

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

На правах рукописи

ПУТИЛОВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПРИ ОБРАЩЕНИИ
С ЗОЛОШЛАКАМИ УГОЛЬНЫХ ТЭС ДЛЯ ИХ МАКСИМАЛЬНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ
ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Зройчиков Николай Алексеевич

Москва - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	6
Глава 1 Обращение с золошлаками ТЭС в России и за рубежом: современное состояние и проблемы	21
1.1 Общие положения в области обращения с золошлаками ТЭС	21
1.2 Статистика образования и использования золошлаков ТЭС в разных странах	32
1.3 Обзор направлений использования золошлаков в России и за рубежом	37
1.3.1 Использование летучей золы в проектах гражданского и дорожного строительства	37
1.3.2 Применение золы в сельском хозяйстве	39
1.3.3 Использование золошлаков для заполнения горных выработок и карьеров	42
1.3.4 Использование золошлаков в качестве сорбентов и биосорбентов ..	44
1.3.5 Перспективы использования золы ТЭС в водородной энергетике ..	45
1.4 Обзор нормативно-технической документации по обращению с золошлаками	46
1.4.1 Нормативно-техническая документация в области обращения с золошлаками ТЭС в России	46
1.4.2 Международные стандарты в области использования летучей золы в цементах и бетонах	55
1.5 Основные барьеры, препятствующие эффективному использованию золошлаков ТЭС в РФ, и предложения по повышению уровня их применения	62
Выводы по главе 1 и постановка цели исследования.....	67
Глава 2 Разработка рекомендаций по созданию надежных, экономичных и экологических систем ЗШУ ТЭС	69
2.1 Анализ эксплуатации существующих схем ЗШУ на ТЭС России	69

2.2 Сравнение систем ЗШУ ТЭС.....	76
2.3 Результаты технико-экономического обоснования перехода на сухие системы обращения с золошлаками ТЭС.....	81
2.4 Рекомендации по эксплуатации систем ЗШУ ТЭС	102
2.4.1 Рекомендации по эксплуатации существующих систем ЗШУ ТЭС ..	111
2.4.2 Рекомендации по созданию надежных, экономичных и экологических систем обращения с золошлаками ТЭС	112
Выводы по главе 2.....	116
Глава 3 Экспериментальные исследования надежности пневмотранспортных систем и разработка математического аппарата для расчета абразивного износа трубопроводов систем ЗШУ ТЭС.....	119
3.1 Характеристики режимов пневмотранспортирования золошлаков ТЭС	123
3.2 Исследование характеристик различных видов золы, влияющих на их абразивные свойства.....	124
3.3 Разработка коэффициента формы частиц мелкофракционных полидисперсных материалов	146
3.4 Разработка коэффициента полидисперсности мелкофракционных материалов	147
3.5 Разработка формулы для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС.....	150
3.6 Разработка формулы для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов пневмотранспортных установок систем ЗШУ ТЭС	156
Выводы по главе 3.....	172
Глава 4 Разработка мероприятий для защиты трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС от абразивного износа	173

4.1. Инновационные материалы и мероприятия для продления ресурса трубопроводов систем ЗШУ ТЭС, подверженных абразивному износу.....	173
4.2 Разработка усовершенствованной формы поворотов трубопровода с углом отклонения потока на 90, 75, 60 градусов для минимизации абразивного износа	183
4.3 Внедрение научных результатов диссертационной работы по защите поверхностей пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 от абразивного износа	206
4.3.1 Описание характеристик труб и соединений	206
4.3.2 Описание технологии производства работ по нанесению алюмотермического покрытия для опытного участка трубопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3	208
4.4 Оценка эффективности применения технических решений по защите пульпопроводов от абразивного износа	212
4.4.1 Оценка эффективности применения технических решений по оптимизации формы криволинейных участков пульпопроводов	212
4.4.2 Расчет сроков службы пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 до и после проведения защитных мероприятий	214
Выводы по главе 4.....	221
Глава 5 Разработка предложений для комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России	223
5.1 Предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы с целью повышения уровня использования золошлаков ТЭС	223
5.2 Предложения по стимулированию производителей золошлаков	225
5.3 Исследование существующего и формирование потенциального рынков сбыта золошлаков угольных ТЭС в РФ	228
5.3.1 Потенциал использования золошлаков в различных секторах экономики	228

5.3.2 Исследование свойств и характеристик золошлаков	231
5.3.3 Планирование и реализация мероприятий в части максимального использования золошлаков в производственных процессах предприятий России	235
5.4 Результаты исследований рынка сбыта золошлаков на примере ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»	238
5.4.1 Анализ результатов отгрузки золошлаков ТЭЦ-22	238
5.4.2 Потребительские свойства и ТУ на золошлаки ТЭЦ-22	241
5.5 Переработка золошлаков, размещенных на золошлакоотвалах ТЭС. Рекомендации по выбору перспективной системы ЗШУ	247
5.6 Реализация технологий комплексной переработки золошлаков ТЭС	253
5.7 Алгоритм действий по реализации комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России	263
Выводы по главе 5.....	266
Заключение.....	268
Список литературы	272
Приложение А Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»	292
Приложение Б Патент на полезную модель 198596 U1	293
Приложение В Патент на полезную модель 200900 U1	301
Приложение Г Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ООО «Энергохимкомплект»	311
Приложение Д Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от СП «Хабаровская ТЭЦ-3»	312
Приложение Е Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ООО «Энергохимкомплект»	314
Приложение Ж Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ООО «Экометт-Луч»	315

Приложение З Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от Минэнерго России	316
Приложение К Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ПАО «Мосэнерго»	317
Приложение Л Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ООО «Интер РАО - Управление электрогенерацией»	318
Приложение М Почетная грамота Федерального агентства по недропользованию	319
Приложение Н Информация о реализованных проектах с использованием летучей золы при строительстве различных объектов.....	320
Приложение П Протокол проведения экспериментальных исследований в ИИТ Дели по определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов.....	343
Приложение Р Методика проведения совместных экспериментальных исследований по абразивному износу трубопроводов и определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов	349

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационного исследования. Одной из наиболее масштабных государственных задач, приведенных в основном документе стратегического планирования в сфере энергетики, определяющего направления и приоритеты государственной энергетической политики РФ и способствующих реализации цели развития энергетики Российской Федерации, является уменьшение негативного воздействия объектов ТЭК на окружающую среду.

В настоящее время при производстве электрической энергии в мире доля угольной энергетики составляет 34 %, в Российской Федерации - около 19 %. В перспективе до 2050 г. уголь останется одним из основных энергетических источников как в России, так и во всем мире.

В сравнении с природным газом и мазутом уголь является самым дешевым источником энергии, при этом, угольные ТЭС, выбрасывая в атмосферный воздух не только оксиды азота, серы, парниковые газы, но и частицы золы, загрязняя водный бассейн и приводя к изменению химико-минералогического состава почв, являются наименее экологичными из всех традиционных электростанций.

В этой связи особое внимание уделяется проблеме обращения с отходами угольной генерации, что усиливается ужесточением природоохранного законодательства с переходом на принципы наилучших доступных технологий (НДТ), экологизацией угольной энергетики, исчерпанием емкостей золошлакоотвалов угольных ТЭС, имевшим место прорывам дамбы золошлакоотвалов и пульпопроводов с попаданием пульпы на рельеф местности и в водные объекты, пылением сухих пляжей золошлакоотвалов под воздействием ветров. Обращение с отходами угольной генерации включает деятельность, связанную со сбором, транспортом, отгрузкой, переработкой, и складированием. Утилизация золошлаков (золы, шлака, золошлаковых смесей), образованных при сжигании твердого топлива, является одной из основных проблем современных угольных ТЭС России. В России число угольных ТЭС, в балансе которых есть уголь, составляет 121. Их средний возраст - более 50 лет, что не может не оказывать существенного

влияния на технико-экономические и экологические показатели работы системы золошлакоудаления (ЗШУ) ТЭС. На твердотопливных российских ТЭС для транспорта золошлаковой пульпы на гидрозолоотвалы наибольшее распространение получили гидравлические системы золошлакоудаления (ГЗУ) с оборотной системой водоснабжения, которые используются в подавляющем большинстве случаев и являются технически устаревшими, неэкономичными и неэкологичными. Затраты на сооружение систем ГЗУ, включая строительство гидрозолоотвалов, достигают 12...17 % стоимости ТЭС, а затраты на их эксплуатацию составляют 7...10 % общих эксплуатационных затрат ТЭС.

Ежегодно на угольных ТЭС России образуется 20...25 млн т золошлаков, а используется менее 20% от этого количества. На сегодняшний день на золошлакоотвалах ТЭС накоплено порядка 1,7 млрд т золошлаков, и с каждым годом эти цифры растут. Около 2/3 всех золошлакоотвалов близки к проектному заполнению или уже переполнены. Проблему ликвидации объектов накопленного экологического вреда, которыми являются золошлакоотвалы можно решить только при осуществлении широкомасштабных проектов комплексной переработки золошлаков с получением востребованной продукции. Низкие показатели использования золошлаков ТЭС в России объясняются отсутствием комплексного подхода в решении проблемы обращения с золошлаками ТЭС.

Исследования, приведенные в диссертационной работе, направлены на разработку комплексного подхода при обращении с золошлаками ТЭС для их максимального использования в экономике России, а также на развитие минерально-сырьевой базы РФ, что подтверждается почетной грамотой Федерального агентства по недропользованию.

Степень научной разработанности проблемы

Результаты исследований различных аспектов проблемы обращения с золошлаками ТЭС представлены в работах Л.А. Рихтера, Е.И. Гаврилова, Ю.Г. Назмеева, В.Я. Путилова, Б.Л. Вишни, А.Б. Автономова, К.П. Боричева, А.В. Орлова, Н.А. Зройчикова, В.Б. Прохорова, Л.Я. Шубова, К.Д. Скобелева, А.И. Калачева, А.А. Соловьянова, Д.А. Загорской, В.Р. Шевцова, А.М. Белошицкого,

Е.Н. Ильина, Ю.В. Коломийца, Е.В. Зелинской, Е.П. Хаглеева, П.Н. Сниккарса, В.Н. Левченко, Е.Ю. Темниковой, А.Я. Рыженкова, О.С. Данилова, А.В. Таскина, Л.Н. Алексейко, И.В. Гребенюк, Л.Н. Адеевой, В.Ф. Борбата, Р.В. Кулумбегова, О.С. Попеля, М.Г. Сульмана, Л.Д. Данилина, В.С. Дрожжина, Н.В. Гавлитина, М. Хили, М.С. Чурсовой, А.И. Вальцевой, Н.-J. Feuerborn, С. Heidrich, D. Harris, V. Kumar, M. Mathur, P. Sharma, V. Cianci, F. Bassetti, D. Coppola, D. Ricci, V. Quattrucci, S. Savastano, V.K. Agarwal, D. Kaminska и др.

