		Разряжение на всасе МВ	50 кПа
		ВМ 100/200: -Ток потребляемый МВ	70 А
		-Число оборотов электродвигателя МВ	1480 об/мин
		ВМ-18А: -Ток потребляемый МВ	70 А
		-Число оборотов электродвигателя МВ	1480 об/мин
№	Точка контроля	Наименование параметра	Диапазон измерений
7.	Бункер пыли	Уровень пыли	2- 12 м
		Весовая загрузка	0-430 т
		Температура пыли	80 ^{0}С
8.	Питатели пыли	Ток	12 А
		Нижний предел числа оборотов	500 об/мин
9.	Маслосистема	Температура масла - в подшипниках - в коренных подшипниках	 80 °С 60 °С
		Давление масла	2,0 кг/см ^{2}
		Уровень масла в баке-отстойнике	
10.	Реверсионный шнек	Число оборотов	975 об/мин
		Напряжение	380 В

Таблица 5.2 – Регулируемые параметры тракта пылеприготовления

№	Параметр	Управляемый элемент	Диапазон регулирования
1.	Регулирование числа оборотов ПСУ	Шибер на течке сырого угля	0-100 %
2.	Регулирование подачи воздуха в ШБМ	Шибер горячего воздуха	0-100 %
		Шибер слабо подогретого воздуха	0-100 %
		Шибер холодного воздуха	0-100 %
3.	Регулирования разряжения перед ШБМ	Заслонка подвода горячего воздуха	0-100 %
4.	Регулирование температуры перед ШБМ	Шибером горячего воздуха и шибером добавки слабо подогретого воздуха	0-100 %
5.	Регулирование температуры за ШБМ	Шибером горячего воздуха и шибером добавки слабо подогретого воздуха	0-100 %
6.	Регулирование сопротивления ШБМ	Шибера на пылевоздушном тракте	0-100%
7.	Регулирование загрузки ШБМ	Шибер на течке сырого угля, Шибер подвода вентилирующего воздуха	0-100 % 0-100%
8.	Регулирование тонины помола	Привод жалюзи сепаратора	0-100%
9.	Регулирование разряжение перед ШБМ	Шибер сброса в мельницу и присадок холодного воздуха	0,2-0,5 кПа
10.	Регулирование разряжения перед МВ	Шибера до вентилятора. Повышения давления за МВ частичное закрытие шибера после вентилятора (сбросы к горелкам), забивание пылепроводов.	0-100 %
№	Параметр	Управляемый элемент	Диапазон регулирования
11.	Регулирование разрежения в КПВ за вентилятором при подаче пыли к горелкам горячим воздухом	Шибера после вентилятора.	0-100 %
12.	Регулирование уровня готовой пыли	Шибер, направляющий готовую пыли из циклона в реверсивный шнек или пылевой бункер Тензометрические датчики весы 1,5 метра – 53 т; метра – 107,5 т; 6 метра -215 т; 9 метра – 325 т; 12 метра - 430 т	0-100 %
13.	Регулирование температуры в бункере готовой пыли	Термодатчик	80 0С
14.	Регулирование уровня в бункере сырого угля	Отключение ПСУ	20 - 1500 об/мин

Пылеприготовительные установки оснащаются сигнализациями, предупредительная сигнализация срабатывает при изменении диапазона значений таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Сигнализация тракта пылеприготовления

№	Оборудование	Управляемый элемент	Диапазон регулирования
1.	Бункер сырого угля V=570 м^3	уровень угля – низкий L уровень угля – низкий H	2 м 12 м
2.	ШБМ	Температура за мельницей (низкая)	< 70 ^{0}C
		Температура за мельницей (высокая)	>70 ^{0}C
		Перепад давления на мельнице	1 кПа
3.	Бункер готовой пыли V=430 м^3	уровень угля – низкий L уровень угля – низкий H	2 м 12 м

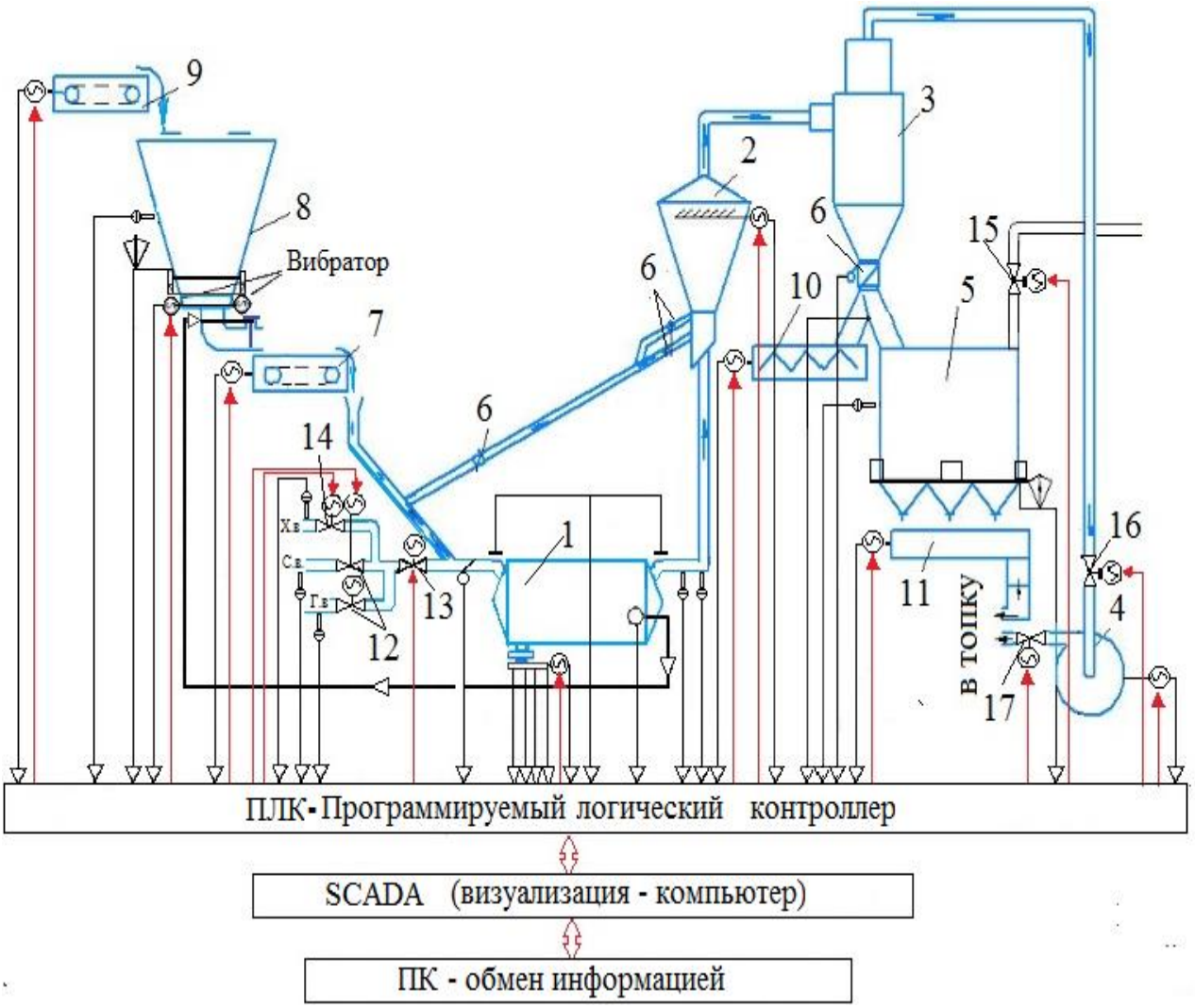
5.4.2.2 Новая функциональная схема АСУТП системы пылеприготовления

Для решения ряда научных, технических и организационных вопросов необходимо пользоваться общей классификацией АСУ ТП, которые характеризуются факторами и показателями и можем выступить в роли классификационного признака [105]. В зависимости от поставленных целей используем различные признаки: уровень, занимаемый АСУ ТП в структуре предприятия; характер протекания технологического процесса во времени; показатель условной информационной мощности; уровень функциональной надежности АСУ ТП; тип функционирования АСУ ТП [105].

АСУ ТП по уровню, занимаемому в организационно-производственной иерархии протекания управляемого технологического процесса АСУ ТП строится трехуровневому принципу [105].

Использование современной измерительной техники позволяют уменьшить затраты на создание и эксплуатацию АСУ ТП на ТЭЦ, а также применение датчиков, конструктивно объединенных с преобразователями, позволяет сократить количество панелей и щитов КИПиА.

Новая функциональная схема АСУ ТП системы пылеприготовления рисунок 5.3, представляет комплекс программного обеспечения, обеспечивающий заданный технологический режим работы ШБМ в зависимости от контролируемых и регулируемых параметров представленные в таблицах 5.1, 5.2.



1 – шаровая барабанная мельница (ШБМ-320/570); 2 – сепаратор (ТКЗ ВТИ); 3-циклон (НИИГАЗ); 4- мельничный вентилятор (ВМ 100/1200); 5- бункер готовой пыли; 6 –мигалки; 7- ленточный питатель сырого угля; 8- бункер сырого угля; 9- подача угля в БСУ; 10- реверсионный шнек; 11-лопастной питатель пыли; 12 - шибера горячего, слабо подогретого воздух; 13 - шибера подачи сушильного агента; 14 - шибера холодного воздуха [68]; 15 – отвод пара из БГП;16- шибера подвода воздуха

Рисунок 5.3– Новая функциональная схема АСУ ТП системы пылеприготовления ТЭЦ-2

Сбор данных о технологических параметрах осуществляется датчиками, которые преобразуют измеряемые величины в унифицированные сигналы тока 4–20 мА [113].

Промышленный логический контролер (ПЛК) позволяет позволяет длительное время работать в условиях резких измененях температуры и относительной влажности влажности на участках. Детальная регламентация всех составляющих ПЛК содержится в нормативном документе [113, 114].

Для визуализации в качестве ПЛК верхнего уровня могут использоваться концентраторы, коммуникационные контроллеры SCADA - программное обеспечение АСУ ТП, реализующее автоматическое управление и контроль технологического процесса, специализирующееся на автоматизации в определенной области [109].

Также информация о технологическом процессе дублируется на персональный компьютер включеный в сеть Ethernet, выполняются функции контроля и управления за работой технологического оборудования, что позволит передавать всю информацию о ходе ТП всем пользователям, имеющим доступ к этой сети.

5.5 Система автоматического регулирования и оптимизация ШБМ

5.5.1 Регулирование шаровой барабанной мельницы (ШБМ)

Система контроля загрузки (СКЗ) ШБМ размалываемым материалом применяется для:

- измерения и расчета основного параметра технологического процесса измельчения;
- степени загрузки мельницы и топливом;
- определения размольной способности ШБМ;
- предотвращение завала ШБМ размалываемым материалом;
- оптимизации процесса измельчения, путем получения информации для управления подачей размалываемого материала в ШБМ, такого значения степени загрузки, при котором обеспечивается возможная Qmax;
- снижение удельного расхода;
- увеличения срока работы ШБМ;
- осуществления поддержания R_{90} при автоматическом регулировании (АР).

Частота оборотов мельницы равен n=17,78 об/мин, масса загрузки шаров G=35 тонн, уровень заполнения ШБМ углем Q1 =34,2 т/ч, размер частиц угля dx1=25 мм, выходные параметры - производительность шаровой мельницы Q2=34,2 т/ч, потребляемая мощность N=800 кВт, гранулометрический состав dx2- 0,09 мм (рисунок 5.4).

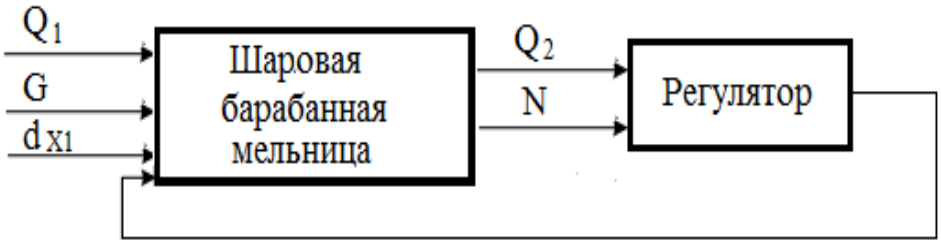


Рисунок 5.4 – Регулирование шаровой барабанной мельницы (ШБМ).

Регулирование и оптимизация работы шаровых барабанных мельниц (ШБМ) включает в себя ряд параметров и процессов, которые могут быть настроены и поддерживаться для достижения нужных результатов.

Основными аспектами регулирования ШБМ являются: скорость включения барабана; размер и количество шаров; загрузка мелющими шарами и топливом; время измельчения; мониторинг и контроль температуры.

Режимы работы регулятора представлены в таблице 5.4 [124].

Таблица 5.4 - Режимы работы регулятора

Режимы управления работы регулятора	Информационный	Сигнализационный	Оптимизационный	Диагностический
Ручное	+	+	-	+
Автоматическое	+	+	+	+

Использование самонастраивающегося микропроцессорного регулятора (САР) с различными режимами работы и автоматической настройкой параметров может повысить эффективность процесса размола твердого топлива в шаровой барабанной мельнице (ШБМ). Возможность автоматической настройки параметров регулятора и системы позволяет быстро и точно подстроить мельницу под текущие условия работы. САР может контролировать работу мельниц в первое время и предотвращать перегрузки, что снижает риск повреждения оборудования и обеспечивает непрерывную работу. АР позволяет оптимизировать процессы, что часто приводит к снижению энергопотребления.

5.5.2 Регулятор температуры

Для автоматизации контура регулирования $t_{аэросмеси}$ шаровой барабанной мельницы (ШБМ) и определения динамических параметров объекта регулирования, экспериментальным путем, была снята кривая разгона. Задание на клапан подачи горячего воздуха было увеличено, скачком, на 5 % и зафиксирована начальная температура на выходе ШБМ. Полученные данные, для удобства последующей обработки, были приведены к нулю (задание от 0 % и рост температуры от 0 ºС). Приведенная кривая разгона, с элементами для определения динамических параметров объекта регулирования, приведена на рисунке 5.5.

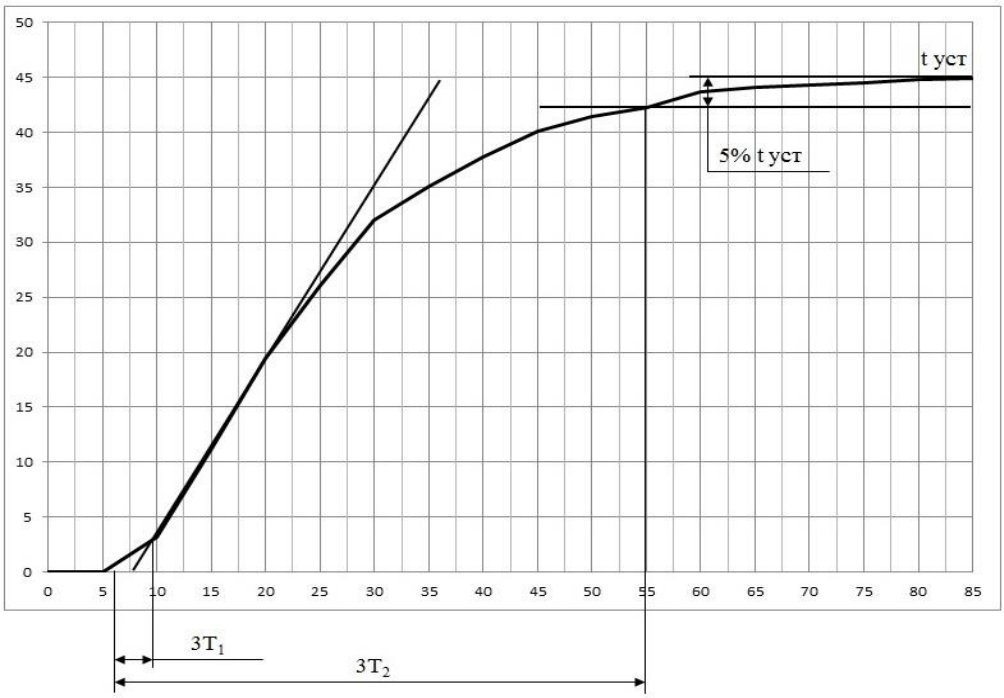


Рисунок 5.5 - Численные данные кривой представлены в таблице 5.5

По виду кривой разгона [111], принимаем решение о ее аппроксимации апериодическим звеном второго порядка. Графическим путем определяем динамические параметры объекта регулирования: транспортное запаздывание τ=6 с, постоянная времени T_1=1,2 с (т.к. $3T_1$=3,6 с), постоянная времени T_2=16,33 с (т.к. $3T_2$=49 с).

Таблица 5.5 - Численные данные кривой разгона

Температура, °С	0	0	3,15	11,3	19,4	26,1	32	35,1	37,8
Время, с	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Температура, °С	40,1	41,4	42,3	43,7	44,1	44,3	44,6	44,8	44,9
Время, с	45	50	55	60	65	70	75	80	85

Для построения частотных характеристик необходимо получить модуль и аргумент амплитудно-фазовой характеристики, т.е. АЧХ [102] (амплитудно-частотную характеристику) и ФЧХ (фазо-частотную характеристику) [102].

$$\begin{aligned} &\text{АЧХ}: \mathrm{A}(\omega) = \sqrt{\mathrm{Re}^2 + \mathrm{Im}^2} \\ &\text{ФЧХ}: \varphi(\omega) = \mathrm{arctg}\frac{\mathrm{Im}}{\mathrm{Re}} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Вычисление ФЧХ сложнее, т.к., в зависимости от знаков полученных значений вещественной и мнимой частей, зависит формула для ее расчета:

$$"\varphi(\omega) = \text{arctg}\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \text{ или} "\varphi(\omega) = 180^0 - \text{arctg}\left|\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right| " \text{или}$$
$$"\varphi(\omega) = -180^0 + \text{arctg}\left|\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right| " \text{или} "\varphi(\omega) = -\text{arctg}\left|\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right| " \quad (5.2)$$

Ряд рассчитанных в электронной таблице Microsoft Excel значений частотных характеристик приведен [102] в таблице 4.5.

Задаемся запасом по фазе [102] в 50° и, дополнительно, 5° с учетом предполагаемого ПИ-регулирования (реализации пропорционально-интегрального закона регулирования). По таблице 5.6, определяем частоту ω_1, при которой фазовый сдвиг разомкнутой системы (аргумент) равен:

$$\varphi(\omega) = -180 + 50 + 5 = -125^0$$

Таблица 5.6 - Частотные характеристики объекта

ω, рад/с	Модуль	Аргумент
1	2	3
0,1	4,667968837	-65,39341929
0,2	2,562967263	-86,4796582
0,3	1,69400583	-98,25393884
0,4	1,228021729	-106,9185661
0,5	0,938208955	-113,9557594
0,6	0,741531203	-119,8961765
0,7	0,600463121	-124,9975827
0,8	0,495389401	-129,4189062
0,9	0,414939477	-133,2747002
1	0,352013291	-136,654673
1,1	0,301931237	-139,6317866
1,2	0,261482987	-142,2663276
1,3	0,228397807	-144,6084342
1,4	0,201030261	-146,6999362
1,5	0,17816419	-148,5758119
1,6	0,158885554	-150,2653807
1,7	0,142497338	-151,7932878
1,8	0,128461154	-153,1803156
1,9	0,116356314	-154,4440523
2	0,105850632	-155,5994389
3	0,049113092	-163,2867714
4	0,028070779	-167,3392928
5	0,018101721	-169,823519
6	0,012623008	-171,4976013
7	0,009297478	-172,7007689
8	0,007130097	-173,6066314
9	0,00564003	-174,313006
10	0,004572127	-174,8791245

По таблице 5.5, ω_1=0,7 рад/с, модуль A=0,6. Отсюда, коэффициент пропорциональной части ПИ-регулятора:

$$K_P = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,6} = 1,66 \tag{5.3}$$

Определяем абсолютное значение нуля передаточной функции:

$$\omega_0 = \frac{K_I}{K_P} = 0,1\omega_1 = 0,1 \cdot 0,7 = 0,07 \text{ рад/с} \tag{5.4}$$

Коэффициент интегральной части ПИ-регулятора (величина, обратная постоянной интегрирования $T_и$):

$$K_I = K_P \cdot \omega_0 = 1,66 \cdot 0,07 = 0,1162 \tag{5.5}$$

Постоянная интегрирования:

$$T_1 = \frac{1}{K_P} = \frac{1}{0,1162} = 8,6\text{с} \tag{5.6}$$

Тогда передаточная функция регулятора:

$$W_{РЕГ}(p) = 1,66 + \frac{1}{8,6p} \tag{5.7}$$

В программном пакете Matlab строим АФХ объекта без учета запаздывания [102] (рисунок 5.6) и с запаздыванием (рисунок 5.7).

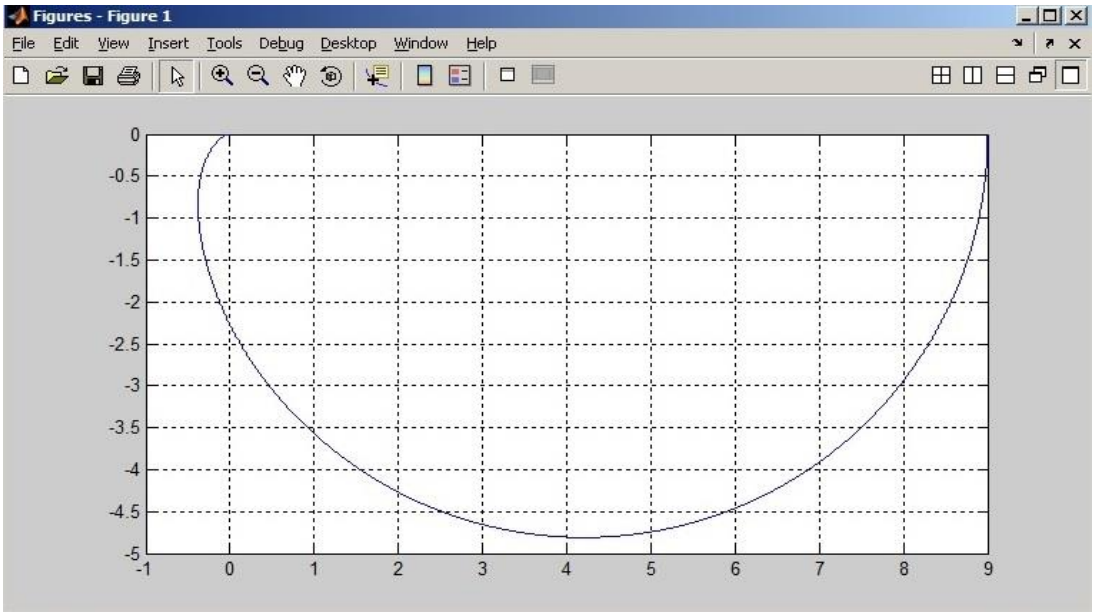


Рисунок 5.6- АФХ объекта без учета запаздывания [102]

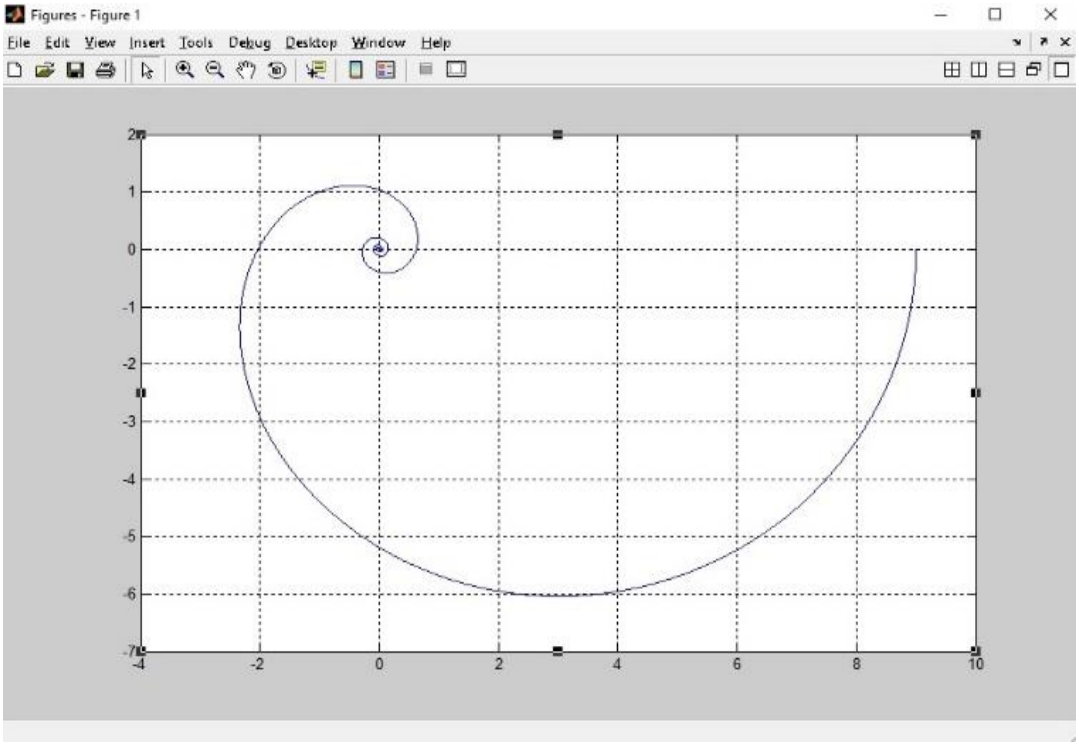


Рисунок 5.7 - АФХ объекта с учетом запаздывания [102]

Как видно из АФХ объекта с учетом запаздывания, годограф охватывает точку [-1; j0]. При этом определение реальной устойчивости объекта по АФХ сложнее, чем по логарифмическим АЧХ и ФЧХ (диаграмме Боде) полной системы с регулятором. Поэтому, в моделирующем комплексе Simulink [102] программного пакета Matlab строим модель разомкнутой системы. ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы приведены [102] на рисунок 5 8.

По диаграмме видно, что, при коэффициенте передачи равном единице (где ЛАЧХ пересекает нулевую линию), соответствующая точка на ЛФЧХ находится на уровне менее -135°. Т.е. запас по фазе разомкнутой системы с ПИ-регулятором составляет около 50° при наличии в системе транспортного запаздывания величиной 6 секунд [102] температуры аэросмеси представлен на рисунок 5.9, график переходного процесса [102] представлен на рисунок 5.10.

На графике (рисунок 5.8) видно небольшое перерегулирование, порядка 20%, обусловленное скачком задания. Длительность переходного процесса 9,53 с, при этом, зона установившегося значения в Simulink, по умолчанию, ±2,5 %, в отличие от принятых в отечественной практике [102] ±5 % [107]. Показатели качества САР температуры аэросмеси приемлемые [102].

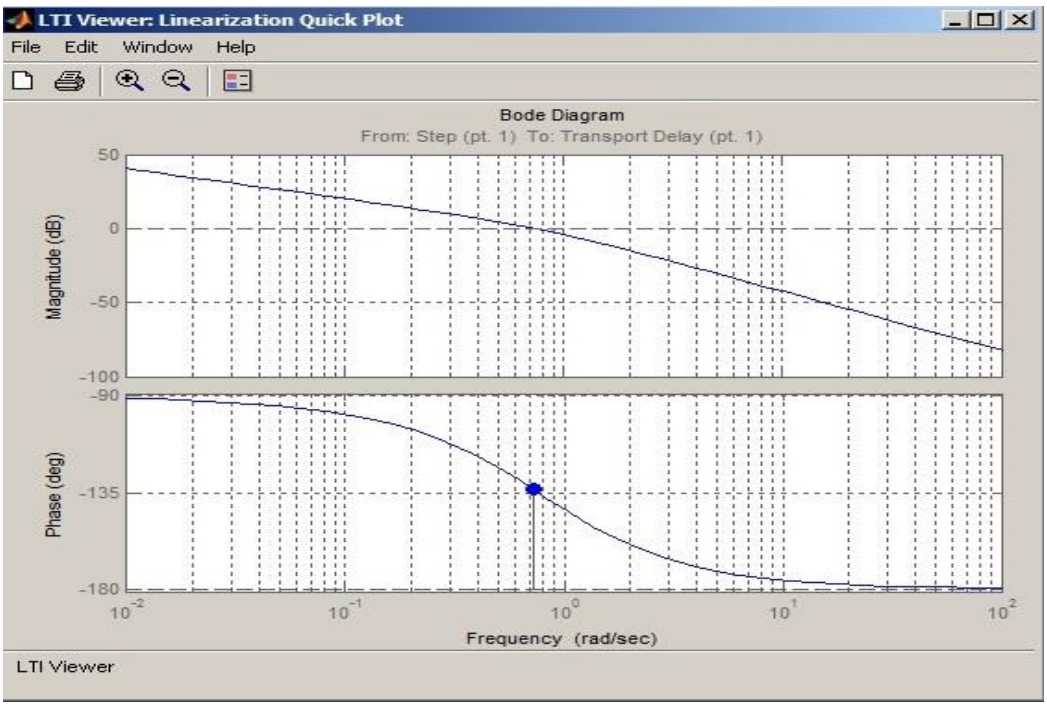


Рисунок 5.8 - ЛАЧХ и ЛФЧХ объекта (диаграмма Боде) [102]