Упомянутые выше работы посвящены анализу современной ситуации и показателей образования и утилизации золошлаков ТЭС в разных странах мира, основам формирования системы обращения с побочными продуктами сжигания угля, нормативно-технической документации в области обращения с золошлаками энергетики, включая международные стандарты, ГОСТы, нормативные документы соответствующих министерств и ведомств, а также вопросам надежности, экологичности и экономичности систем золошлакоудаления ТЭС, в частности, защите трубопроводов систем ЗШУ от абразивного износа при транспортировании золошлаков, внедрению НДТ в области обращения с золошлаками, передовым технологиям переработки золошлаков в товарную продукцию, проблемам и возможностям утилизации золошлаков в различных отраслях циркулярной экономики России. Во всех представленных работах описаны некоторые элементы системы обращения с золошлаками ТЭС, отсутствует их целостное и системное исследование, которое бы позволило разработать комплексный подход в проблематике от этапа образования золошлаков на угольных ТЭС, включая оборудование и технологии транспортирования золошлаков на базе НДТ для существующих и перспективных схем обращения с золошлаками, вопросы качества золошлаков с целью их применения в циркулярной экономике России, надежности систем эвакуации, отгрузки потребителям и транспортирования золошлаков экологически приемлемыми способами на золошлакоотвал для временного хранения при возможности их дальнейшей переработки в товарную продукцию или продукцию отложенного спроса, анализ потенциального рынка сбыта золошлаков.

Объект диссертационного исследования - система обращения с золошлаками ТЭС на всех этапах жизненного цикла побочных продуктов сжигания угля, включая их образование, удаление, транспорт, отгрузку, переработку, складирование.

Предмет диссертационной работы - процессы, протекающие в системах обращения с золошлаками ТЭС.

Цель диссертационного исследования - разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели

1. На основании анализа современного состояния вопроса выявить основные барьеры, препятствующие эффективному использованию золошлаков ТЭС в РФ.
2. Определить оптимальные параметры транспортирования золошлаков, включая разработку зависимости для расчета оптимальной скорости транспортирования.
3. Создать математический аппарат для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС с учетом основных значимых факторов.
4. Разработать формы криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС с целью минимизации абразивного износа и продления срока службы трубопроводов при пневмо- и гидротранспорте золошлаков.
5. Сформулировать предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы в области обращения с золошлаками ТЭС, в т.ч. разработать стимулирующие механизмы, позволяющие повысить заинтересованность угольных ТЭС в увеличении уровня использования золошлаков с целью достижения показателей, приведенных в Энергетической стратегии России до 2035 года.
6. Разработать предложения по комплексному подходу при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производ-

ственных процессах предприятий России с учетом совершенствования нормативно-правовой базы, исследований рынка сбыта, свойств и характеристик золошлаков ТЭС, планируемых и реализуемых мероприятий в части использования золошлаков, перспективных схем системы ЗШУ ТЭС и имеющихся технологий по комплексной переработке золошлаков.

Методология и методы исследования

Для выполнения экспериментальных исследований абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок и критических скоростей пылегазовых потоков использовались разработанная совместно с ИИТ Дели Программа и Методика проведения исследований (грант РФФИ №08-08-91300-ИНД_а). Для исследования фракционного состава мелкодисперсных сыпучих материалов применялся набор сит. Проведены натурные экспериментальные исследования параметров пневмотранспортных потоков и абразивного износа на реконструированной экспериментальной установке, оборудованной информационно-измерительной системой. Для определения формы и размеров частиц проб сыпучих материалов использовался анализатор IPS UA Kamika Instruments с соответствующим программным комплексом. Микрофотографии проб выполнены с применением электронного микроскопа Tescan Mira LMU+энергодисперсионного рентгеновского детектора Osfor inst. INCA X-MAX 50. В диссертационной работе использовался отраслевой нормативный документ «Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС» (РД 153.34.1-27.512.2001), разработанный при участии автора.

Положения диссертационного исследования, выносимые на защиту

1. Формула для расчета оптимальных скоростей при пневмотранспорте золошлаков ТЭС.
2. Базовые рекомендации по эксплуатации существующих и перспективных систем ЗШУ ТЭС.
3. Новый математический аппарат для расчета абразивного износа трубопроводов систем ЗШУ ТЭС.

4. Усовершенствованная форма криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС с углом отклонения потока на 90, 75, 60 градусов при различных соотношениях R/D с участками стабилизации потока на входе в поворот и выходе из него, футерованных алюмотермическим покрытием.

5. Формула для расчета экологических платежей за размещение золошлаков текущего годового выхода.

6. Рекомендации по совершенствованию нормативно-правовой базы в области обращения с золошлаками ТЭС.

7. Алгоритм действий по реализации комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России.

Научная новизна диссертационного исследования

1. Разработан математический комплекс для определения параметров пневмотранспортных потоков систем золошлакоудаления ТЭС, в том числе:

1.1. Усовершенствована формула для расчета критических скоростей для различных условий пневмотранспортирования с учетом фактора формы и полидисперсности частиц, которая может быть использована для определения оптимальной скорости транспортирования с точки зрения характеристик транспортируемой среды и минимизации абразивного износа.

1.2. Разработаны новые формулы для определения коэффициентов формы частиц мелкофракционных полидисперсных материалов на основе коэффициентов формы частиц по группам фракций и содержания фракций частиц по массе для случая использования анализатора фракционного состава проб, а также на основе выполненных экспериментальных и аналитических исследований при известной средневзвешенной крупности частиц в пробе материала, что позволяет повысить точность определения критической скорости транспортируемых материалов.

1.3. Разработана формула для определения коэффициента полидисперсности мелкофракционных материалов, учитывающая средневзвешенную круп-

ность и медианный диаметр, соответствующий 50%-ному отсеvu пробы материала, которая при определении критической скорости мелкодисперсных материалов позволяет повысить точность определения этого параметра с учетом однородности материалов.

2. Разработан математический аппарат для расчета величины абразивного износа трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС с учетом скорости потока, концентрации и критерия аэродинамической легкости частиц, коэффициента относительного содержания кремния в транспортируемом материале, диаметра трубы, коэффициентов износостойкости, формы и полидисперсности материала, угла атаки, радиуса поворота потока, диаметра трубы при транспортировании различных видов абразивных материалов, в том числе:

2.1. Разработана формула для определения влияния угла атаки частиц на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов.

2.2. Разработана формула для определения влияния отношения радиуса поворота к внутреннему диаметру трубы на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов.

2.3. Впервые выведены формулы для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС с учетом упомянутых выше факторов.

3. Разработаны усовершенствованные формы криволинейных участков трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС с углом отклонения потока на 90, 75, 60 градусов при различных соотношениях радиуса поворота потока R к внутреннему диаметру трубы D с участками стабилизации потока на входе в поворот и выходе из него с целью минимизации абразивного износа и продления срока службы трубопроводов. Формы криволинейных участков разработаны с учетом углов атаки, при которых износ минимален, с переменными радиусами поворотов потока в сегментах отвода. В результате усовершенствования формы колен поворотов трубопроводов срок их службы увеличивается в 3...4 раза по сравнению с использованием исходных стальных колен.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основании проведенных исследований решена научно-техническая проблема разработки комплексного подхода при обращении с золошлаками ТЭС для их максимального использования в экономике России. Учитывая необходимость экономии природных ресурсов за счет замещения ими золошлаков ТЭС, данная проблема в настоящее время и в перспективе имеет важное экологическое и технико-экономическое значение для РФ.

Разработаны Программа и Методика проведения экспериментальных исследований абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок и критических скоростей пылегазовых потоков, в соответствии с которыми проведены данные исследования в ИИТ Дели. Результаты использованы в отчете по гранту РФФИ №08-08-91300-ИНД_а. Предложена формула для определения оптимальной скорости пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов через критическую скорость пылегазовых потоков. Разработан математический аппарат для расчета величины абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС, учитывающий основные значимые факторы.

Разработан алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России на основании комплексного подхода. Предложенный алгоритм включает: образование и информационное обеспечение; стратегическое планирование в электроэнергетике; совершенствование НПА и НТД в области обращения с золошлаками ТЭС; формирование рынка сбыта золошлаков; разработку и внедрение технологий обращения с золошлаками; административные и финансовые меры.

Основные положения работы использованы при анализе существующего и потенциального рынка сбыта золошлаковых материалов ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» в Московском регионе, при разработке плана увеличения объемов реализации золошлаков предприятиям стройиндустрии, при анализе соответствия существующей системы обращения с золошлаками задаче увеличения доли сжигания углей в топливном балансе ТЭЦ-22 (Акт о внедрении научных результатов

диссертационной работы от ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» приведен в Приложении А).

Результаты диссертационного исследования в части разработки форм криволинейных участков пульпопроводов, имеющих усовершенствованные формы для защиты трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС от абразивного износа, использованы индустриальным партнером – Хабаровской ТЭЦ-3 при выполнении НИОКР «Разработка технологии защиты поверхностей пульпопроводов при работе на углях с повышенной зольностью. Изготовление опытно-промышленного образца» (патенты РФ №№ 198596 U1, 200900 U1, приведены в Приложениях Б и В). Использование результатов диссертационной работы позволило повысить ресурс и износостойкость пульпопроводов системы золошлакоудаления Хабаровской ТЭЦ-3 при работе на углях с повышенной зольностью, что привело к существенному сокращению затрат на проведение ремонтных работ в системе гидрозолоудаления станции (Приложение Г). Эффект от внедрения технологии комплексной защиты пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 от абразивного износа, являющейся результатом диссертационной работы, - продление срока службы пульпопроводов не менее, чем в 14 раз по сравнению с исходным стальным отводом, подтверждается актом об использовании результатов, полученным от Хабаровской ТЭЦ-3 (Приложение Д).