-

Общий вид модели замкнутой САР температуры аэросмеси представлен на рисунке 5.9 [102]

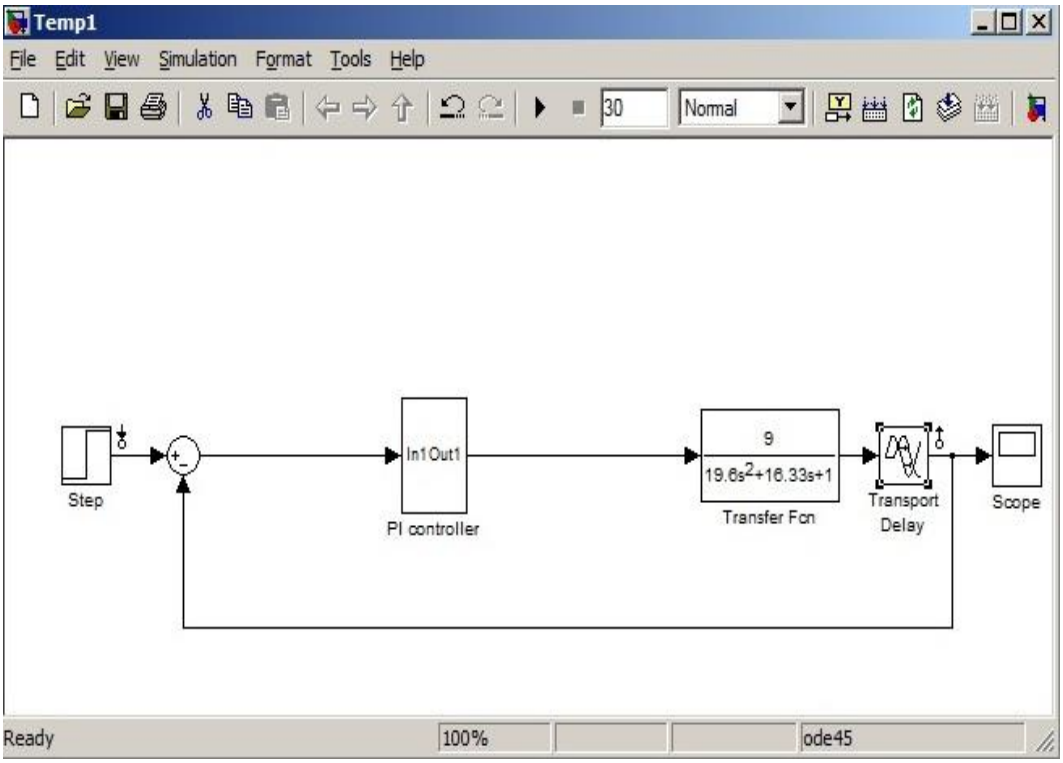


Рисунок 5.9 - Общий вид модели, замкнутой САР [102] температуры аэросмеси

График переходного процесса САР температуры аэросмеси представлен на рисунке 5.10

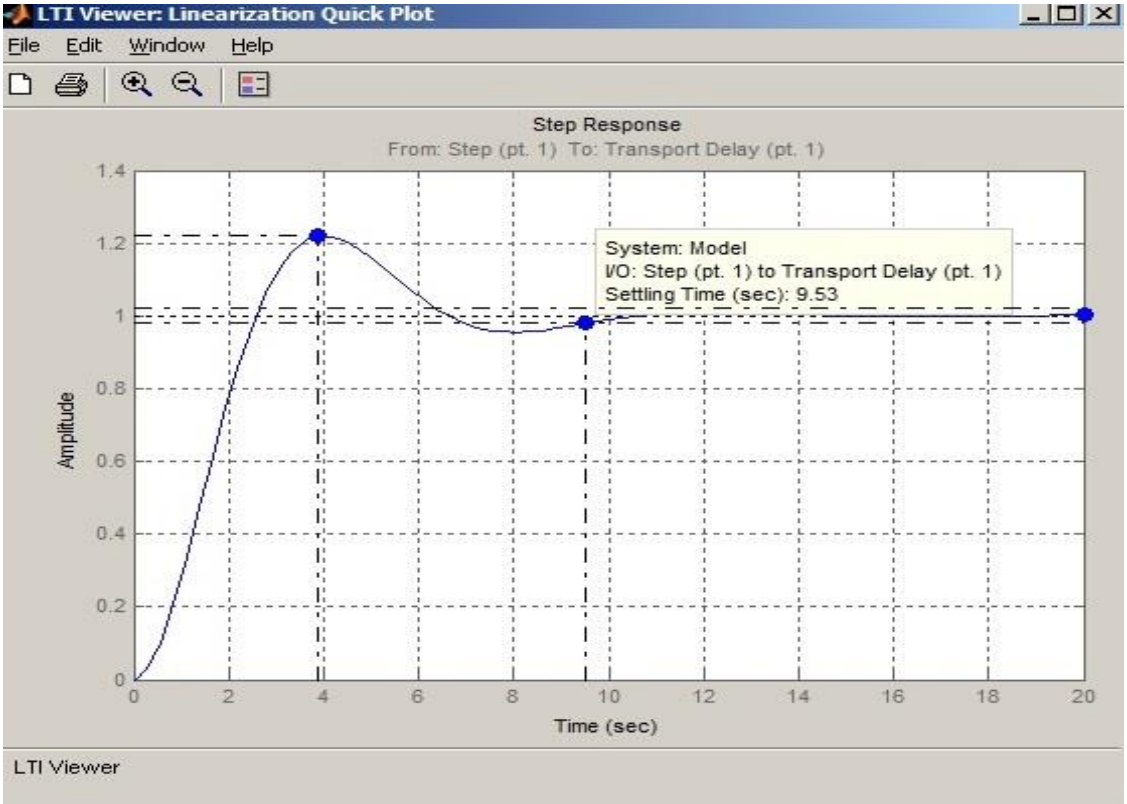


Рисунок 5.10 - График переходного процесса САР температуры аэросмеси

5.5.3 Регулятор разряжения перед ШБМ

Постоянное время (Т) запаздывание и транспортное (τ) являются ключевыми параметрами при проектировании регулятора. Постоянное время (Т) указывает на то, как быстро система регулирует на изменения в управляющем сигнале. Чем меньше постоянное время, необходимое для транспортировки угля в мельницу. На основе этих параметров проведено моделирование работы системы с помощью симуляции и оценены ее поведения в различных условиях под разными воздействиями [102].

Для автоматизации контура регулирования разряжения перед шаровой барабанной мельницей и определения динамических параметров объекта регулирования на номинальную частоту вращения 1450 об/мин [102].

Транспортное запаздывание τ определялось с момента запуска до момента начала роста разряжения по местному прибору и составило около 5 с. Постоянная времени объекта Т составляет, как известно, 63% для апериодического звена первого порядка [102]. Номинальное разряжение составляет 20 мм.вод.ст. или 200 Па и является установившимся значением. 63% от 200 Па составляет 126 Па. При определении постоянной времени объекта Т,

замерялось время достижения 126 Па с момента запуска мельничного вентилятора [102].

Таким образом: транспортное запаздывание τ=5 с; постоянная времени объекта T=18 с [102].

В программном пакете Matlab строим АФХ объекта без учета запаздывания [102], рисунок 5.11.

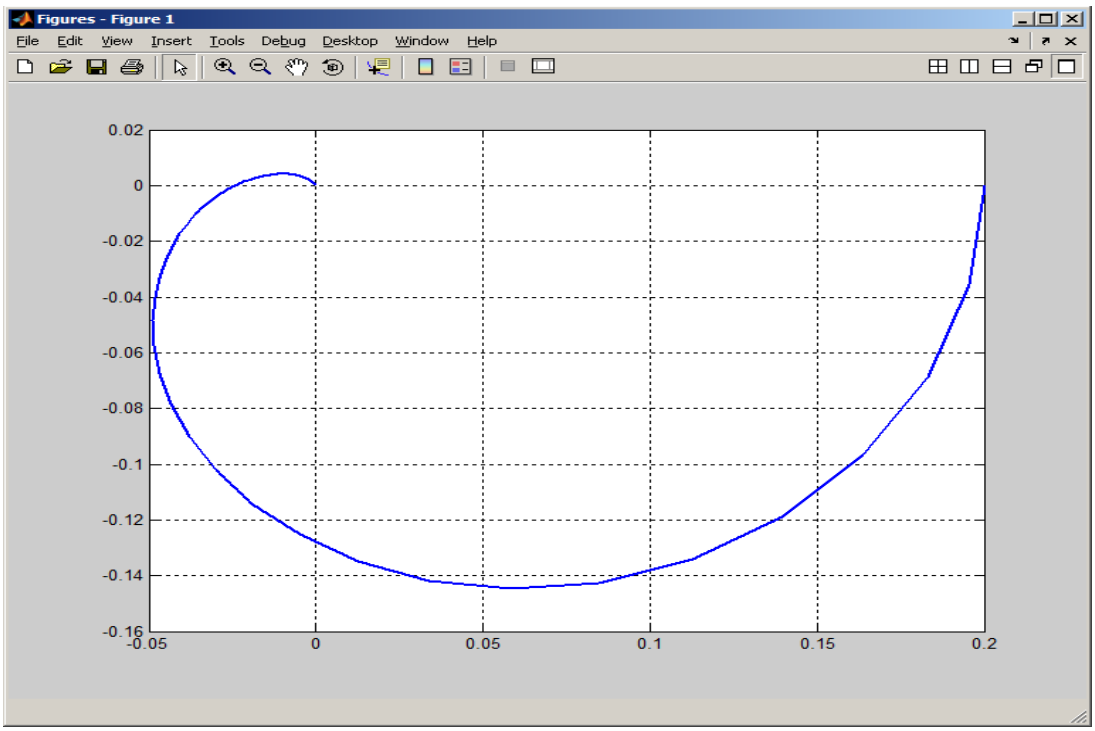


Рисунок 5.11 - АФХ объекта без учета запаздывания [102]

В моделирующем комплексе Simulink программного пакета Matlab строим модель разомкнутой системы. ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы [102] рисунок 5.12. По диаграмме видно, что, при коэффициенте передачи равном единице (где ЛАЧХ пересекает нулевую линию), соответствующая точка на ЛФЧХ находится на уровне менее -110°. Запас по фазе разомкнутой системы с ПИ-регулятором составляет около 77° при наличии в системе транспортного запаздывания величиной 5 секунд. Замкнем систему и получим график переходного процесса [102].

График переходного процесса [102] который представлен на рисунке 5.14. На графике видно небольшое перерегулирование, порядка 15 %, обусловленное скачком задания. Длительность переходного процесса 127 с, при этом, зона установившегося значения в Simulink, по умолчанию, ±2,5 %, в отличие от принятых в отечественной практике ±5 %. В зону ±5 % график входит менее, чем за 90 с [102].

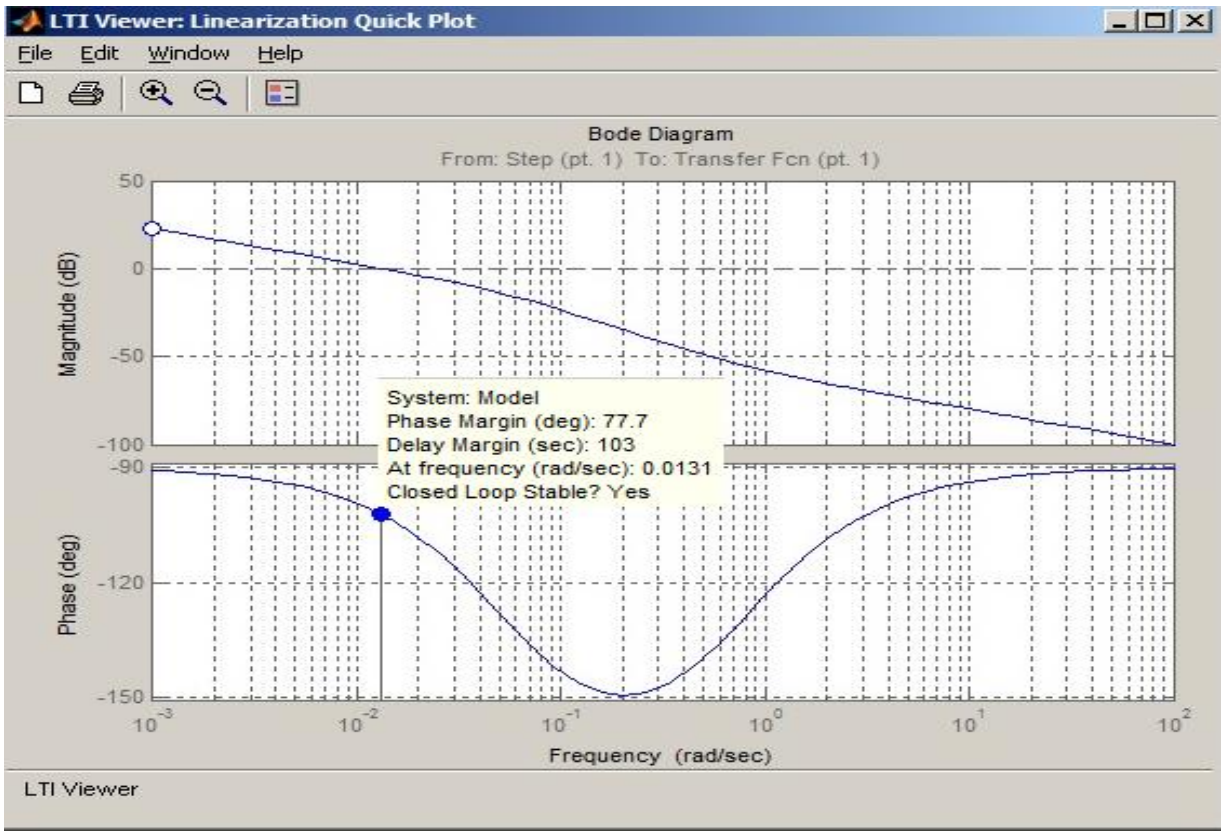


Рисунок 5.12 - ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы (диаграмма Боде) [102]

Общий вид модели, замкнутой САР разряжения перед ШБМ [102] представлен на рисунке 5.12

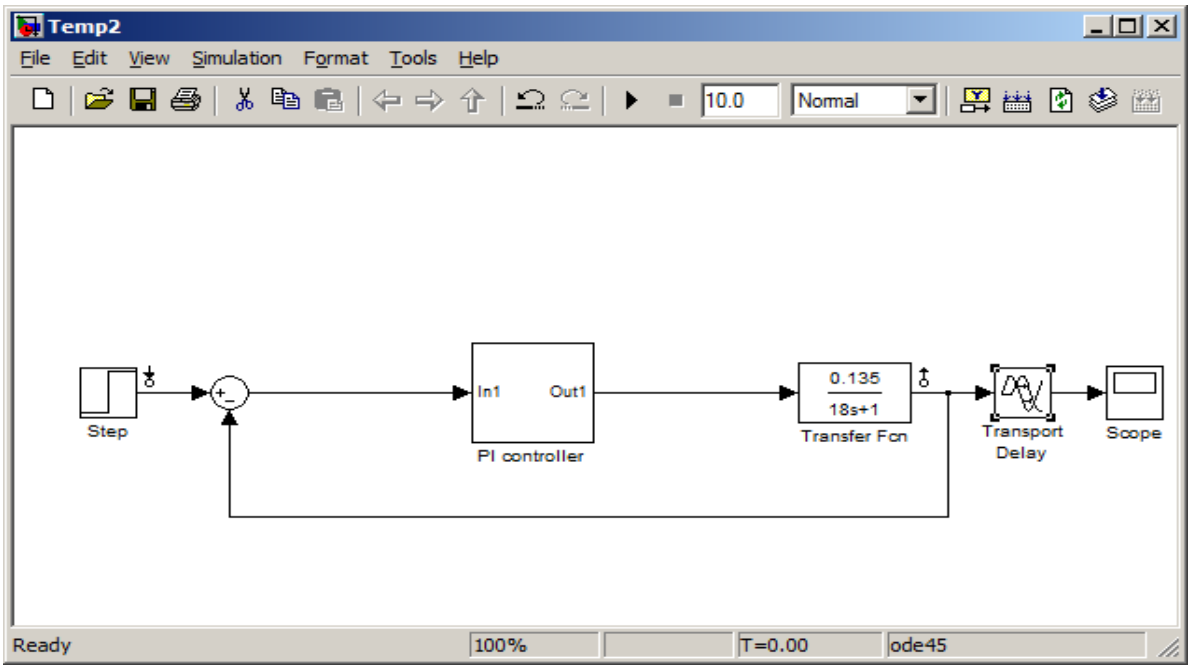


Рисунок 5.13 - Общий вид модели, замкнутой САР разряжения перед ШБМ [102]

График переходного процесса [102] представлен на рисунке 5.14.