В акте, полученном от ООО «Энергохимкомплект» (Приложение Е), подтверждается, что результаты диссертационного исследования использованы при проектировании и запуске новой установки для нанесения алюмотермических покрытий на трубы большого диаметра (до 530 мм) по усовершенствованной технологии, которая позволяет существенно продлить ресурс трубопроводов систем ЗШУ ТЭС. Запуск новой установки позволил расширить номенклатуру выпускаемой продукции и удовлетворить спрос новых заказчиков.

Материалы диссертации использованы при разработке стратегии развития ООО «Экометт-Луч» - компании-переработчика золошлаков в Приморском крае. В акте, полученном от ООО «Экометт-Луч» (Приложение Ж), подтверждается,

что результаты диссертационного исследования использованы при анализе возможности сжигания угольного продукта совместно с проектным топливом в котлах Приморской ГРЭС.

Материалы диссертационного исследования, а именно описание технологий обращения с золошлаками, являющимися НДТ, разработанные схемы существующих и перспективных систем ЗШУ ТЭС, рекомендации по выбору оборудования для внутреннего и внешнего транспорта золошлаков на основе НДТ, использованы при подготовке Информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» с последующей актуализацией в 2022 г., что повреждается актом об использовании результатов, полученным от Минэнерго России (Приложение 3). Сформулированы предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы в области обращения с золошлаками ТЭС. Предложена формула для расчета экологических платежей за размещение золошлаков текущего годового выхода с целью достижения показателей, предусмотренных Энергетической стратегией до 2035 г. и Комплексным планом по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности, утвержденным Правительством Российской Федерации в 2022 г.

Материалы диссертационного исследования использованы в учебных дисциплинах программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки сотрудников энергетических предприятий и производств по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»: «Природоохранные технологии на ТЭС», «Основы экологии и природоохранной деятельности в энергетике», а также использованы при подготовке дипломных работ слушателей программ профессиональной переподготовки, обучавшихся по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», что подтверждается актами об использовании результатов, полученными от ПАО «Мосэнерго» (Приложение К), ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией» (Приложение Л).

Результаты диссертационной работы использованы при разработке раз-

дела «Обращение с золошлаками» базы данных «Наилучшие доступные и перспективные природоохранные технологии в энергетике России», что подтверждено свидетельством о государственной регистрации базы данных №2013620175, 09.01.2013. Заявка №2012621420 от 13.12.2012.

Результаты диссертационного исследования использованы при развитии минерально-сырьевой базы России (Почетная грамота Федерального агентства по недропользованию - Приложение М).

Достоверность полученных результатов. Достоверность новых научных результатов подтверждается применением сертифицированных измерительных приборов при проведении экспериментальных исследований, применением хорошо зарекомендовавших себя современных программных комплексов, сходимостью результатов расчета с экспериментальными данными, согласованностью полученных результатов с результатами исследований других авторов, положительными результатами внедрения в деятельность энергетических предприятий.

Апробация работы. Ключевые научные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на российских и зарубежных конференциях и семинарах: 7 International symposium “Environmental geotechnology and global sustainable development” (Хельсинки, Финляндия, 2004), International Conference “World of Coal Ash”, (Лексингтон, США, 2005), Международной научно-практической конференции и специализированной выставке «Экология в энергетике – 2005» (Москва, Россия, 2005), II Международном форуме «Энергетика и экология» (Москва, Россия, 2005), “Ashes from power generation”, (Краков, Польша, 2006), Международном научно-практическом семинаре «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование» (Москва, Россия, 2007), International Conference “World of Coal Ash 2007”, (Ковингтон, США, 2007), International Symposium on Pneumatic Conveying Technologies (Пекин, Китай, 2007), IV международном форуме «Энергетика и экология», (Москва, Россия, 2008), Всероссийском совещании по вопросам переработки и использования золошлаковых материалов тепловых электростанций, (Новосибирск, Россия, 2008), International Conference EuroCoalAsh 2008” (Варшава,

Польша, 2008), II Международном научно-практическом семинаре «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование» (Москва, Россия, 2009), International Conference “World of Coal Ash” (Лексингтон, США, 2009), XVI Międzynarodowa Konferencja "Popioły z energetyki", (Закопане, Польша, 2009), V Международной конференции «Энергетика и экология» (Москва, Россия, 2009), III Международном научно-практическом семинаре «Золошлаки ТЭС - удаление, транспорт, переработка, складирование» (Москва, Россия, 2010 г.), II EuroCoalAsh Conference (Копенгаген, Дания, 2010), XVII Międzynarodowa Konferencja "Popioły z energetyki" (Варшава, Польша, 2010), Międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej „Przyrodnicze wykorzystanie ubocznych produktów spalania węgla, biomasy oraz węgla z biomasa” (Остойя, Польша, 2010), International Conference & Exhibition BulkSolids India 2011 (Мумбай, Индия, 2011), IV Международном научно-практическом семинаре «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование» (Москва, Россия, 2012), International Conference “Eurocoash 2012” (Салоники, Греция, 2012), Семинаре «Технологические проблемы угольной ТЭС и современные решения», (Москва, Россия, 2012), International Conference “World of Coal Ash” (Лексингтон, США, 2013), V Международной конференции «Золошлаки ТЭС - удаление, транспорт, переработка, складирование» (Москва, Россия, 2014), International Conference “Coal Ash Asia 2016” (Шуожоу, Китай, 2016), III международной Конференции «Устойчивые университеты за чистое будущее» (Москва, Россия, 2016), International Conference with Elements of School for Young Scientists on Recycling and Utilization of Technogenic Formations (Екатеринбург, Россия, 2017), Круглом столе «Экологическая безопасность на энергетических объектах» (Санкт-Петербург, Россия, 2019), X Международном Конгрессе «Энергосбережение и энергоэффективность. IT технологии. Энергобезопасность. Экология» (Санкт-Петербург, Россия, 2020), Круглом столе «Рециклинг золошлаковых отходов» (Москва, Россия, 2020), 4-ом Национальном круглом столе «Зеленые университеты России» (Москва, Россия, 2020), WCAEE-ICEEC-2020 (Саров, Россия,

2020), Деловом Форуме «Стратегия опережающего развития Евразийского экономического союза» (Москва, Россия, 2021), Евразийском Деловом Форуме «Интеграция» (Москва, Россия, 2022), WCAEE-ICEEC-2022 (Саров, Россия, 2022), РМЭФ-2023 (Санкт-Петербург, Россия, 2023), WCAEE-ICEEC-2023 (Будва, Черногория, 2023), на ежегодных заседаниях членов Всемирной сети по побочным продуктам сжигания угля (WWCCPN) с 2007 до 2024 гг., на Секции «Энергоэффективность и экология в электроэнергетике» НТС ЕЭС в марте 2024 г., Круглом столе НП «НТС ЕЭС» на РМЭФ-2024 в апреле 2024 г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, включая 14 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, 7 публикаций в периодических изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 30 докладов в сборниках трудов международных и всероссийских конференций, форумов, семинаров, 2 патента, 1 свидетельство о регистрации базы данных.

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы получены в ходе инициативных исследований автора, проведенных им лично и с его участием, а также в ходе выполнения хоздоговорных работ и грантов. Автором лично выполнены постановка задач, выбор и разработка методов их решения, расчеты с использованием специальных программных пакетов, анализ и обработка результатов исследований, объяснены полученные экспериментальные закономерности, предложены методы обработки измерений и разработаны практические рекомендации. При непосредственном участии автора получены основные экспериментальные данные.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Работа содержит 291 страницу основного текста, 69 таблиц, 103 рисунка, 14 приложений. Список использованной литературы включает 189 наименований.

Специальность, которой соответствует диссертация

Тема диссертации и ее содержание соответствуют пунктам 1-4, 7 паспорта научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы:

п.1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования;

п.2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии;

п.3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок;

п.4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок;

п.7. Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем, комплексов и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

Глава 1 Обращение с золошлаками ТЭС в России и за рубежом: современное состояние и проблемы

1.1 Общие положения в области обращения с золошлаками ТЭС

В 2015 г. Генеральной Ассамблеей ООН принята резолюция «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.». Повестка дня состоит из Декларации, 17 целей и 169 задач, достижение которых нацелено на обеспечение устойчивого развития посредством улучшения социально-экономической сферы жизни общества при одновременной защите окружающей среды. При этом, существенным отличием Повестки дня является комплексный и неделимый характер целей устойчивого развития (ЦУР), обеспечивающих сбалансированность всех трех компонентов устойчивого развития: экономического, социального и экологического [1].

Вместе с этим, в странах мира наблюдается все более пристальное внимание к экологическому фактору, через призму которого оценивается работа различных компаний во всех сферах деятельности, включая компании топливно-энергетического комплекса (ТЭК). В этих условиях добыча, производство, транспортировка и сжигание угля, а также утилизация продуктов его сжигания уже давно находятся в поле зрения экспертов разных стран, поскольку предприятия ТЭК являются эмитентами загрязняющих веществ, и оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

Данные по потреблению первичных источников энергии и их процент в структуре мирового потребления приведены на рисунках 1.1 и 1.2 согласно [2].

Из представленных данных следует, что в период с 2000 по 2022 гг. доля угля в структуре первичных источников энергии в мире составила от 25 до 30 %, и в 2022 г. - 27%, что обусловлено, прежде всего, высокими показателями потребления угля в структуре первичных источников энергии стран Азиатско-Тихоокеанского региона (рисунок 1.3).

Эксаджоули

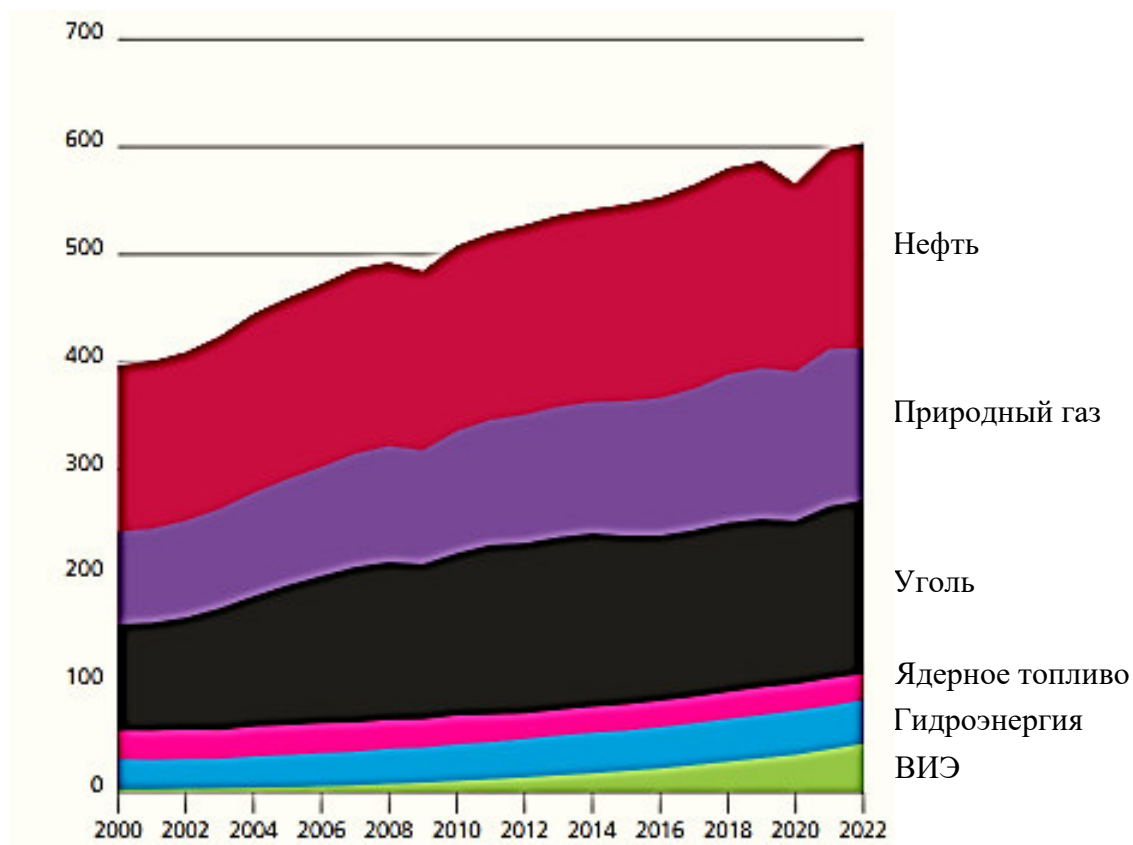


Рисунок 1.1 – Потребление первичных источников энергии

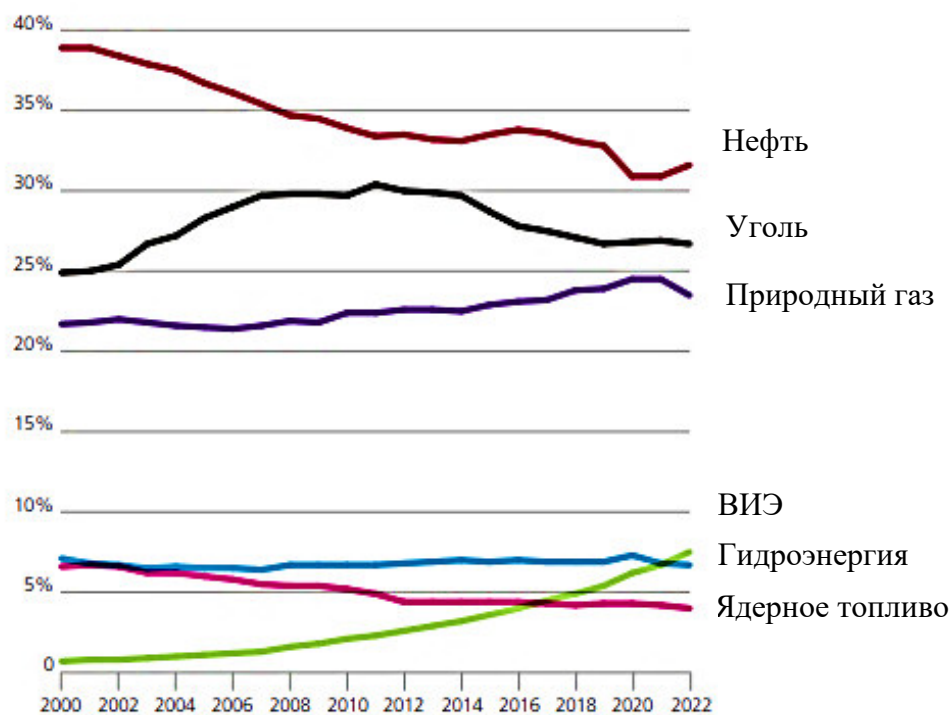


Рисунок 1.2 – Процент первичных источников энергии в структуре мирового потребления

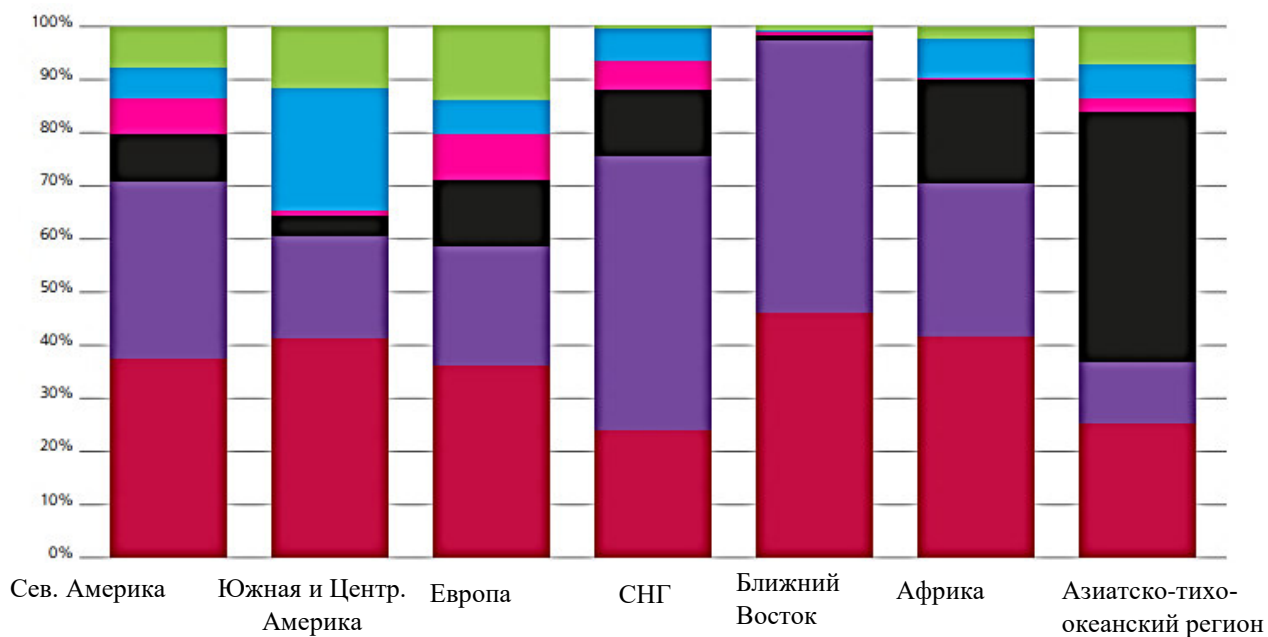


Рисунок 1.3 - Потребление первичных источников энергии в регионах в 2022 г.

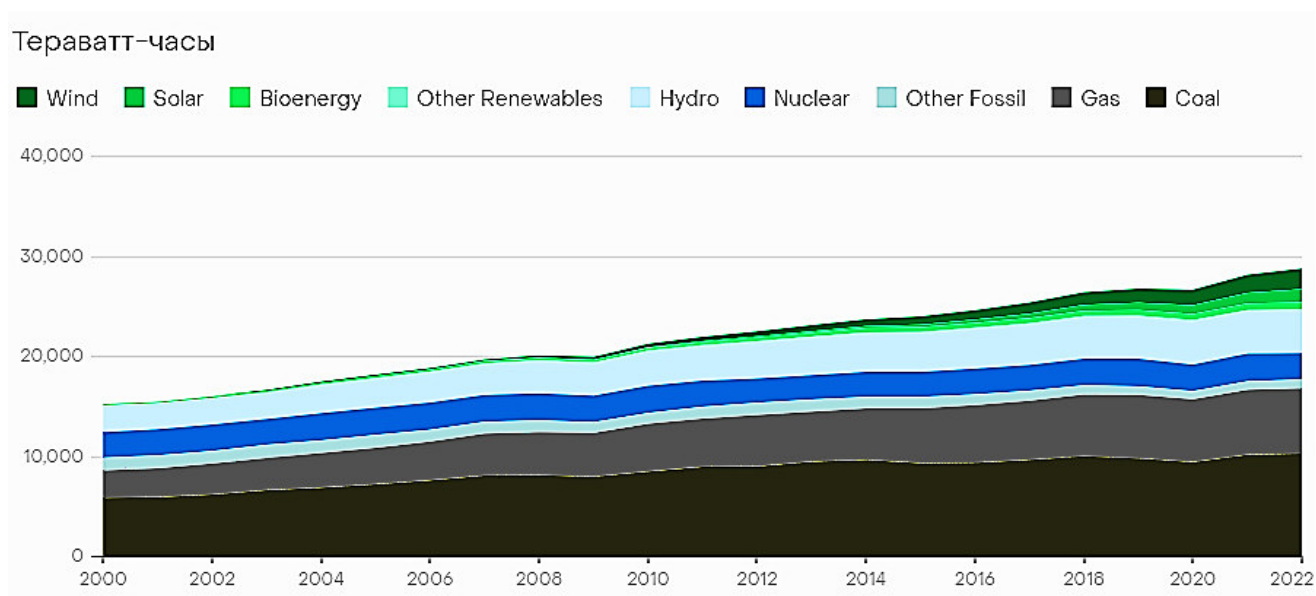


Рисунок 1.4 – Выработка электроэнергии в мире за счет различных источников

С 2000 по 2022 гг. выработка электроэнергии в мире выросла с 5 795,55 до 10 233,84 ТВт·ч [3]. По сравнению с другими источниками энергии уголь находится на 1 месте по выработке электроэнергии.