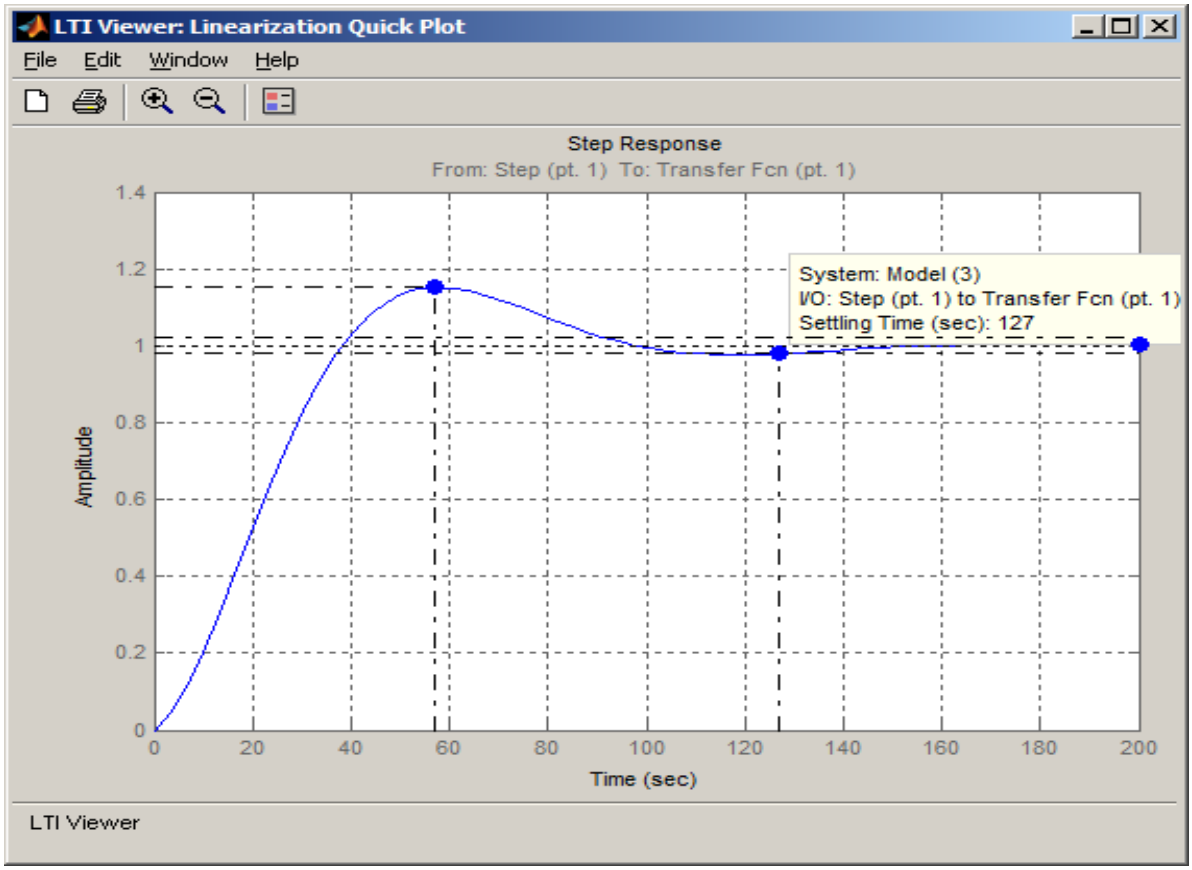


Рисунок 5.14 - График переходного процесса САР разряжения перед ШБМ [102]

5.5.4 Система автоматического регулирования (САР) загрузки ШБМ

Величина топливной загрузки мельницы не поддается непосредственному измерению и может быть определена лишь косвенно одним из трех методов:

1) по перепаду давления в мельнице $H_м$;
2) по уровню пыли в барабане;
3) по шуму шаров.

Третий метод не получил распространения. Определение топливной загрузки по $H_м$ является наиболее простым и надежным способом и широко используется персоналом электростанций при ручном управлении пылесистемами. Так как $H_м$ зависит не только от топлива, но и от скорости сушильного агента в барабане. Отклонения воздушного режима при такой схеме не нарушают процесса регулирования загрузки, который в этом случае осуществляется одним регулятором.

Объектом управления данной системы регулирования является мельничный вентилятор, который имеет следующие основные параметры:

Производительность Q=60000 м^3/час;

Напор H=1190 мм.вод.ст=11900 Па;

Мощность электродвигателя P=630 кВт;

Напряжение электродвигателя (3 фазы) U=6000 В;

Ток электродвигателя I=70 А;

Частота вращения электродвигателя n=1480 об/мин.

Выбираем тип привода – частотный преобразователь, питающий электродвигатель мельничного вентилятора. На рисунке 5.15 представлена таблица для выбора преобразователя подходящего диапазона электрических параметров из каталога фирмы ABB [116].

Параметры двигателя					Параметры преобразователя				
Без пере-грузки *	Номинальное значение *		Небольшая перегрузка *		Тяжелый режим *		Тип привода **	Полная мощность	Типо-размер
$P_{cont.\ max}$	$I_{cont.\ max}$	I_{max}	P_N	I_N	P_{hd}	I_{hd}			
кВт	А	А	кВт	А	кВт	А		кВА	
					6 000 В ***				
275	33	36	250	30	183	22	ACS 2060-1x-AN1-a-0D	344	A02
347	42	46	315	38	231	28	ACS 2060-1x-AN1-a-0E	434	A04
390	47	52	355	43	260	31	ACS 2060-1x-AN1-a-0G	488	A06
440	53	58	400	48	293	35	ACS 2060-1x-AN1-a-0J	550	A08
495	60	65	450	54	330	40	ACS 2060-1x-AN1-a-0L	619	A10
550	66	73	500	60	367	44	ACS 2060-1x-AN1-a-0N	688	A12
616	74	82	560	67	411	49	ACS 2060-1x-AN1-a-0Q	770	A14
693	83	92	630	76	462	56	ACS 2060-1x-AN1-a-0S	866	A16
781	94	100	710	85	521	63	ACS 2060-1x-AN1-a-0U	976	A18
800	96	100	730	87	533	64	ACS 2060-1x-AN1-a-0V	1 000	A20
880	108	116	800	96	587	71	ACS 2060-2x-AN1-a-0W	1 100	A23
990	119	131	900	108	660	79	ACS 2060-2x-AN1-a-0Y	1 238	A24
1 100	132	146	1 000	120	733	88	ACS 2060-2x-AN1-a-1A	1 375	A26
1 232	148	163	1 120	135	821	99	ACS 2060-2x-AN1-a-1C	1 540	A28
1 386	167	183	1 260	152	924	111	ACS 2060-2x-AN1-a-1E	1 733	A30
1 562	188	200	1 420	171	1 041	125	ACS 2060-2x-AN1-a-1G	1 953	A32

Рисунок 5.15 - Каталог преобразователей ABB [117]

По каталогу выбираем подходящий преобразователь, ориентируясь на параметры двигателя с запасом. Выбираем частотный преобразователь ACS 2060-1x-AN1-a-OS, подходящий для работы с электродвигателем мощностью 693 кВт, 6 кВ, 83 А (на рисунок 5.17 помечен выделением). Полная мощность преобразователя 866 кВт [117].

Выбираем питание без трансформаторного типа. Структура преобразователя представлена на рис. 4.20 [117].

Для автоматизации всего комплекса оборудования приготовления угольной пыли выбираем программируемый логический контроллер (ПЛК) Siemens серии 416-3, рисунок 5.16. Этот же ПЛК будет управлять частотным приводом мельничного вентилятора [117].

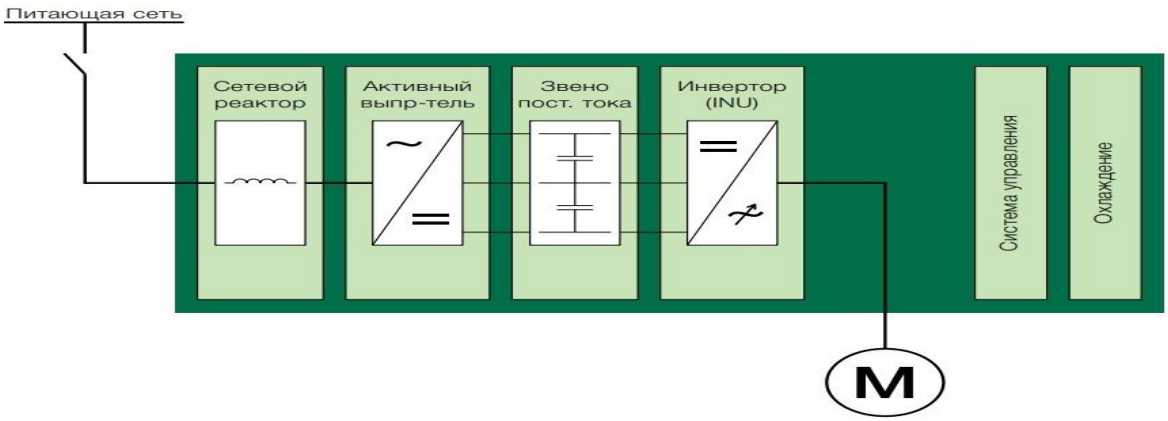


Рисунок 5.16 - Структура преобразовательного агрегата [117].

CPU 416-3 и CPU 416-3 PN/DP предназначены для построения систем управления высокой производительности, предъявляющих повышенные требования к объему памяти программ и скорости выполнения инструкций.

Встроенные интерфейсы PROFIBUS DP центральных процессоров CPU 416-2 и CPU 416-3 позволяют использовать контроллер в системах распределенного ввода-вывода с поддержкой функций ведущего или ведомого DP устройства [118].

CPU 416-3 и CPU 416-3 PN/DP оснащены отсеком для установки модуля IF 964-DP, выполняющего функции ведущего устройства PROFIBUS DP.

CPU 416-3 PN/DP дополнительно оснащен встроенным интерфейсом PROFINET с 2-канальным коммутатором реального масштаба времени на базе специализированной микросхемы ERTEC 400. Этот интерфейс позволяет использовать контроллер в системах PROFINET IO, PROFINET CBA, а также для открытого обмена данными через TCP/IP, UDP и ISO на TCP [118].

Согласно специфике работы частотных преобразователей, единственный контур регулирования – контур скорости электродвигателя имеется в самом частотном преобразователе. Частотный преобразователь, в режиме теста, определяет параметры электродвигателя и рекомендуемые значения регулятора. В контроллере остается только задатчик скорости, можно создать дополнительные контуры регулирования, внешние, по отношению к контуру скорости. Ограничение потребления тока можно достичь в паре частотный преобразователь - контроллер. Преобразователь выдает все фактические параметры работы: ток (А), частота (Гц), скорость вращения (об/мин) и контроллер может их считывать, в режиме реального времени, по сети Profibus DP. Таким образом, необходимо управлять контуром скорости частотного преобразователя, из контроллера, с ограничением по верхнему токовому пределу.

5.5.5 Система контроля уровня в бункере готовой пыли

Размеры бункера: длина 6 м; ширина 6 м; высота 12 м, объем 430 м^3.

Насыпная плотность свеженасыпанной пыли находится в пределах 500-700 кг/м^3, а уплотненной 800-900 кг/м^3 [119, 120]. Таким образом, содержимое полностью заполненного бункера имеет массу m=387 т. Вместе с бункером, принимаем полную массу 400 т. Для измерения необходимо иметь 4 тензометрических датчика, расположенных под углами бункера, каждый номиналом не менее 100 т. Выбираем тензорезистивные датчики канадской фирмы Kelk [119, 120], специализирующейся на изготовлении датчиков для металлургии и тяжелых условий эксплуатации. Датчик выполняется из цельной поковки высокопрочной легированной стали. В полости датчика находится электрический мост Уитстона из четырех резисторов. Деформации корпуса датчика соответствует деформация резисторов и, соответствующее весовой нагрузке, изменение электрического сопротивления. Полость датчика заполнена

инертным газом. Кабель неразъёмно подключен к датчику и защищен бронированной оболочкой [121]. Внешний вид датчика представлен на рисунке 5.17.

Рисунок 5.17 - Тензорезисторный датчик силы (веса) фирмы Kelk, паспорт тензорезисторного датчика Kelk

Номинальные значения сопротивления резисторов измерительного моста датчика уникальны для каждого датчика, поэтому каждый датчик имеет свой паспорт [121].

Выбираем датчики серии DLC200, максимальная нагрузка которых составляет 2000 кН (200 тонна-сил), что в два раза превышает необходимые 100 тонн для каждого датчика [121].