Согласно [3, 4] в 2022 г. на долю угольных ТЭС в Китае приходился 61% выработки электроэнергии, в Индии – 74% (рисунок 1.5). В России и ЕС этот

показатель составил около 16 %, в то время как 34 % электроэнергии в РФ согласно [5] вырабатывается источниками энергии без выброса парникового газа в атмосферу - АЭС, ГЭС, ВИЭ (таблица 1.1). Динамика выработки электроэнергии угольными ТЭС в разных странах и в мире приведена на рисунке 1.6, из чего следует, что роль угля в глобальном энергетическом балансе в настоящий период и в обозримом будущем остается существенной.

Таблица 1.1 - Сведения о структуре установленной мощности электростанций ЕЭС России и объединенных энергосистем на 01.01.2024

Энерго-система	Всего, МВт	ТЭС		ГЭС		АЭС		ВЭС		СЭС	
		МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%
ЕЭС России	248 164,88	163 711,96	65,98	50 222,58	20,24	29 542,99	11,90	2517,75	1,01	2169,60	0,87
ОЭС Центра	50 439,23	34 840,88	69,07	1 820,07	3,61	13 778,28	27,32	-	-	-	-
ОЭС Ср. Волги	28 013,08	16 625,18	59,35	7 050,50	25,17	4 072,00	14,54	85,40	0,30	180,00	0,64
ОЭС Урала	53 317,61	49 413,28	92,68	1 943,70	3,64	1 485,00	2,79	1,65	-	473,98	0,89
ОЭС Северо-Запада	25 139,55	15 821,87	62,94	2 974,44	11,83	6 135,79	24,41	207,45	0,82	-	-
ОЭС Юга	27 666,71	13 816,67	49,94	6 439,44	23,27	4 071,92	14,72	2223,25	8,04	1115,43	4,03
ОЭС Сибири	52 376,81	26 599,69	50,83	25 376,93	48,41	-	-	-	-	400,19	0,76
ОЭС Востока	11 211,89	6 594,39	58,82	4 617,50	41,18	-	-	-	-	-	-

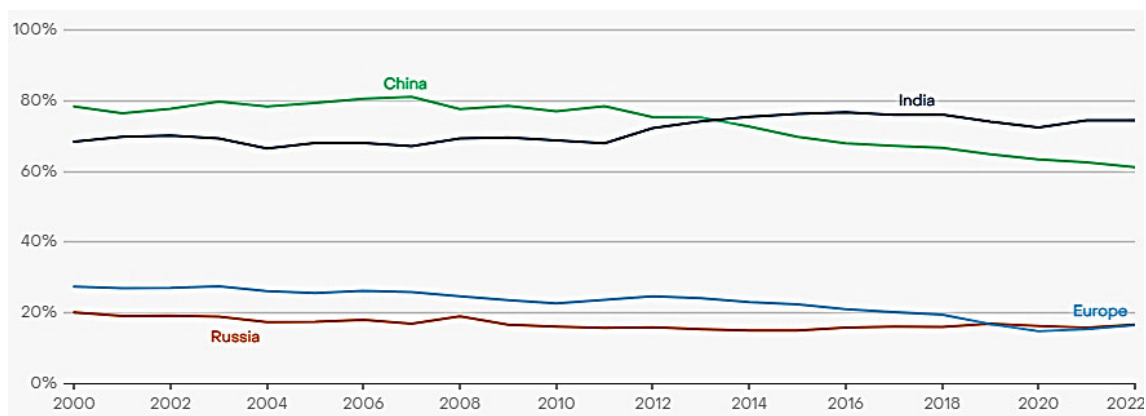


Рисунок 1.5 – Доля угольных ТЭС в выработке электроэнергии в Китае, Индии, ЕС и РФ

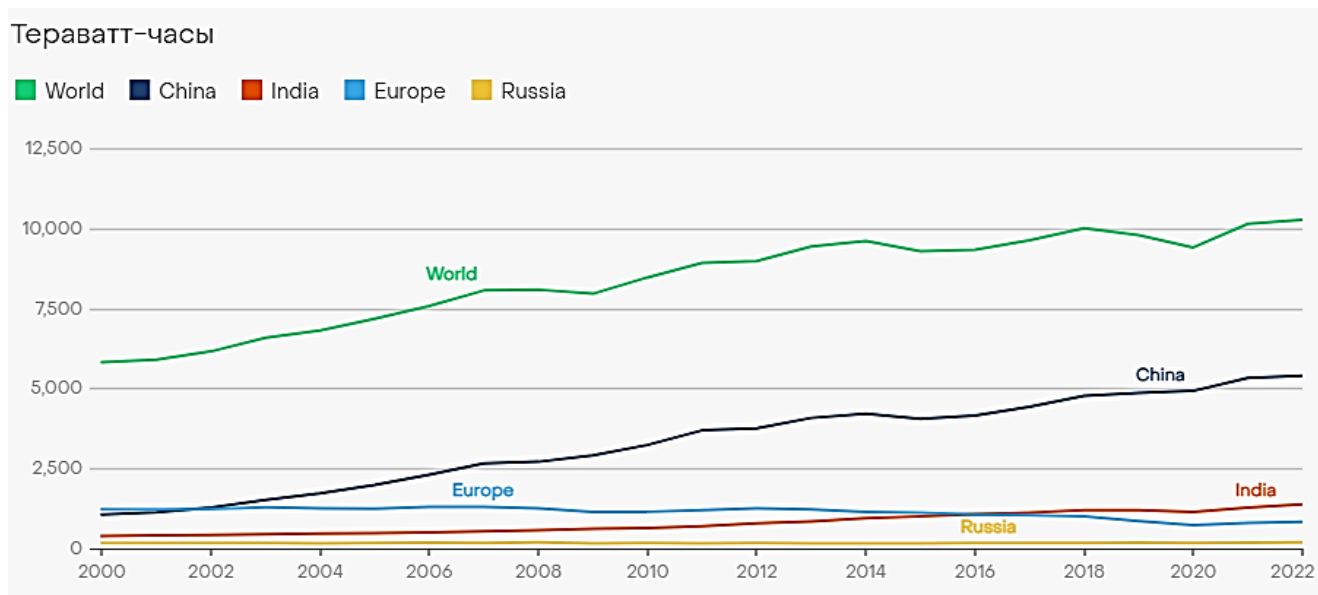


Рисунок 1.6 - Выработка электроэнергии угольными ТЭС в мире
и разных странах

Благодаря невысокой стоимости угля по сравнению с газом и мазутом [2], его доля преобладает при производстве всех энергоемких видов продукции и в обеспечении населения недорогой тепловой и электрической энергией, тем самым увеличивая покупательскую способность, что в полной мере соответствует ЦУР №7.

Один из выводов Европейской экономической комиссии ООН – «Результаты моделирования сценариев развития энергетики указывают на отсутствие экономически рационального сценария, предусматривающего существенное сокращение потребления ископаемого топлива к 2050 году».

Некоторые европейские страны отказались или планируют отказаться от угольной генерации к 2050 г. (рисунок 1.7), однако, доля угольной генерации в странах ЕС составляет менее 20 %, а выработка электроэнергии на основе угольной генерации в странах ЕС в 6,5 раз меньше, чем в Китае.

В таблице 1.2 приведены категории стран ЕС, которые осуществляют различные планы в области угольной энергетики согласно их национальным энергетическим стратегиям.

В мире доля «зеленой» энергетики растет. Так, доля ВИЭ в мире в 2022 г.

согласно [3] составила 14,6 %. Однако, вместе с ростом доли ВИЭ в разных странах мирового сообщества обсуждается вопрос о достижении баланса обеспечения энерго-экологической безопасности энергетики и доступности энергии для всех слоев населения.

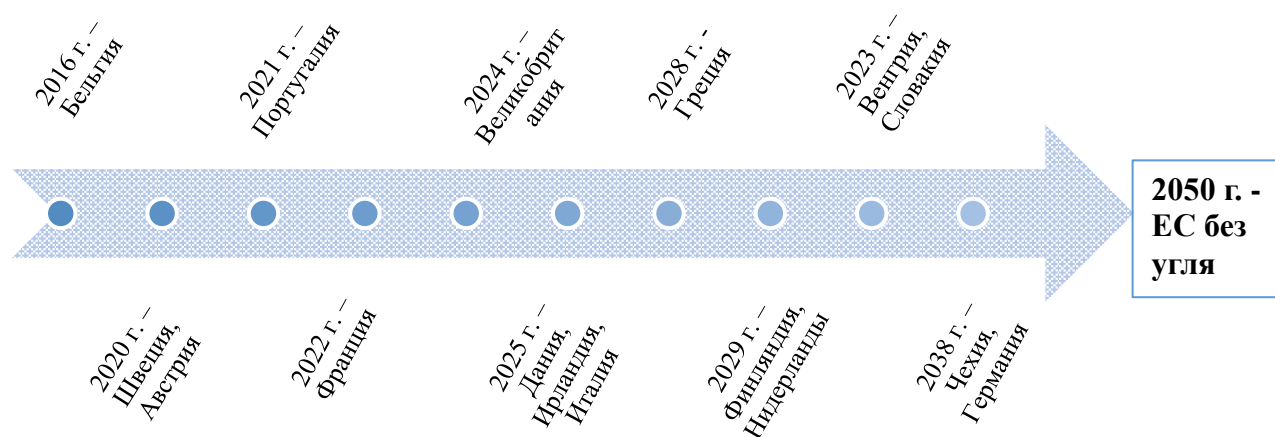


Рисунок 1.7 — Планы отдельных государств ЕС по отказу от угольной генерации

Таблица 1.2 - Группы стран ЕС, реализующие различные решения в области угольной энергетики

Отсутствует уголь в энергобалансе стран	Отсутствуют планы по отказу от сжигания угля	Отказ от сжигания угля
Албания, Кипр, Эстония, Исландия, Латвия, Литва, Люксембург, Мальта, Норвегия, Швейцария	Болгария, Босния-Герцеговина, Хорватия, Косово, Черногория, Польша, Румыния, Сербия, Турция	Бельгия – 2016 г. Австрия, Швеция – 2020 г.

Согласно Отчету ООН на 2022 г. [6], на пути достижения ЦУР 7 - обеспечение доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех, на сегодняшний день 733 млн человек в мире не имеют доступа к электрической энергии; при развитии такими темпами ЦУР 7 не будет достигнута к 2030 г. Таким образом, цель устойчивого энергетического будущего стоит рассматривать во взаимосвязи реальных проблем социально-экономического развития разных стран. С учетом роста населения планеты достичь ликвидации

«энергетической бедности» без использования угля и углеводородов в энергетике как минимум к 2050 г. представляется невыполнимой задачей.

Согласно Доктрине энергетической безопасности РФ [7] ключевой целью обеспечения энергетической безопасности является поддержание защищенности экономики и населения страны от угроз энергетической безопасности на уровне, соответствующем требованиям законодательства Российской Федерации. Это, в частности, касается надежного и устойчивого обеспечения российских потребителей энергоресурсами стандартного качества и услугами в сфере энергетики. Таким образом, угольная промышленность страны направлена на реализацию этой цели, а наличие угля в топливно-энергетическом балансе повышает энергетическую безопасность и надежность энергоснабжения.

Одной из наиболее масштабных государственных задач, приведенных в основном документе стратегического планирования в сфере энергетики [8], определяющего направления и приоритеты государственной энергетической политики РФ и способствующих реализации цели развития энергетики Российской Федерации, является уменьшение негативного воздействия объектов ТЭК на окружающую среду.

Проблема обращения с золошлаками энергетики особенно остро стоит на Урале, в Сибири, на Дальнем Востоке, где преобладает угольная генерация. Возраст угольных ТЭС, в среднем, составляющий более 50 лет, существенно влияет на показатели надежности, экономичности, а также экологические характеристики станций [9 - 11]. Крайне важным является вопрос переработки накопленных золошлаков, размещенных на золошлакоотвалах ТЭС России за долгий период эксплуатации объектов угольной генерации при ежегодных объемах образования золошлаков от 20 до 30 млн т [10 - 14]. На сегодняшний день на золошлакоотвалах ТЭС накоплено 1,7...2 млрд т золошлаков [15 - 17]. В сфере обращения с отходами эффективна концепция экономики замкнутого цикла, когда отходы одного производственного цикла становятся сырьем для другого, для чего должна быть создана система стимулирования всех причастных к проблеме обращения с золошлаками ТЭС [18].

Несмотря на разработку нескольких сотен технологий использования золошлаков угольных ТЭС, применение нашли лишь некоторые, да и то не повсеместно [19]. Основными направлениями использования золошлаков ТЭС являются изготовление строительных материалов и применение золошлаков в строительных проектах, дорожное строительство, сельское хозяйство, обратная засыпка, включая закладку шахт и карьеров и др.

Определяющую роль в решении проблемы обращения с золошлаками тепловых электростанций играет государственная политика в областях: охрана окружающей среды, рациональное природопользование, обращение с побочными продуктами промышленного производства.

Направления и конкретные технологии использования золошлаков электростанций зависят от их исходных потребительских свойств, комплексной законодательной базы, позволяющей и стимулирующей их применение, и, конечно, от потребностей рынка и экономического эффекта от их использования взамен природных материалов.

На формирование и развитие рынка золошлаков энергетики влияет следующее:

- наличие нормативно-технической базы, способствующей максимальному использованию побочных продуктов сжигания угля взамен природных ресурсов, начиная с терминологии и определений;
- наличие золошлаков и/или продуктов их переработки со стабильными потребительскими свойствами, использующимися для замещения природного сырья;
- экономический эффект от замещения природного сырья золошлаками, включая расходы на логистику;
- обеспеченность минеральными и нерудными природными ресурсами региона, в котором расположена ТЭС;
- наличие санитарно-гигиенических ограничений на использование золы, шлака, золошлаковой смеси и продуктов их кондиционирования для использования в различных отраслях экономики;

- объемы и сезонность спроса на природные ресурсы, которые могут быть замещены золошлаками в традиционных отраслях экономики (производство строительных материалов, строительство объектов промышленного и гражданского назначения, транспортное строительство, сельское хозяйство и др.);
- развитость транспортной инфраструктуры и логистическое плечо;
- спрос на отдельные фракции золошлаков для производства новых видов готовой продукции с использованием нанотехнологий или для производства композитных материалов, изготовление которых невозможно на основе компонентов только из природного сырья;
- тенденции развития спроса на природное сырье, которое может быть замещено золошлаками и продуктами их переработки.
- информирование общества о наилучших доступных современных технологиях полезного использования золошлаков и потенциальной опасности размещения золошлаков экологически несовершенными способами и др.

На потребительские свойства золошлаков ТЭС оказывают влияние:

- технологии сжигания углей;
- состав и свойства золошлаков (физико-механические свойства, химико-минералогический состав, токсичность, радиоактивность);
- технологии вывода шлака из топки котельных установок;
- технологии улавливания летучей золы;
- технологии отбора золы и шлака от котельных установок, внутреннего и внешнего транспортирования золы и шлака, отгрузки золошлаков потребителям и размещения невостребованной части золошлаков на золошлакохранилищах.

Об успехах разных стран, в энергетическом балансе которых присутствует угольная генерация, можно судить по статистике образования и использования золошлаков, которая представлена ниже.

В разных странах золошлаки идентифицируются в зависимости от национального законодательства, и их единый статус до сих пор отсутствует.

Существуют разные определения золошлаков энергетики, которые встречаются в научно-технических источниках [13, 14]: побочные продукты сжигания угля, остатки от сжигания угля, побочные продукты использования угля.

Имеются примеры с более нейтральными определениями, основанными на свойствах материалов, прямых или косвенных указаниях технологий сжигания: золошлаки, летучая зола, топливная зола пылеугольного сжигания, шлак котлов с твердым шлакоудалением, шлак котлов с жидким шлакоудалением.

Определения золошлаков энергетики согласно РД 34.27.109-96 [20]:

«Зола (летучая зола) - частицы минерального остатка твердого топлива с включением некоторого количества недожога (несгоревшей органической части топлива), которые выносятся дымовыми газами из топки котлоагрегата.

Шлак - частицы минерального остатка твердого топлива с включением некоторого количества недожога, образующиеся в топках котлов с камерным сжиганием, выпадающие из факела потока дымовых газов в топке котла и выходящие из шлакоудалителя котла с крупностью до 40 мм или поступающие из топки котлоагрегата с КС (ЦКС) через охладители шлака в шлакоудалители с крупностью до 10 мм.

Золошлаковая смесь (ЗШС) - гидратированная смесь золы и шлака, образующаяся в результате размещения на гидрозолошлакоотвале золошлаковой пульпы.

Золошлаковые материалы (ЗШМ) - зола и шлак с исходными свойствами, золошлаковая смесь и продукты их кондиционирования».

Рекомендуется использовать следующее определение золошлаков энергетики для правовых и нормативно-технических документов всех уровней. ***«Золошлаки энергетики — это побочные продукты сжигания твердого органического топлива в котельных установках, которые представляют собой ценное минеральное сырье техногенного происхождения и являются товарными продуктами после сертификации их санитарно-гигиенических и дру-***

гих потребительских свойств для использования в различных отраслях экономики или отходами в случае их постоянного размещения на золошлакохранилищах» [21].

Во многих странах золошлаки имеют юридический статус отходов, но, согласно национальному законодательству некоторых стран, существует разница между отходами для использования и отходами для складирования (таблица 1.3). Как правило, золошлаки считаются неопасными отходами [11, 22].

Таблица 1.3 - Классификация ППСУ в разных странах

Страна	Статус отходов	Статус опасных отходов	Принятие Базельской конвенции	Принятие регламента REACH	Международное соглашение о ртути	Экологические условия для утилизации
США	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Австралия	Да	Нет	Да	Нет	Нет ³	Да
Канада	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Китай	Да	Нет	Да	Да ²	Да	Да
Европа	Да ¹	Нет	Да	Да	Да ³	Да
Индия	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Индонезия	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Израиль	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Да
Япония	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Россия	Да	Нет	Да	Нет	Да ³	Да
ЮАР	Да	Нет	Да	Нет	Да ³	Да

¹ – в некоторых странах-членах ЕС определены, как побочные продукты или продукты;

² – REACH Китая подобен REACH стран ЕС;

³ – в ожидании ратификации.

Членами Всемирной сети по побочным продуктам сжигания угля (ППСУ) согласованы определения, представленные в таблице 1.4 [23].

Таблица 1.4 - Определения ППСУ

Термин	Определение
Побочные продукты сжигания угля	ППСУ включают летучую золу, шлак котлов с твердым и жидким шлакоудалением, золу котлов с кипящим слоем и продукты сероочистки, которые образуются при сжигании угля или являются продуктами очистки дымовых газов.
Летучая зола	Мелкие частицы золы, образующиеся в результате сжигания угля на электростанции, улавливаются с помощью электрофильтров. Летучая зола также известна в некоторых странах, как зола пылеугольного топлива. Составляет от 85 % от всех ППСУ.