Основные параметры датчика DLC200:

1. Диапазон измерения: 0…2000 кН;
2. Время отклика: менее 0,1 с;
3. Питание: не более 15 вольт постоянного или переменного тока;
4. Сопротивление моста: минимум 120 Ом;
5. Выход: 1,0-1,8 милливольт на каждый вольт питания при номинальной нагрузке (2000 кН);
6. Точность калибровки: ±0,1% от номинала (2000 кН) [121];
7. Гистерезис: в пределах 0,3% от номинала (2000 кН);
8. Температурный дрейф нуля: в пределах 0,005% от номинала (2000 кН);
9. Рабочая температура: 0-150°С;
10. Механическая деформация при номинальной нагрузке (2000 кН): 0,1% от высоты датчика;
11. Допустимые перегрузки: 300% от номинала (2000 кН) без дрейфа нуля; 500% без изменения рабочей характеристики; 700% без механического повреждения [121].

5.6 Выводы по разделу

Поддержание заданных параметров процесса позволяет увеличить производительность мельниц и снизить удельный расход электроэнергии.

По заданным условиям системы пылеприготовления ТЭЦ-2 АО «АМТ», разработан алгоритм АСУТП в виде блок – схемы, которые описывают

получение информации возникающих в процессе эксплуатации. САР и оптимизации ШБМ позволяет повысить эффективность работы мельницы, в котором предусмотрено несколько различных рабочих режимов. Использование само настраивающего микропроцессорного регулятора САР ШБМ позволит повысить эффективность процесса размола твердого топлива.

Экспериментальным путем была снята кривая разгона для автоматизации контура регулирования температуры аэросмеси шаровой барабанной мельницы (ШБМ) и определены динамические параметры объекта регулирования. Задание на клапан подачи горячего воздуха было увеличено, скачком, на 5 % и зафиксирована начальная температура на выходе ШБМ. Полученные данные, для удобства последующей обработки, были приведены к нулю (задание от 0 % и рост температуры от 0ºС).

Для автоматизации всего комплекса оборудования приготовления угольной пыли выбран программируемый логический контроллер (ПЛК) Siemens серии 416-3, который будет управлять частотным приводом мельничного вентилятора.

Для измерения уровня угольной пыли в бункере готовой пыли, выбраны 4 тензометрических датчика, расположенных под углами бункера, каждый номиналом не менее 100 тонн канадской фирмы Kelk [121], полость датчика заполнена инертным газом. Возможно подключение датчиков к контроллеру без использования оригинальной электроники, питание датчика осуществляется путем подачи стандартного тока 20 миллиампер из модуля аналоговых выходов контроллера в питающую диагональ моста датчика [121].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены способы улучшения основных показателей шаровых барабанных мельниц системы пылеприготовления ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» и возможности снижения затрат электроэнергии на размол каменных углей (Карагандинский промпродукт низкосортный, Экибастузский и Шубаркольский каменные угли), сжигаемых на электростанциях Казахстана.

1. В результате анализа литературных источников, патентных поисков и изучения опыта сжигания каменных углей в условиях ТЭЦ-2 АО «АМТ» выявлены недостатки системы пылеприготовления ТЭЦ-2 и предложены мероприятия по улучшению качества работы топливоподачи и пылеприготовительной системы, например, эффективность размола, энергопотребление, надежность оборудования

2. В целях оптимизации работы топливного тракта и пылеприготовительной системы ТЭЦ проведены тепловые и термодинамические расчеты, основанные на расчетах потерь энергии основных подсистем и позволяющие определить анализ минимизации потерь энергии и повышении общей эффективности. Анализ расчетных характеристик системы подготовки твердого топлива с учетом предложенных мероприятии по улучшению работы технологического цикла топливоподачи, сушки и размола повысить общий эксергетический КПД от 23,5 % до 28,3 %.

3. Для совершенствования работы топливного тракта разработано устройство для предварительного дробления, позволяющее устранять подачу негабаритного топлива из открытых складов и повышать производительность подачи угля заданной фракции в бункера сырого угля (подтверждено патентом на полезную модель №546 РК и актами внедрения в цикл работы ТОО «Кардробсервис» и ТЭЦ-2 АО «АМТ».

4. В поисках улучшения основных показателей шаровых барабанных мельниц и прогнозирования зависимости характеристик угольной от режимных параметров работы мельницы создана физическая модель шаровой барабанной мельницы на основе использования программного обеспечения «EDEM», позволяющая варьировать степень загрузки шаровой мельницы мелющими шарами различных диаметров и исследовать зависимость коэффициента полезного действия процесса от следующих параметров: размеров барабана (отношение L/D), шаровой загрузка барабана, скорости вращения барабана, время размола топлива, свойств угля. Оптимальная производительность мельницы на физической модели достигается при увеличении скорости вращения барабана ближе к критическому и при небольшой загрузке шарами =0,2 с диаметром мелющих шаров 30 и 40 мм и частоте вращения барабана n=64 об/мин.

5. Проведены экспериментальные исследования влияния различных параметров работы мельниц на энергетические характеристики процесса размола на двух реальных моделях ШБМ (установка с лабораторной шаровой

мельницей в АУЭС, установка с шаровой мельницей открытого типа и… в КарИУ). Установлены характеры измельчения топлива ударами шаров и истиранием между шарами с большой достоверностью результатов. Доказано, что эффективная тонина помола R_{90} исследуемых образцов углей достигается при степени заполнения шарами φ=0,30, диаметром 30 мм. Результаты, полученные в результате модельных и физических экспериментов, качественно и количественно согласуются между собой, относительная погрешность в определении тонины помола и расхода электроэнергии в пределах 2 и 3% с доверительной вероятностью 0,95.

6. В результате применения методов математического планирования многофакторного эксперимента с центральным композиционным планом рототабельным планом (ЦКРП 2^4) получены уравнения регрессии в кодированном и натуральном виде $Q, P, S = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ для производительности мельницы, потребляемой мощности приводом мельницы, удельной поверхности угольной пыли, позволившие оценить влияние исследуемых факторов, характеризующих режимные параметры мельницы x_1, x_2, x_3, x_4.). Математическое планирование позволяет оценить эффективность взаимодействия основных факторов факторов для формирования уровней параметров оптимизации.

7. Поддержание заданных параметров процесса подготовки топлива, позволяет увеличить производительность мельниц и снизить удельный расход электроэнергии. По заданным условиям системы пылеприготовления ТЭЦ-2 АО «АМТ», разработан алгоритм АСУТП в виде блок – схемы, которые описывают получение информации возникающих в процессе эксплуатации. САР и оптимизации ШБМ позволяет повысить эффективность работы мельницы, в котором предусмотрено несколько различных рабочих режимов.

8. Полученные результаты расчетно-экспериментальных исследовании на модели шаровой барабанной мельнице внедрены в учебный процесс АУЭС и КарИУ, а также внедрено устройство для дробления угля на предприятии Кардробсервис г. Караганда. На предприятии ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» рассмотрена возможность внедрение результатов исследования диссертационной работы (подтверждены актом о возможном внедрении и протоколом ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» на научно-техническом семинаре).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Айзен Б.Г. и др. Горелочные устройства котлов ЗиО/ Б.Г. Айзен, И.Е. Ромашко, И. А. Сотников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. -144 с.. ил.
2. Назмеев Ю.Г. Мингалеева Г.Р. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: Справ. Пособие / Ю.Г. Назмеев, Г.Р. Мингалеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2005. – 480 с.
3. Лебедев А. Н. Подготовка и размол топлива на электростанциях: производственно-практическое издание / А.Н. Лебедев. - М.: Энергия, 1969. - 520 с.: ил.
4. Соколов Н. В. Кисельгоф М.Л. Расчет и проектирование пылеприговительных установок котельных агрегатов (Нормативный метод). Выпуск 32, 1971.-309 с.
5. Жуков Н. П., Чех А.С. др. Определение гранулометрического состава твердых топлив ситовым методом: лабораторная работа // Тамбов: Изд-воТамб. гос. техн. ун-та., 2007. – с.12.
6. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. М: Энергоатомиздат, 1990. -384 с.
7. Ощепков В. В. Повышение энергоэффективности систем пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами при работе на непроектных углях: дис. …по ВАК РФ 05.14.14, канд. тех. наук.
8. Ромадан В.П. Пылеприготовление / В.П. Ромадан. – Л.: ГЭИ, 1953 – 519 с.
9. Лузин П.М., Маслов В.Е. Выбор оптимальных систем подготовки топлива к сжиганию // Сб. НПО ЦКТИ - 1981. - С.3-12.
10. Калмыков Д.Е. Маликова А.Д. Загнанные в уголь. Обзор угледобыча и угольная энергогенерация в Казахстане. Состояние и перспективы. Центр по внедрению новых экологически безопасных технологий CINEST. Караганда 2017.
11. Мингалеева Г.Р., Зацаринная Ю.Н., Вачагина Е.К. Анализ работы системы подготовки топлива пылеугольной ТЭС Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2005. № 1-2. С. 22-31. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12197953 (2)
12. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. -М.: Наука, 1971. – 358 с. (3)
13. 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.
14. Новосельцева С.С. Повышение эффективности сложных технологических систем измельчения путем их структурной оптимизации: Дис… канд. техн. наук. – Иваново, 1999.
15. Мингалеева Г. Р., Зацаринная Ю.Н., Цышевский Р. В. Эффективность подготовки твердого топлива на тепловых электростанциях и пути ее повышения

// Материалы докладов V Международного симпозиума «Ресурсоэффективность. Энергосбережение». Казань, 1 – 3 декабря 2004г.

16. Ханин С.И. Разработка научных основ проектирования шаровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами / С.И. Ханин: дис. … канд. техн. наук. Белград, 2016.

17. Хахалев П.А. Совершенствование конструкции ступенчатой футеровки и исследование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице: дис. … канд. тех. наук. - Белгород, 2017.

18. Эстеркин Р.И. Промышленные котельные установки. Учебник для техникумов, 2-е издание, перераб. и доп., Ленинград.: Энергоатомиздат, 1985. - 400 с.

19. Теплогенерирующие установки: Учеб. для вузов. Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. М.: Стройиздат, 1986. -356 с.

20. Еремин Н. Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалом: Учеб. для вузов по спец. «Пр-во строит, изделий и конструкции». — М.: Высш. шк., 1986. - 280 с.: ил.

21. Бирюков А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учебное пособие / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2014. – 232с.

22. Камарова С.Н., Абильдинова С.К., Джунусова Л.Р. Анализ существующего состояния энергооборудования и баланса мощности ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» / Вестник АУЭС № 4(6) (43), Алматы, 2018. – 16 с.

23. Сидельковский Л. Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий / Учебник для вузов. – 3 изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 528 с.

24. Зацаринная Ю.Н. Анализ структуры, тепловой и термодинамической эффективности индивидуальных систем пылеприготовления для ТЭС: дисс. … по ВАК РФ 05.14.14 - Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты. Казань 2005, - 135 с.

25. Карпова К.А., Шамсутдинов А.Р. Система топливо приготовления для пылеугольных горелок. Аллея науки. 2017. Т. 4. № 10. С. 138-144.

26. Борщевский А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. / А.А. Борщевский, А.С. Ильин // t- М.: Высшая школа, 1987.- 376с.

27. Мингалеева Г. Р. Эффективность работы промышленных теплоэнергетических систем при увеличении доли использования твердого топлива: дисс. …канд. техн. наук. Казань 2005, - 135 с.

28. ОСТ 34 38.963-88 - Мельницы углеразмольные. Ремпригодность. Общие требования.

29. Назмеев Ю.Г., Мингалеева Г.Р. Анализ тепловой и термодинамической эффективности систем пылеприготовления. Изв-ия Рос. академии наук. Энергетика. Казань, 2006 С. 106-112

30. Linch A. Dzh. Tsikly drobleniya i izmel'cheniya. Modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie: M. Nedra, 1981, 243 s.

31. Камарова С.Н., Абильдинова С.К., Расмухаметова А.С. Анализ работы системы подготовки топлива на примере ТЭЦ-2 г. Темиртау. Материалы Международной научно-технической конференции «I юбилейные чтения Бойко Ф.К.», посвященной его 100-летию, 21 февраля 2020 года. ПГУ им. С. Торайгырова. Г. Павлодар 2020 – С 245-249.

32. Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Абильдинова С.К. Исаев В.Л. Повышение эффективности системы пылеприготовителной установки АО «АрселорМиттал Темиртау» ТЭЦ-2 г. Темиртау // «Университет еңбектері – Труды университета» КарТУ 2(87), 2022. С. 297-301.

33. Лузин П.М., Маслов В.Е. Выбор оптимальных систем подготовки топлива к сжиганию // Сб. НПО ЦКТИ - 1981. - С.3-12.

34. ГОСТ 17070-2014 Межгосударственный стандарт. Угли.

35. https://ru.wikipedia.org/wiki/Карагандинская_ТЭЦ-2

36. Производственная техническая инструкция (ПТИ) 102-47-11. АО «АрселорМиттал Темиртау» ТЭЦ-2. Производственно-технологическая инструкция по эксплуатации системы пылеприготовления с шаровыми мельницами типа ШБМ-320/570. Темиртау 2011.-С.19.

37. Жихар Г. И. Котельные установки тепловых электростанций: [учебное пособие для вузов по специальностям "Тепловые электрические станции", "Паротурбинные установки атомных электрических станций"] / Г. И. Жихар. - Минск : Выс. шк., 2015. - 523 с.: ил.

38. Ноздренко Г.В. Н 781 Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭС с новыми технологиями: монография / Г.В. Ноздренко, П.А. Щинников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 190 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

39. Ноздренко Г. В. Эксергетический анализ теплоэнергетических установок / Г. В. Ноздренко. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1985. – 56 с

40. Мингалеева Г. Р., Зацаринная Ю.Н., Цышевский Р. В. Эффективность подготовки твердого топлива на тепловых электростанциях и пути ее повышения // Материалы докладов V Международного симпозиума «Ресурсоэффективность. Энергосбережение». Казань, 1 – 3 декабря 2004г. Левит, Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. М: Энергоатомиздат, 1990. -384 с.

41. Мингалеева Г.Р., Зацаринная Ю.Н., Назмеев Ю.Г. Последовательность расчета и термодинамическая эффективность индивидуальной системы подготовки угля с промежуточным бункером // Известия АН. Энергетика. 2006. №2. С. 67-73.

42. Камарова С.Н., Абильдинова С.К. Исследование термодинамической эффективности систем подготовки твердого топлива АО «АрселорМиттал Темиртау». V Всероссийская научно-практическая конференция. Энергетика и энергосбережение: Теория и практика // Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Кемерово, 2020.

43. Турлубек А. Существующее положение и проблемы при эксплуатации энергетического оборудования // Энергетика: журнал. - 2013. - № 3 (46). - С. 8-12.

44. Камарова С.Н., Абильдинова С.К., Исаев В.Л. Новое устройство для предварительного дробления угля на ТЭЦ-2 г. Темиртау // Сборник тезисов XI Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование». – Алматы, НАО «АУЭС», 2020 – С. 31-34.

45. Назмеев Ю.Г., Мингалеева Г.Р. Анализ тепловой и термодинамической эффективности систем пылеприготовления // Известия АН. Энергетика. 2006. № 6. - С. 108-114.

46. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности. М.: Издательство МЭИ. 2001.- 364

47. T. Srinivas, A.V.S.S.K.S. Gupta, B.V. Reddy and P.K. Nag. Parametric analysis of coal based combined cycle power plant // Int. J. Energy Res. 2006. V.30 pp. 19-36.

48. Хаарман К. Проходческие машины с ударным рабочим органом. – Глюкауф, 1974, №15, с.3-19; 1976, №1, с.3

49. Патент на полезную модель РК №5046, 2019/1145.2, 12.06.2020. Устойство для дробления угля // Патент РК № 2019/1145.2 от 25.12.2019г. Исаев В.., Камарова С. Н., [и др.].

50. Вязовикин В.Н. Гидромолоты как сменное оборудование к гидравлическим экскаватора. Строительные и дорожные машины, 1981, №6, с. 6-7.

51. Kuzev L. Penchev T. Karastoyanov D. New Shape Milling Bodies for Ball Mills., Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 61, Sofia, 2009, pp 11-20, ISSN 0204-9848.

52. Пивняк Г.Г. Измельчение, энергетика и технологии. М.: Руда и металлы, 2007. – 238 с.

53. Сайбель Э.Я, Гринпун Л.В., Иванов К.К. Уплотнение грунтов гидромолотами, механизация строительства, 1981, № 11, с. 13-14.

54. Жуков Н.П., Чех А.С. др. Определение гранулометрического состава твердых топлив ситовым методом: лабораторная работа // Тамбов: Изд-воТамб. гос. техн. ун-та., 2007. – с.12.

55. Борщов В.Я., Гусев Ю.И., Промтов М.А., Тимонин А.С. Оборудование для переработки сыпучих материалов учебное пособие /– М. : «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 208 с. – 400 экз. – ISBN 594275-298-2.

56. Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации // Интернет-журнал «Науковедение» Том 8, №2 (2016) http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN216.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/92TVN216.

57. Сосорбарамын Бат-Эрдэнэ. Исследование и выбор ресурсосберегающих параметров шаровой загрузки мельниц при измельчении

медномолибденовых рудтема: дисс…. по ВАК РФ 05.05.06, канд. технических наук, 2010.

58. Jankovic A., Dundar H., Mehta R. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metalurgy. - 2010. - С.141-146.

59. Байгереев С.Р. Обоснование параметров и создание конструкции роторно-вибрационного измельчителя с разработкой технологии изготовления / С.Р. Байгереев: дис. … док. фил. PhD. Усть-Каменогорск, 2019. – 90 с.

60. Гаврунов А. Ю. Вибровращательная мельница с продольно-поперечным движением мелющих тел: дисс... кандидата технических наук: 05.02.13 / Гаврунов Алексей Юрьевич. Место защиты: Белгородский государственный технологический университет им.В.Г.Шухова, - Белгород, 2014. - 167 с.

61. Кузнецова М.М., Ведь В.Е. Теоретические и экспериментальные исследования энергоэффективного процесса измельчения цементного клинкера в шаровой мельнице. Problemele energeticii regionale 2(25)2014, Ttermoenergetică

62. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. – 752 с.

63. Павлов И. И., Федоров М.Н., Котельные установки и тепловые сети 1№. Учебник для техникумов изд. 2-е перераб. И доп. – М.: Стройиздат, 1977. – 154 с.

64. Дмитрак Ю. В; Особенности движения мелющей загрузки в шаровой барабанной мельнице / Ю. В. Дмитрак, Е. Е. Балахтина // Изв. Вуз. Горный журнал. 2003; - № 2. - С. 54- 57.

65. Шувалов С. И. Повышение производительности пылесистем с шаровыми барабанными мельницами путем просеивания возврата / С. И. Шувалов, А. А. Веренин, П. Г. Михеев, Н. С. Асташов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2007. - № 4. - С. 65-68.

66. Труш А.М., Шаламов Р.В. Изучение и анализ мельницы нового поколения. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7-3 (18-3). С. 73-76

67. Беляков А. Н. Научные основы описания и совершенствования гетерогенных процессов на основе численных решений дискретных аналогов уравнения Больцмана: дис…канд. техн. наук. - Иваново, 2016.

68. Камарова С.Н., Абильдинова С.К. Оптимизация затрат электроэнергии на пылеприготовление в шаробарабанных мельницах Ш-25А ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау». Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 370-376

69. ГОСТ РТ 51568-99 (ИСО 3310-1:1990) «Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия».

70. ГОСТ 2093-82 Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава. Дата актуализации: 01.01.2021.

71. Khanin S. I., Starchenko D. N., Mordovskaya O. S. Determination of strength parameters of power exchange devices of ball mills using computer-aided design systems. Science and Business: ways of development. 2019, no. 11(101), pp. 86–93. [In Russ].

72. Абильдинова С.К., Камарова С.Н. Исследование максимальной эффективности процесса измельчения угля в шаровой барабанной мельнице // Материалы международной научно-практической онлайн конференции на тему «Современные информационные технологии и компьютерное моделирование систем». 8 июня 2021г. – Кызылорда: КУ имени Коркыт Ата, 2021. С/ 292 -301.

73. ГОСТ 7524-2015 Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. Технические условия издание. Москва, 2016 г.

74. Zheng Yu., Кузнецова М.М., Ведь В.Е., Алексина А.А. Экспериментальные исследования энергоэффективного режима измельчения твердых материалов. Журнал технической физики, 2016, Том 86, Вып. 5.

75. Дмитрак Ю. В; Особенности движения мелющей загрузки в шаровой барабанной мельнице / Ю. В. Дмитрак, Е. Е. Балахтина // Изв. Вуз. Горный журнал № 2, 2003. С. 54- 57.

76. Богданов В. С. Пути модернизации помольного оборудования. Перевод с открытого на замкнутый цикл измельчения / В. С. Богданов, Р. Р. Шарапов, Ю. М. Фадин // Информцемент. - М.: Изд-во ООО ≪Цемклуб≫.-2010.-№1-С. 5-19.

77. Алиярова М.Б., Джунусова Л.Р. «Специальные вопросы сжигания топлива». Методические указания к выполнению расчетно-графических работ для студентов специальности 5В071700 – Теплоэнергетика. – Алматы: АУЭС. 2013 – 37 с. https://libr.aues.kz/facultet/tef/kaf_pt/23/umm/pte_7.htm

78. Николаева В.И., Буваков К.В., Табакаев Р.Б. Методы исследования свойств твердых топлив: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 92 С.

79. ГОСТ 19242-73 Угли бурые, каменные и антрацит. Классификация по размеру кусков. Дата актуализации 2009-04-15.

80. Кузнецов А. В., Бутаков Е. Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 37–44.

81. Зах Р. Г. Котельные установки. М., «Энергия», 1968. - 352 с. С илл.

82. Толчинский Е. Н., Киселев В. А., Яковлева В. С., Демкин В. В. Анализ систем оценки взрывоопасности пыли натуральных топлив / - Электрические станции, 1996, № 7.

83. ГОСТ 6613-86 «Уголь. Методы определения зернового состава».

84. Айтмагамбетова Г. А. Технология подготовки топлива: методические указания к курсовой работе / Г. А. Айтмагамбетова. - Павлодар: Кереку, 2015.-32с.

85. Kamarova, S., Abildinova, S., Terziev, A. Study of the thermodynamic efficiency of solid fuel preparation systems of a thermal power plant based on an

exergy analysis of the operation of subsystems. E3S Web of Conferences 207, 0 (2020) PEPM'2020 2005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020702005

86. Обзор программных продуктов для симуляции движения мелющей загрузки в мельницах. https://scicenter.online/agregatyi-protsessyi-scicenter/obzor-programmnyih-produktov-dlya-simulyatsii-173863.html

87. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической тех-нологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. – 2-е, перераб. и доп. / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1985. – 327с.; ил.

88. Голдобин, Ю. М. Автоматизация теплоэнергетических установок учеб. пособие / Ю. М. Голдобин, Е. Ю. Павлюк. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 186 с.

89. Михеев, П.Г. Математическое моделирование движения частиц угля в барабане шаровой мельницы. / П.Г. Михеев, С.И. Шувалов // Тез. докладов Междунар. науч.-техн. конф. "Состояние и перспективы развития электротех-нологии" (XII Бенардосовские чтения). - Иваново, ИГЭУ. - 2005. - С. 167.

90. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю.П. Адлер, Е.В Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

91. Иванов В.Н. Численные методы исследования механических систем с дополнительными связями // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2015. – Том 31, Выпуск № 4.- С. 16-27.

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

93. Жуков В. П. Оптимальное распределение по крупности мелющих тел в барабанных мельницах / В. П. Жуков, С. Г. Ушаков // Интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов. - Иваново, 1987.-С. 40-43.

94. Богданов В. С. Расчет энергетических параметров взаимодействия мелющих тел в шаровых барабанных мельницах / В. С. Богданов, Н. Д. Воробьев, М. Ю. Ельцов, К. А. Юдин // Цемент. - 1990. - №12. - С. 18 - 22.

95. Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Веренин А.А., Ворошилов О.А. Математическая модель пылесистемы с шаровой барабанной мельницей для анализа схем классификации. «Вестник ИГЭУ» Вып. 5 2017 г. С.10-18.

96. Балахтина Е. Е. Исследование движения шаров в помольной камере барабанной мельницы с помощью численного моделирования / Е. Е. Балахтина, Ю. С. Дмитрак, Н. Н. Сычев // Изв. Вуз. Горный журнал. -2005. - № 12. - С. 198 - 204.

97. Zheng Yu., Кузнецова М.М., Ведь В.Е., Алексина А.А. Экспериментальные исследования энергоэффективного режима измельчения твердых материалов. Журнал технической физики, 2016, Том 86, Вып. 5.

98. Дмитрак Ю. В; Особенности движения мелющей загрузки в шаровой барабанной мельнице / Ю; В; Дмитрак, Е. Е. Балахтина // Изв. Вуз. Горный журнал № 2, 2003. С. 54- 57.

99. Рогов, В. А. Методика и практика технических экспериментов: учебное пособие для вузов / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М. : Академия, 2005. – 283 с.

100. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов: учебник для вузов / В. Г. Блохин, О. П. Глудких, А. И. Гуров, Н. А. Ханин; под ред. О. П. Глудких. - М. : Радио и связь, 1997. – 326 с.

101. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск.: ВО "Наука", Сибирская издательская фирма, 1993. - 240 с.

102. Камарова С.Н., Онищенко О.Н., Жабалова Г.Г., Леликова О.Н., Абильдинова С.К. Автоматическое регулирование разряжения шаровой барабанной мельницы ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау» // Вестник Торайгыров университет. ISSN ISSN 2710-3420 № 4 Павлодар, 2022, С. 139-151.

103. Федотов А.В. Управление оборудованием и технологическими процессами в ГПС: Учеб. пособие. Омск: Изд. ОмГТУ, 1999. 132

104. РД 153-34.0-35.119-2001 Объем и технические условия на выполнение технологических защит и блокировок систем пылеприготовления котельных установок.

105. Разумов К.А., Перов В.А., «Проектирование обогатительных фабрик», изд. «Недра», 2002.-С. 40-46.

106. Бородин И.Ф. Автоматизация технологического процесса и системы управления. –М.: Колос, 2006. – 352 с.: ил. – (Учебник и учеб. Пособия для средних учеб. заведений)

107. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. - 352 сУлитенко К.Я., Попов В.П. Автоматическая защита барабанных мельниц от перегрузок. Обогащение руд. № 2 - 2004.

108. ГОСТ 19.701-90 (ИСО 5807-85). ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения.

109. СТО 70238424.27.100.078-2009. Системы КИП и тепловой автоматики ТЭС. Условия создания. Нормы и требования.

110. Пистун Е., Заграй В., Николин Г. Автоматизация шаровых барабанных мельниц для ТЭС//СТА.-2017.-№3.-С.50-54.

111. Максимычев, О.И. М171 Программирование логических контроллеров (PLC): учеб. пособие / О.И. Максимычев, А.В. Либенко, В.А. Виноградов. – М.: МАДИ, 2016. – 188 с.

112. ГОСТ 51841-2001. Программируемые контроллеры. Общие положения и функциональные характеристики.

113. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Учебник для студентов вузов. — М.: МЭИ, 2016. - 352 с.

114. Система автоматического регулирования и оптимизации шаровых барабанных мельниц (САРиО ШБМ), Львов, 2005.

115. Каталог. Высоковольтные преобразователи частоты АББ ACS 2000

116. https://library.e.abb.com/public/89695a1140381bdcc12579df00238847/ACS%202000_brochure_RU_RevD.pdf

117. http://siemens.elcomplex.com/index.php?tree=1000000&tree2=9990284&tree3=5009999&tree4=5000005&tree5=5000008&tree6=5000014&tree7=5000019&tree8=5000074

118. http://adilet.zan.kz/rus/docs/P090000041_

119. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация. -М.: Изд. центр «Академия», 2007. -432с.