Продолжение таблицы 1.4

Термин	Определение
Топочный шлак	Крупные частицы, которые падают в под топочной камеры (холодной воронки). Расплавленный шлак прилипает к трубам котла и в конечном итоге стекает в под топочной камеры. Многие топки оборудованы шлаковыми ваннами для водяного охлаждения шлака. Шлак обычно составляет менее 15 % всех ППСУ.
Микросферы	Полые зольные частицы, образующиеся в топочной камере при сжигании топлива. Представляют собой мелкие сферические частицы. Они всплывают на поверхности воды. Обычно микросферы собирают с поверхности гидрозолошлакоотвалов систем гидрозолоудаления ТЭС. Составляют от 1 до 2 % от всех ППСУ.
Кондиционированная зола	Летучая зола, смешанная с небольшим количеством воды (обычно от 10 до 20 % на сухую массу), во избежание пыления при ее транспортировании в автоцементовозах с целью продажи или дальнейшего использования.
Продукты сероочистки	Образуются при введении в поток дымовых газов кальция для удаления соединений серы. Традиционная схема может состоять из измельченного известняка в воде, пропускаемого через поток газа. Соединения серы превращают карбонат кальция в сульфат кальция или гипс, который используется в производстве стеновых плит для общестроительных работ.
ППСУ, размещенные на золошлакоотвале	ППСУ, транспортируемые системами золошлакоудаления и складированные на активной или неактивной картах золошлакоотвалов, которые могут быть использованы в различных направлениях

1.2 Статистика образования и использования золошлаков ТЭС в разных странах

Начиная с 2014 г., объем образования побочных продуктов сжигания угля в мире составляет более 1 млрд т [13, 22, 23], и эта цифра растет: так, в 2019 г. она составила 1,1 млрд т, в 2022 г. согласно данным членов Всемирной сети по побочным продуктам сжигания угля [23] в 2022 г. в энергетическом секторе всего мира образовано около 1,2 млрд т золошлаков. В США, ЕС и других промышленно развитых странах уровень переработки золошлаков энергетики - более 60 %. В Индии этот показатель составляет 100%, в Китае – 60%. В 15 странах Евросоюза (ЕС-15) зафиксирован самый высокий уровень использования золошлаков - 120 %; данный показатель означает, что перерабатывается больше побочных продуктов сжигания угля, чем образуется. В России по данным Минэнерго России в 2022 г. использование золошлаков составило около 28 % объема их образования. Низкие показатели утилизации золошлаков в России по сравнению с зарубежными странами обусловлены, прежде всего, применением

на ТЭС систем гидрозолошлакоудаления и складирования золошлаков в отвалы в виде золошлаковой смеси, а также отсутствием достаточной нормативно-правовой базы, стимулирующей всех участников рынка повышать объемы их использования. Более подробная информация о годовых объемах образования и использования побочных продуктов сжигания угля в 2022 г. представлена в таблице 1.5 согласно данным [23].

Таблица 1.5 - Годовые объемы образования и использования побочных продуктов сжигания угля в разных странах в 2022 г.

Страна/Регион	Объем образования ППСУ, млн т	Объем утилизации ППСУ, млн т	% использования зо- лошлаков
Австралия	10,6	6,6	62,0
Китай	650,0	388,0	60,0
Корея	7,5	6,2	83,0
Другие азиатские страны	67,0		0,0
Канада	3,4		0,0
Европа	60,0		
ЕС-15	15,0	18,0	120,0
Индия	282,8	282,7	100,0
Япония	12,1	11,6	97,0
Ближний Восток и Африка	34,5	2,4	7,0
Израиль	0,5	0,5	100,0
США	45,5	29,3	64,0
ЮАР	8,6		0,0
Россия	17,4	5,0	29,0
Всего:	1199,9	750,7	62,0

Существует два альтернативных пути обращения с золошлаками энергетики: использование (полезное применение, утилизация) или размещение на золошлакохранилищах (ЗШХ), чаще всего являющихся гидрозолошлакоотвалами (ГЗО).

Золошлаки, в основном, используются при производстве цемента и бетона, что, прежде всего, относится к кремниевой золе. Кальциевая зола, в основном, используется как для закладки отработанных горных выработок, так и в качестве вяжущих, учитывая ее гидравлические свойства. Гипс установок сероочистки преимущественно используется в качестве сырья взамен природного гипса и применяется в различных областях - от стеновых панелей до штукатурки, а также

в цементной промышленности в качестве добавки-регулятора сроков схватывания.

Достаточно подробная информация о применении золы и шлака ТЭС России приведена в таблице 1.6 согласно [24].

Таблица 1.6 - Применимость золошлаков ТЭС для различных технологий их использования согласно данным Минэнерго РФ

	Летучая зола		Шлак	
	Бурий уголь	Каменный уголь	Бурий уголь	Каменный уголь
Добавки к бетону	×	×		
Легкие наполнители для бетонов	×	×	×	×
Ячеистый бетон, пористый бетон	×	×		
Тяжелый бетон	×	×		
Добавка в цемент	×	×	×	×
Составляющая цементного клинкера	×	×	×	×
Производство сухих строительных смесей	×	×	×	×
Производство огнеупоров, керамических изделий и обжигового кирпича	×	×	×	×
Производство звукоизоляционных материалов		×		×
Производство цеолитов	×	×		
Планирование территорий для объектов промышленного и гражданского строительства	×	×		
Наполнитель для асфальтобетона, связующие и подстилающие дорожные слои для строительства дорог	×	×		
Засыпка дренажных траншей	×	×		
Гидротехнические бетоны для строительства дамб и плотин	×	×	×	×
Стабилизация физико-механических свойств грунтов	×	×		
Устройство гидроизоляционных экранов	×	×	×	×
Заполнение шахт и горных выработок	×	×	×	
Рекультивация карьеров	×	×	×	
Вертикальное планирование неудобий сельскохозяйственного назначения и ландшафтная архитектура	×	×	×	×
Улучшение качества нарушенных и бедных земель	×	×		
Захоронение отходов других отраслей промышленности	×	×	×	×
Иммобилизация опасных веществ	×	×		
Устройство поверхностных фильтров для изоляции мест хранения отходов			×	×
Сырье для биологической очистки сточных вод			×	×
Другие методы полезного применения золошлаков	×	×	×	×

В Китае наиболее крупномасштабные технологии утилизации золошлаков ТЭС являются менее экономически выгодными, что отражает рисунок 1.8.



Рисунок 1.8 — Зависимость объема использования золошлаков ТЭС Китая от экономической ценности реализации технологий

На рисунках 1.9- 1.12 приведены статистические данные о направлениях применения золошлаков ТЭС в Китае, Индии США и Австралии в 2022/2023 гг. соответственно [25-29].

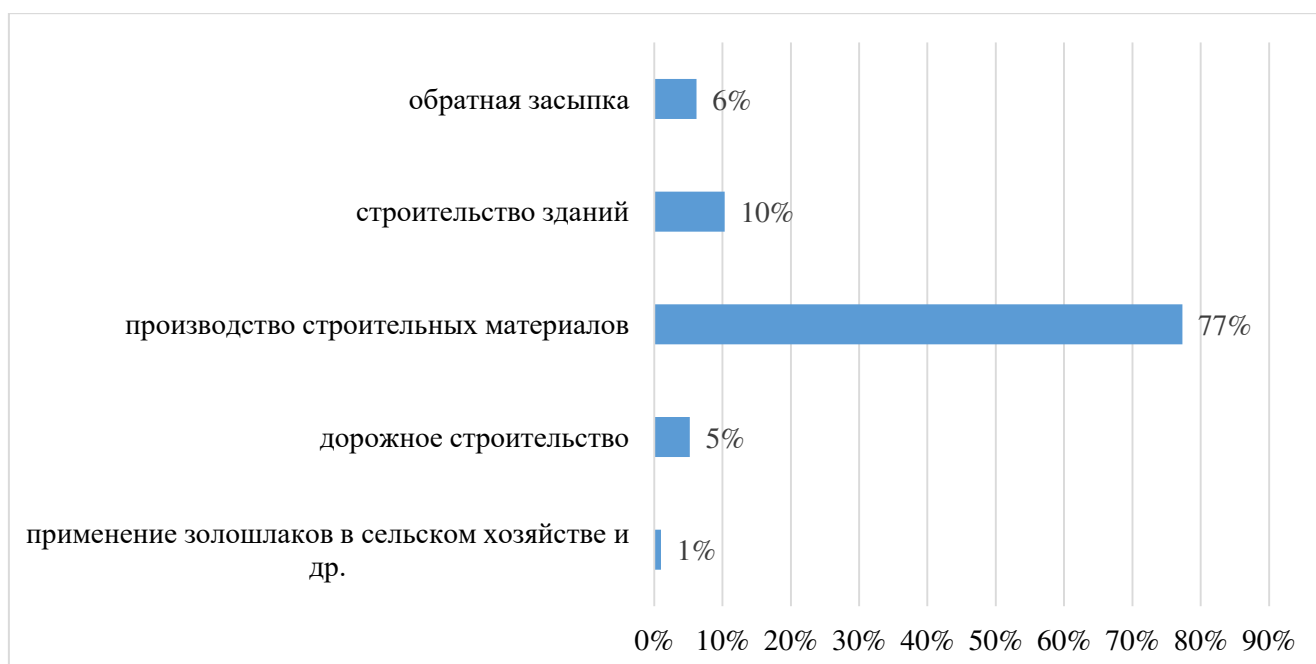


Рисунок 1.9 — Направления применения золошлаков ТЭС в Китае в 2022 г.