120. 37222-08: Датчики силоизмерительные тензорезисторные KELK https://kelk.com/

121. Камарова С.Н., Жабалова Г.Г., Онищенко О.Н., Леликова О.Н Система контроля уровня в бункере готовой угольной пыли ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау». Энергетика и энергоснабжения: теория и практика // Сборник материалов VII Межд. Науч.-прак. конф., Изд-во: КузГТУ, 2023

Приложение А

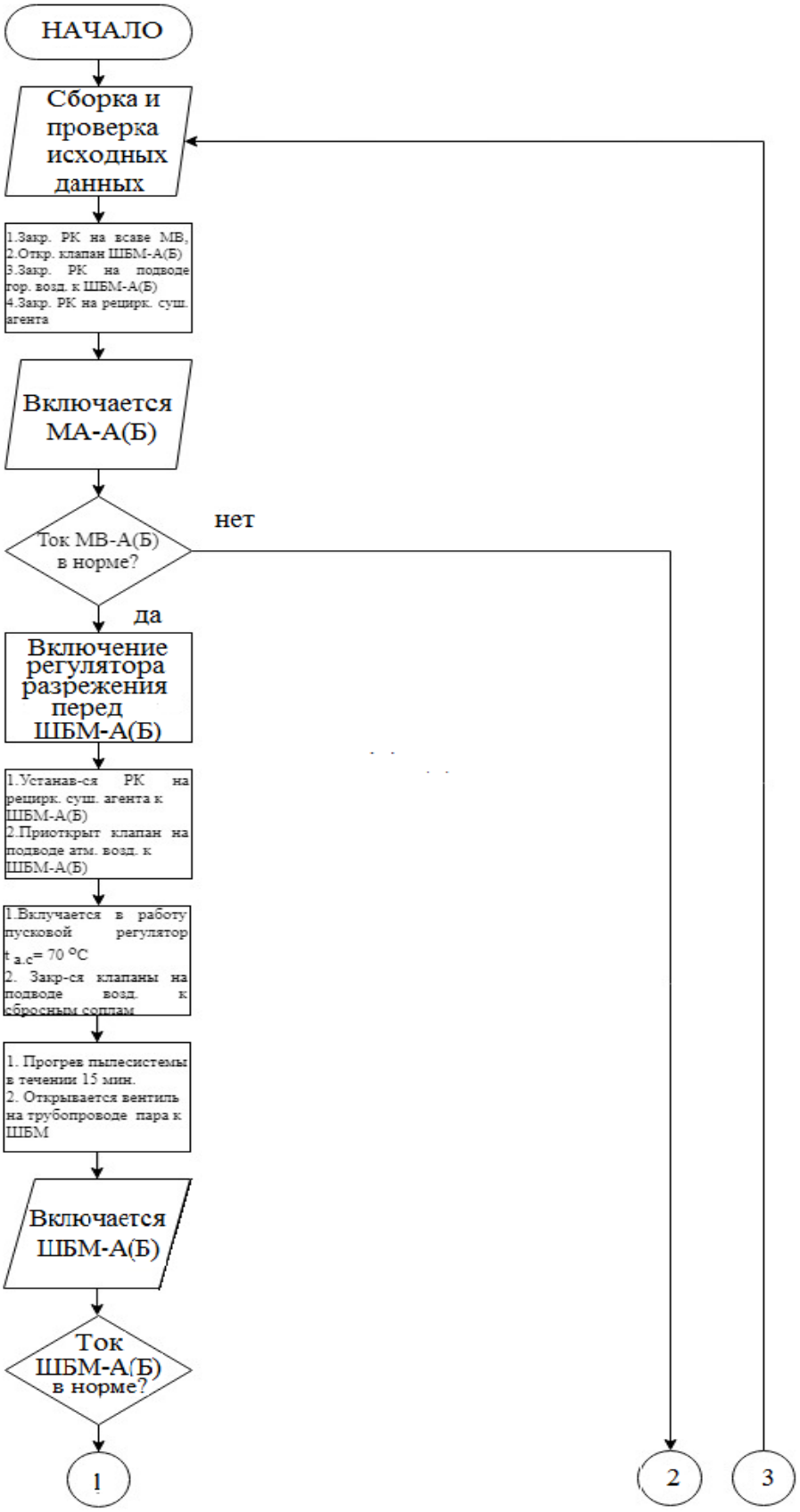


Рисунок А1 - Блок-схема алгоритма «Пуск пылесистемы А (Б)», лист 1

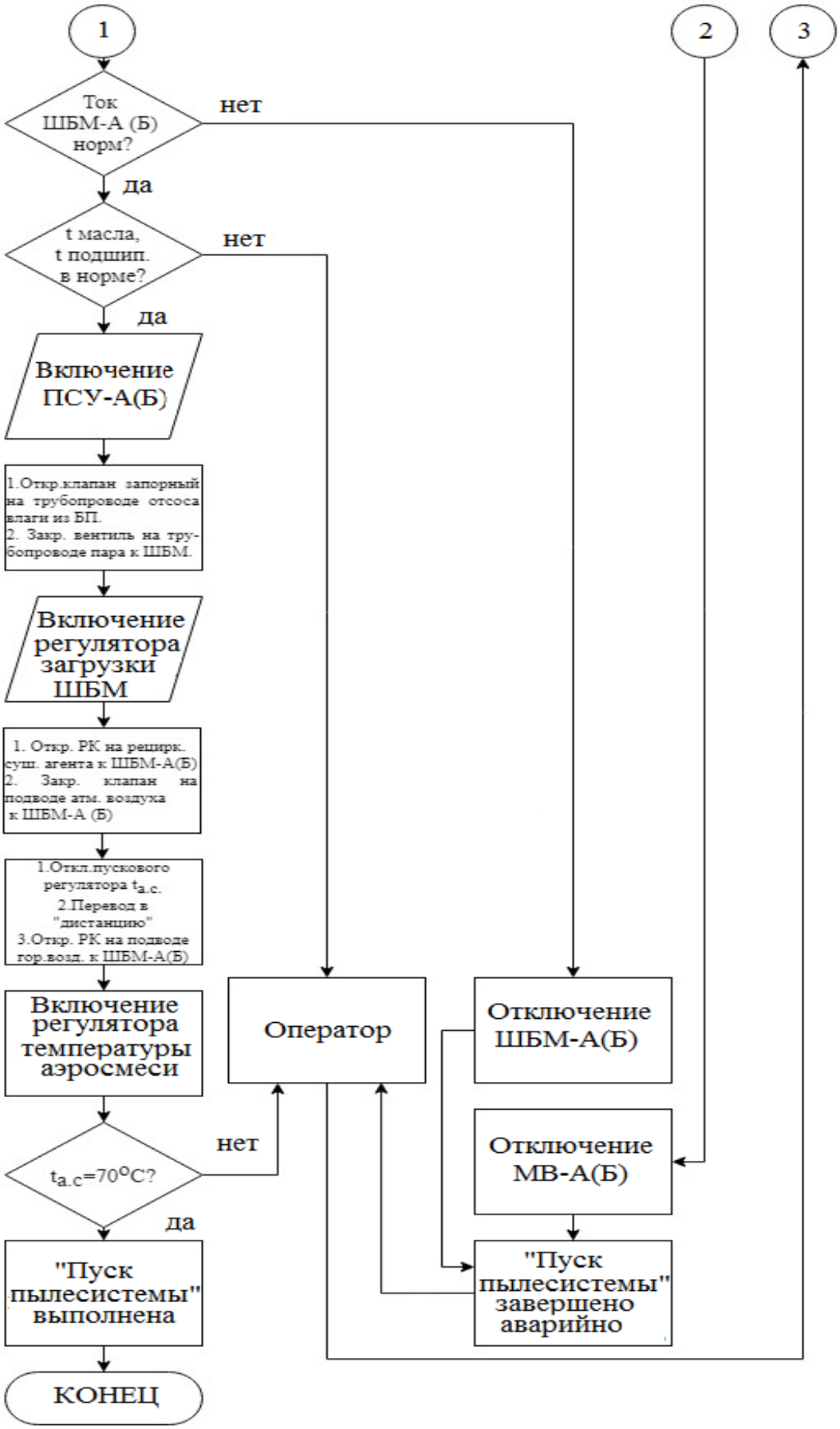


Рисунок А1, лист 2

Рисунок А2 - Блок-схема алгоритма «Останов пылесистемы А(Б)»

Приложение Б

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 5046

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2019/1145.2

(22) 25.12.2019

(45) 12.06.2020

(54) Көмірді ұнтақтау құрылғысы
Устройство для дробления угля
Coal crushing device

(73) Исаев Валерий Львович (KZ)
Issayev Valeriy Lvovich (KZ)

(72) Исаев Валерий Львович (KZ) Issayev Valeriy Lvovich (KZ)
Камарова Сауле Нуртазаевна (KZ) Kamarova Saule Nurtazayevna (KZ)
Кызыров Кайрулла Бейсенбаевич (KZ) Kyzyrov Kairulla Beisenbayevich (KZ)
Калытка Валерий Александрович (KZ) Kalytka Valeriy Aleksandrovich (KZ)
Булатбаев Феликс Назымович (KZ) Bulatbayev Feliks Nazymovich (KZ)
Двужилова Светлана Николаевна (KZ) Dvuzhilova Svetlana Nikolayevna (KZ)

ЭЦҚ кол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Куантыров
Е. Куантыров
Y. Kuantyrov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

Рисункок Б1 – Патент на полезную модель «Устойсво для дробления угля»

Приложение В

ТОО «Кардробсервис»

Утверждаю
Директор ТОО «Кардробсервис»
_____ А.А.Кирпичев
«___» _____ 2021 г.

АКТ

о внедрении научных и практических результатов диссертации в производственный процесс

Мы, ниже подписавшиеся, директор ТОО «Кардробсервис» Кирпичев Александр Александрович с одной стороны и докторант PhD НАО «Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева» в лице Камаровой Сауле Нуртазаевны с другой стороны 09.06.2021г. составили настоящий акт о том, что патент на полезную модель (19) KZ (13) U (11) 5046, (51) B02C 23/00 (2006.01) «Устройство для дробления угля», выданный РГП на ПХВ «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК, внедрен в технологическую схему производственного цикла ТОО «Кардробсерис» г.Караганда.

Исполнительный директор ТОО «Кардробсервис» С.А. Ломаев

Докторант PhD НАО «АУЭС им. Гумарбека Даукеева» С.Н. Камарова

Республика Казахстан, 100009, г. Караганда, ул. Ермекова 61, РНН 302000216151

Рисунок В1 – Акт внедрения «Устройство для дробления угля» на предприятии ТОО «Кардробсервис»

Утверждаю
Директор ТЭЦ-2 АО «АМТ»
А.В. Парамонов
«19» февраля 2021 г.

АКТ

Результаты исследования в области ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау», изложенные в диссертационной работе «Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)», Камаровой Сауле Нуртазаевны, представленной на соискание ученой степени доктора PhD по специальности 6D071700 «Теплоэнергетика», является практический значимым для ТЭЦ-2 АО «АМТ».

Разработанные мероприятий по оптимизации процесса подготовки твердого топлива могут быть использованы для внедрения.

Директор ТЭЦ-2
АО «АМТ» А.В. Парамонов

Докторант PhD
НАО «АУЭС
им. Гумарбека Даукеева» С.Н. Камарова

Рисунок В2 – Акт о возможном внедрении результатов исследования на ТЭЦ-2 «АрселорМиттал Темиртау»

ArcelorMittal

Дата «19» 02 2021

ПРОТОКОЛ №1
Научно-технического семинара
ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темирау»

Председатель - Директор ТЭЦ-2 - Парамонов А.В.
Секретарь - начальник ТТЦ - Кузнецов А. О.

ПРИСУТСТВОВАЛИ

- представители АО «АрселорМиттал Темиртау»: Директор ТЭЦ-2 - Парамонов А.В., главный инженер ТЭЦ-2 - Корчагин А.Б. начальник топливно - транспортного цеха - Кузнецов А. О., начальник котельного цеха - Махашов Р.А., начальник отдела подготовки производства - Ким В.П.

ПОВЕСТКА ДНЯ

1. Обсуждение результатов диссертационной работы докторанта Камаровой С.Н. на тему «Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)», представленной на соискание академической степени доктора PhD (направление философии наук) специальность 6D071700 «Теплоэнергетика».
2. Результаты эффективной работы технологического оборудования топливоподачи ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау», представление патента на полезную модель (19) KZ (13) U (11) 5046, (51) B02C 23/00 (2006.01) «Устройство для дробления угля», выданный РГП на ПХВ «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК.
3. Рассмотрение результатов научно-исследовательской работы докторанта Камаровой С.Н. на ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау».

СЛУШАЛИ:

Директор ТЭЦ-2 АО «АМТ» - Парамонов А.В., сообщил, что Камарова Сауле Нуртазаена обучается на 3 курсе по целевой докторантуре в НАО «Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеев» и выполнила работу на примере ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау». Председатель предложил заслушать доклад докторанта по теме диссертации.

JSC ArcelorMittal Temirtau
1, Republic Avenue,
Temirtau 101407,
Karaganda Oblast,
Kazakhstan

TEL: +7 72139 65600, 69973;
FAX: +7 7213 919191;
TELETYPE 271134 PILOT
E-mail:
general.mst@arcelormittal.com

АО АрселорМиттал Темиртау
пр. Республики, 1
101407, Темиртау
Карагандинская обл.,
Казахстан

TEL: +7 72139 65600, 69973;
FAX: +7 7213 919191;
TELETYPE 271134 PILOT
E-mail:
general.mst@arcelormittal.com

Рисунок В3 – Протокол научно-технического семинара ТЭЦ-2 «АрселорМиттал Темиртау», лист 1

ArcelorMittal

По первому вопросу:

СЛУШАЛИ: Доклад докторанта Камаровой С.Н. по содержанию диссертационной работы на тему «Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)», представленной на соискание академической степени доктора PhD (направление философии наук) специальность 6D071700 «Теплоэнергетика». Докладчик изложила основные положения диссертации: ее актуальность, цели и задачи, основные научные положения и результаты, их научную новизну и практическую значимость.

ВОПРОСЫ ЗАДАВАЛИ: главный инженер ТЭЦ-2 АО «АМТ» - Корчагин А.Б.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Докладчик ответила на все поставленные вопросы представителям предприятия.

По второму вопросу:

СЛУШАЛИ: начальник топливно-транспортного цеха - Кузнецов А.О., который доложил, что изучили научно-исследовательскую работу докторанта, а также «Устройство для дробления угля» патент на полезную модель (19) KZ (13) U (11) 5046, (51) B02C 23/00 (2006.01). Работа представлена в понятной формулировке, имеет связь с технологической схемой подготовки топлива ТЭЦ-2 АО «АМТ» в цикле предварительной подготовки топлива. Полезная модель, является техническим и конструктивным решением для формирования требуемого фракционного состава твердого топлива.

ВОПРОСЫ ЗАДАВАЛИ: начальник отдела подготовки производства - Ким В. П.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Утвердить экспертное заключение по представленному патенту на полезную модель «Устройство для дробления угля», о возможности внедрения в технологическую схему предварительной подготовки твердого топлива ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау».

По третьему вопросу:

СЛУШАЛИ: начальник котельного цеха - Махашов Р.А., который доложил о необходимости рассмотрения вопроса по внедрению результатов научно – исследовательской работы докторанта Камаровой С.Н. на ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау».

JSC ArcelorMittal Temirtau
1, Republic Avenue,
Temirtau 101407,
Karaganda Oblast,
Kazakhstan

TEL: +7 72139 65600, 69973;
FAX: +7 7213 919191;
TELETYPE 271134 PILOT
E-mail:
general.mst@arcelormittal.com

АО АрселорМиттал Темиртау
пр. Республики, 1
101407, Темиртау
Карагандинская обл.,
Казахстан

TEL: +7 72139 65600, 69973;
FAX: +7 7213 919191;
TELETYPE 271134 PILOT
E-mail:
general.mst@arcelormittal.com

Рисунок В3, лист 2

ArcelorMittal

ВОПРОСЫ ЗАДАВАЛИ: начальник топливно-транспортного цеха - Кузнецов А.О.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Рекомендовать к возможному внедрению результаты научно–исследовательской работы докторанта Камаровой С.Н., выполненной на тему «Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)».

РЕШИЛИ:

1. Диссертационная работа Камаровой Сауле Нуртазаевны на тему «Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)», соответствует всем требованиям предъявленным к докторским диссертациям специальности 6D071700 «Теплоэнергетика».
2. Утвердить экспертное заключение по рассмотрению о возможности внедрения «Устройство для дробления угля» в цикле предварительной подготовки твердого топлива ТЭЦ-2 АО «АрселорМиттал Темиртау».
3. Рекомендовать к возможному использованию результаты научно-исследовательской работы докторанта Камаровой С.Н. выполненной на тему «Эффективность работы промышленных теплоэнергетических установок при модернизации систем подготовки твердого топлива (на примере ТЭЦ-2 города Темиртау)».

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ Парамонов А.В.
СЕКРЕТАРЬ Кузнецов А. О.

АКЦИОНЕРНЫЙ КОРПУС АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ТЭЦ-2 АрселорМиттал Темиртау

JSC ArcelorMittal Temirtau
1, Republic Avenue,
Temirtau, 101407,
Karaganda Oblast,
Kazakhstan

TEL: +7 7213 65600, 69973;
FAX: +7 7213 919191;
TELETYPE 271134 PILOT
E-mail:
general.mst@arcelormittal.com

АО АрселорМиттал Темиртау
пр. Республики, 1
101407, Темиртау
Карагандинская обл.,
Казахстан

TEL: +7 7213 65600, 69973;
FAX: +7 7213 919191;
TELETYPE 271134 PILOT
E-mail:
general.mst@arcelormittal.com

Рисунок В3, лист 3

Бекітемін
АЭжБУ АСД директоры
_____ Р. Р. Мухамеджанова
12 декабря 2019 ж.

АКТ

«Өнеркәсіптік жылутехнология» кафедрасының оқытушылары әзірлеген «Өндірістік кәсіпорындардың энергия тасымалдауыштарын өндіру және тарату жүйелері» пәні бойынша оқу процесіне зертханалық жұмысты енгізу туралы. Доцент Е. С. Умбетов, С. К. Абильдинова және докторант С. Н. Камарова дайындаған презентацияны, 2019-2020 оқу жылының I семестрінде технологиялық байқаудан өткен зертханалық жұмысты және «Өндірістік кәсіпорындардың энергия тасымалдауыштарын өндіру және тарату жүйелері» пәні бойынша зертханалық жұмысты орындауға арналған әдістемелік нұсқауды қарастырып, «5В071700-Жылуэнергетика» мамандығының үшінші курс студенттерімен мазмұны бойынша пәннің силлабусына сәйкес келетінін және барлық оқу материалын қамтитынын растаймыз.

Қарастырылған жұмыстардың сипаттамасы және оларға берілген балдар (университет оқытушысының жұмысын бағалау туралы ережеге сәйкес) төмендегі кестеде көрсетілген.

№	Жұмыс атауы	Силлабусқа сәйкестігі	Пайдаланылатын жабдық, ПБ	Балл
2	Қатты отынды ұнтақтау процесін зерттеу	П.4.2.1	Физикалық стенд «Қатты отынды ұнтақтау процестерін зерттеу бойынша қондырғы және көмір тозаңының сапалық сипаттамаларын анықтау» ауд. 229А корпусы	80 б

Доцент Е. С. Умбетов, С. К. Абильдинова және докторант С. Н. Камарова дайындаған презентацияларды, «5В071700-Жылуэнергетика» мамандығы үшін «Өндірістік кәсіпорындардың энергия тасымалдауыштарын өндіру және тарату жүйелері» пәні бойынша зертханалық жұмысты қарастыру нәтижесінде ОӘК «Өнеркәсіптік жылутехнология» кафедрасының оқу процесіне кеңінен енгізуді ұсынады, ал оған қоса берілген әдістемелік нұсқаулар тиісті әдістемелік әзірлемелер түрінде жариялауға ұсынады.

Төрағасы ОУМК ИТО Е.О. Елеукулов

Мүшелері ОУМК ИТО С.Г. Хан
Н.Г. Борисова
Т.С. Тикишев
Н. Арыстанов

Персоналды басқару жөніндегі бөлім
Отдел по управлению персоналом

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю
Сарангазинова Ивант.
Қызметі аты-жөні
«12» 12 2019 ж.

Рисунок В4 – Акт внедрения в учебный процесс АУЭС, лист 1

Бекітемін
АЭжБУ АСД директоры
_____ Р. Р. Мұхамеджанова
12 декабря 2019 ж.

АКТ

«Өнеркәсіптік жылутехнология» кафедрасының оқытушылары әзірлеген «Отынды жағудың арнайы сұрақтары» пәні бойынша оқу процесіне зертханалық жұмысты енгізу туралы. Доцент Е. С. Умбетов, С. К. Абильдинова және докторант С. Н. Камарова дайындаған презентацияны, 2019-2020 оқу жылының I семестрінде технологиялық байқаудан өткен зертханалық жұмысты және «Отынды жағудың арнайы сұрақтары» пәні бойынша зертханалық жұмысты орындауға арналған әдістемелік нұсқауды қарастырып, «5В071700-Жылуэнергетика» мамандығының үшінші курс студенттерімен мазмұны бойынша пәннің силлабусына сәйкес келетінін және барлық оқу материалын қамтитынын растаймыз.

Қарастырылған жұмыстың сипаттамасы және оған берілген балдар (университет оқытушысының жұмысын бағалау туралы ережеге сәйкес) төмендегі кестеде көрсетілген.

№	Жұмыс атауы	Силлабусқа сәйкестігі	Пайдаланылатын жабдық, ПБ	Балл
2	Көмір тозаңының гранулометриялық құрамын анықтау	П.4.2.1 №2	Физикалық стенд «Қатты отынды ұнтақтау процестерін зерттеу бойынша қондырғы және көмір тозаңының сапалық сипаттамаларын анықтау» ауд. 229А корпусы	30б.

Итого 110б.

Доцент Е. С. Умбетов, С. К. Абильдинова және докторант С. Н. Камарова дайындаған презентацияларды, «5В071700-Жылуэнергетика» мамандығы үшін «Отынды жағудың арнайы сұрақтары» пәні бойынша зертханалық жұмысты қарастыру нәтижесінде ОӘК «Өнеркәсіптік жылутехнология» кафедрасының оқу процесіне кеңінен енгізуді ұсынады, ал оған қоса берілген әдістемелік нұсқаулар тиісті әдістемелік әзірлемелер түрінде жариялауға ұсынады.

Төрағасы ОУМК ИТО Е.О.Елеукулов

Мүшелері ОУМК ИТО С.Г. Хан
Н.Г. Борисова
Т.С. Тикишев
Н. Арыстанов

Персоналды басқару жөніндегі бөлім
Отдел по управлению персоналом

Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю
Сейтканазинова
қызметі аты-жөні
«12» 12 2019 ж.

Рисунок В4 , лист 2

Утверждаю
Директор ДАВ АУЭС
_____ Р.Р. Мухамеджанова
12 декабря 2019 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс лабораторной работы по дисциплине «Специальные вопросы сжигания топлива», разработанных преподавателями кафедры «Промышленная теплотехнология». Рассмотрев презентацию, подготовленную доцентами Умбетовым Е.С., Абильдиновой С.К., и докторантом Камаровой С.Н., лабораторной работы, прошедшей технологическую апробацию в 2019-2020 учебном году, и соответствующие методические указания к ней, предназначенные для организации выполнения лабораторной работы по дисциплине «Специальные вопросы сжигания топлива» со студентами третьего курса специальности «5В071700 - Теплоэнергетика» подтверждаем, что лабороторная работа по содержанию соответствует силлабусу дисциплины и охватывает весь учебный материал.

Характеристики рассмотренной работы и присвоенные баллы (в соответствии с положением об оценке работы преподавателя университета) отражены в нижеследующей таблице

№	Наименование работы	Соответствие силлабусу	Используемое оборудование, ПО	Баллы
2	Определение гранулометрического состава угольной пыли	П.4.2.1 №2	Физический стенд «Установка по исследованию процессов размола твердых топлив определение качественных характеристик угольной пыли» Корпус А, 229 ауд.	80б

В результате рассмотрения презентации, подготовленной доцентами Умбетовым Е.С., Абильдиновой С.К. и докторантом Камаровой С.Н., лабораторной работы по дисциплине «Специальные вопросы сжигания топлива» для специальности «5В071700-Теплоэнергетика», ОУМК предлагает к широкому внедрению в учебный процесс кафедры «Промышленная теплотехнология», а прилагаемые к нему методические указания рекомендует к публикации в виде соответствующей методической разработки.

Председатель ОУМК ИТО Е.О.Елеукулов

Члены ОУМК ИТО С.Г. Хан
Н.Г. Борисова
Т.С. Тикишев
Н. Арыстанов

Персоналды басқару жөніндегі бөлім
Отдел по управлению персоналом
Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю
Кыстангазинова
қызметі «12» 12 аты-жөні 2019 ж.

Рисунок В4, лист 3

Утверждаю
Директор АУЭС
_____ Р.Р. Мухамеджанова
12 декабря 2019 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс лабораторной работы по дисциплине «Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий», разработанный преподавателями кафедры «Промышленная теплотехнология».

Рассмотрев презентацию, подготовленную доцентами Умбетовым Е.С., Абильдиновой С.К., и докторантом Камаровой С.Н., лабораторная работа, прошедшая технологическую апробацию в 2019-2020 учебном году, и соответствующие методические указания к ней, предназначенные для организации выполнения лабораторной работы по дисциплине «Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий» со студентами четвертого курса специальности «5В071700-Теплоэнергетика» подтверждаем, что по содержанию соответствуют силлабусу дисциплины и охватывают весь учебный материал.

Характеристики рассматриваемой работы и присвоенные к нему баллы (в соответствии с положением об оценке работы преподавателя университета) отражены в нижеследующей таблице

№	Наименование работы	Соответствие силлабусу	Используемое оборудование, ПО	Баллы
2	Исследование процесса размола твердого топлива	П.4.2.1.5	Физический стенд «Установка по исследованию процессов размола твердых топлив определение качественных характеристик угольной пыли» Корпус А, 229 ауд.	3 Об

Итого Σ 110б.

В результате рассмотрения презентации, подготовленной доцентами Умбетовым Е.С., Абильдиновой С.К. и докторантом Камаровой С.Н., лабораторной работы по дисциплине «Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий» для специальности «5В071700-Теплоэнергетика», ОУМК предлагает к широкому внедрению в учебный процесс кафедры «Промышленная теплотехнология», а прилагаемая к нему методические указания рекомендует к публикации в виде соответствующей методической разработки.

Председатель ОУМК ИТО Е.О.Елеукулов

Члены ОУМК ИТО С.Г. Хан
Н.Г. Борисова
Т.С. Тикишев
Н. Арыстанов

Персоналды басқару женіндегі бөлім
Отдел по управлению персоналом
Қолтаңбаны растаймын
Подпись заверяю
Ишмангазинова
қызметі аты-жөні
«12» 12 2019 ж.

Рисунок В4, лист 4

Утверждаю
Член Правления, Проректор по СР
Сивякова Г.А.
_____ 2022 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс установки «Исследование процессов размола твердых топлив и определение качественных характеристик угольной пыли», разработанной преподавателями кафедры «Энергетика», старшим мастером кафедры «Металлургия и материаловедение». Рассмотрев презентацию установки, подготовленную Камаровой С.Н., Жабаловой Г.Г, Леликовой О.Н, Онищенко О.Н., Акылбековым Ж.З., прошедшую технологическую апробацию в 2021-2022 учебном году, предназначенную для организации выполнения исследовательских, лабораторных и практических работ по дисциплинам «Котельные установки и парогенераторы», «Системы производства и распределения энергоносителей», «Основы научных исследований», со студентами ОП 6В07104 (6В07111) «Теплоэнергетика промышленных предприятий и объектов жилищно-коммунального хозяйства» подтверждаем, что исследовательские, лабораторные и практические работы соответствуют по содержанию силлабусу дисциплин и охватывают учебный материал.

В результате рассмотрения презентации установки, подготовленной Камаровой С.Н., Жабаловой Г.Г, Леликовой О.Н, Онищенко О.Н., Акылбековым Ж.З., предлагаем к широкому внедрению в учебный процесс кафедры «Энергетика», а прилагаемые к нему методические указания рекомендуем к публикации в виде соответствующей методической разработки.

Директор ДАП		Е.М. Харченко
Декан ФЭТиСУ		Б.Б. Махмутов
И.о. Зав. кафедрой		О.Н. Леликова

Рисунок В5 – Акт внедрения в учебный процесс КарИУ г. Темиртау, лист 1

Утверждаю
Член Правления, Проректор по СР
_____ Сивякова Г.А.
«01» _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс установки «Исследование процессов размола твердых топлив и определение качественных характеристик угольной пыли», по дисциплинам «Электрические машины и электропривод», «Моделирование электрромеханических систем», разработанная преподавателями кафедры «Энергетика», старшим мастером кафедры «Металлургия и материаловедение». Рассмотрев презентацию установки, подготовленную Камаровой С.Н., Жабаловой Г.Г, Леликовой О.Н, Онищенко О.Н., Акылбековым Ж.З., прошедшую технологическую апробацию в 2021-2022 учебном году, предназначенную для организации выполнения лабораторных и исследовательских работ по ОП 6В07103 «Энергообеспечение промышленных объектов», ОП 7М07112 «Электроэнергетика» подтверждаем, что установка позволяет проводить исследования механических и электромеханических характеристик электродвигателя при изменении загрузки шаровой барабанной мельницы и частоты вращения.

В результате рассмотрения презентации установки, подготовленной Камаровой С.Н., Жабаловой Г.Г, Леликовой О.Н, Онищенко О.Н., Акылбековым Ж.З., предлагаем к широкому внедрению в учебный процесс кафедры «Энергетика», а прилагаемые к нему методические указания рекомендуем к публикации в виде соответствующей методической разработки.

Директор ДАП		Е.М. Харченко
Декан ФЭТиСУ		Б.Б. Махмутов
И.о. Зав. кафедрой		О.Н. Леликова

Рисунок В5, лист 1

Приложение Г

TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

FACULTY OF POWER ENGINEERING AND POWER MACHINES

XXIV SCIENTIFIC CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION

FPEPM 2019

17th – 20th September, 2019, Sozopol, Bulgaria

CERTIFICATE

This is to certify that

SAULE KAMAROVA

was an active participant in XXIV Scientific Conference with International Participation – FPEPM 2019 "ENERGY, ECOLOGY, COMFORT, SELF-CONFIDENCE", within the Days of Science of the Technical University of Sofia

Prof. Dr. Ivaylo Banov
Dean of FPEPM
Technical University of Sofia
BULGARIA

Рисунок Г 1 – Сертификат выступления на конференции г. Созополь, Болгария