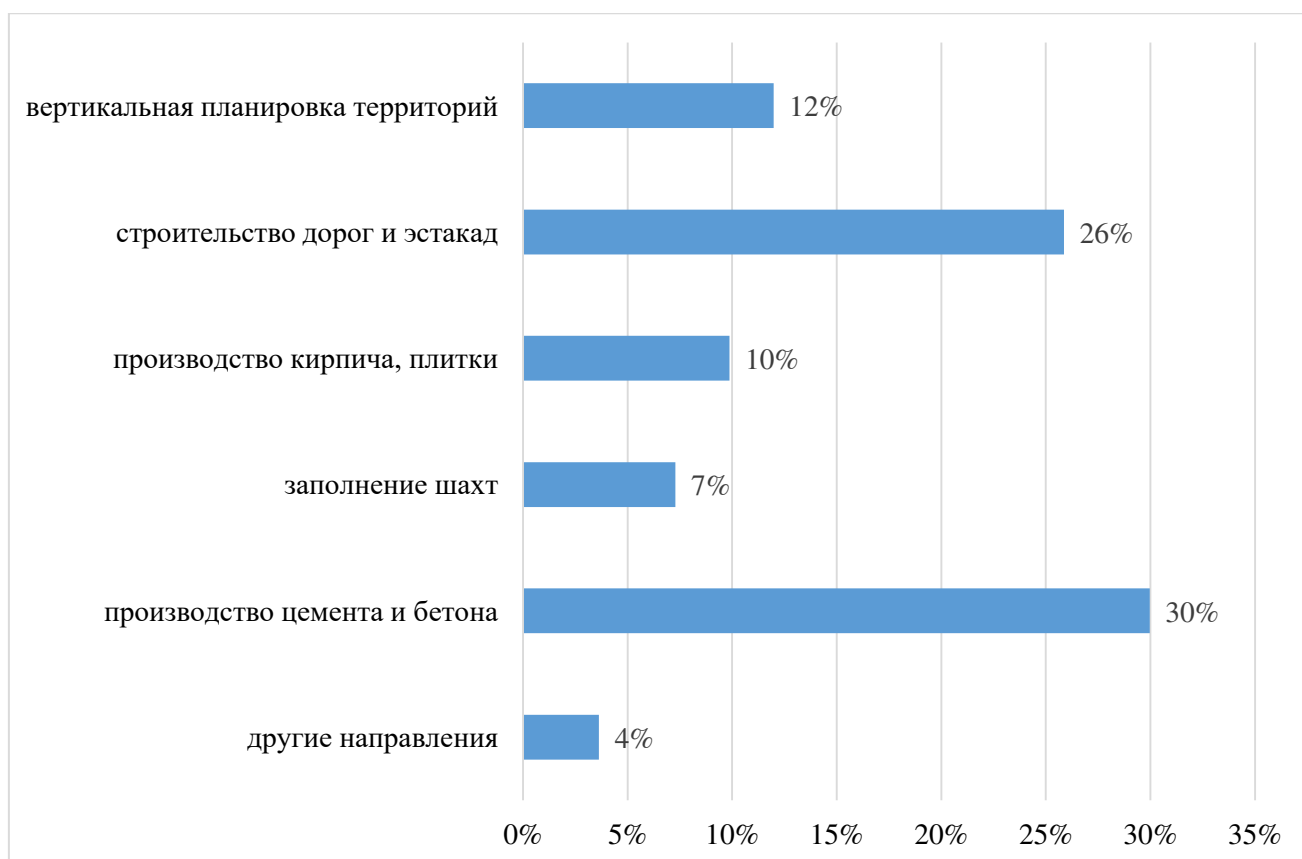


Рисунок 1.10 — Направления применения золошлаков ТЭС в Индии в 2022 г.

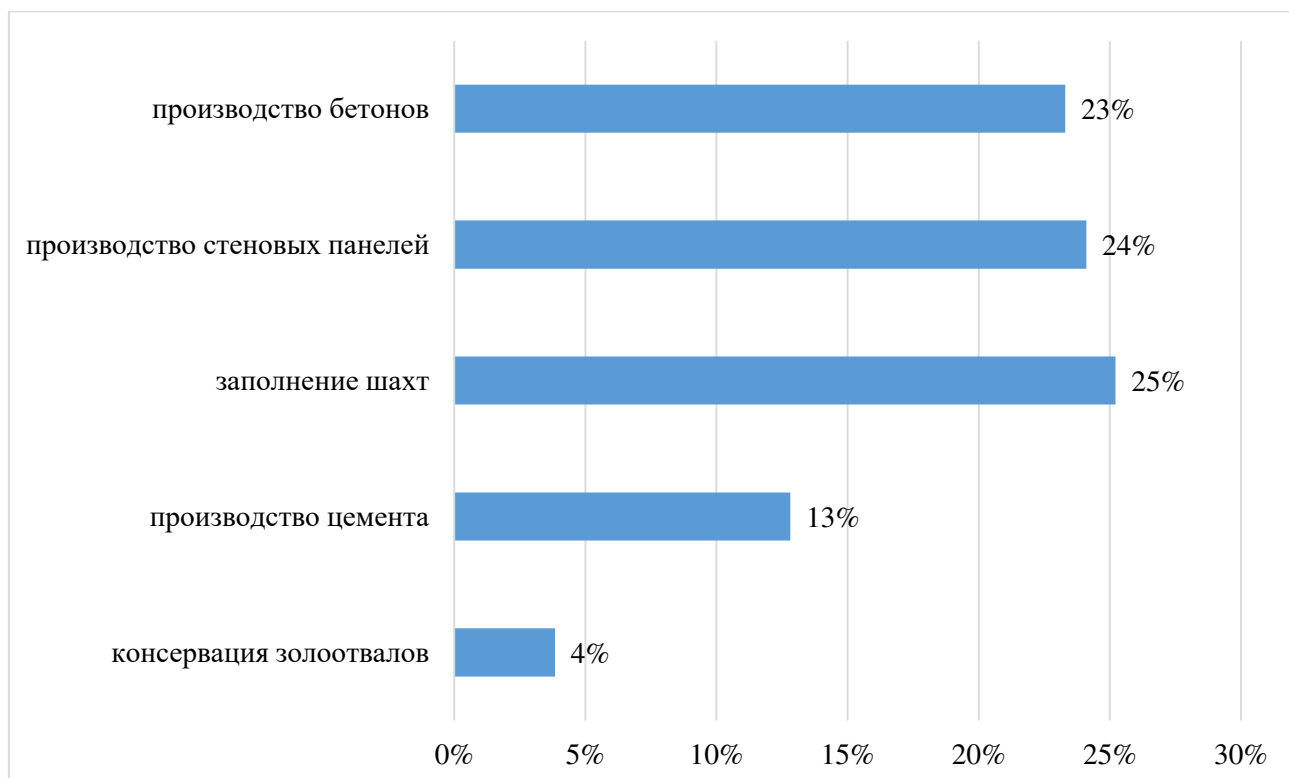


Рисунок 1.11 — Направления применения золошлаков ТЭС в США в 2022 г.

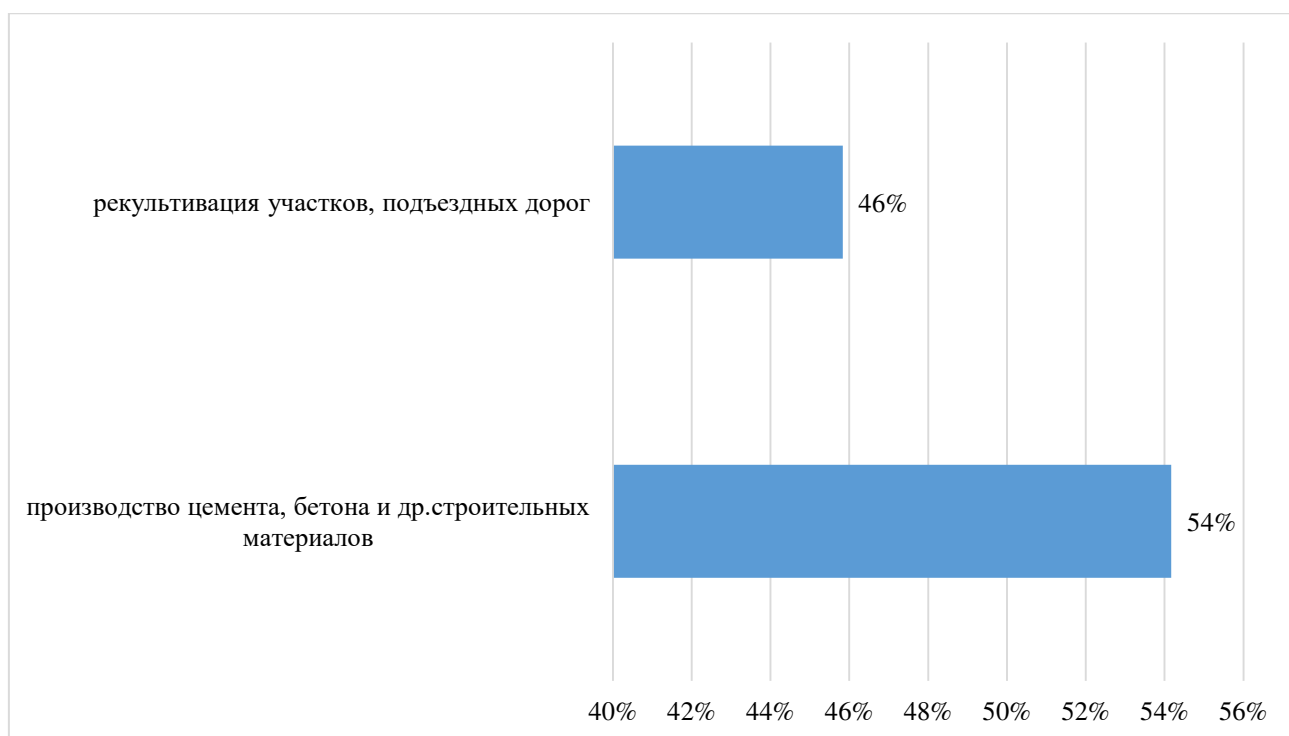


Рисунок 1.12 — Направления применения золошлаков ТЭС в Австралии в 2023 г.

1.3 Обзор направлений использования золошлаков в России и за рубежом

1.3.1 Использование летучей золы в проектах гражданского и дорожного строительства

В результате обзора и анализа источников информации [30-40] было установлено, что для строительства зданий и сооружений в США, Канаде, Великобритании, странах ЕС, Индии и других странах мира, начиная с 1980-х гг. применяется сухая зола для замещения части цемента. Доля замещения цемента летучей золой может варьироваться от 25 до 55% в зависимости от национального законодательства. Применение летучей золы в строительных конструкциях позволяет повысить их прочность и минимизировать объемы цемента и бетона, необходимые для фундамента, при одновременном снижении затрат на строительство.

Еще одним направлением, которое обладает потенциалом использования

больших объемов летучей золы, является строительство дорог и насыпей эстакад. Летучая зола используется при строительстве автомобильных дорог как в России, так и за рубежом. При этом, существует несколько направлений ее применения:

1. В качестве материала, заменяющего минеральный порошок при приготовлении асфальтобетонной смеси.
2. Для устройства основания дорожных одежд из каменных материалов, как самостоятельное вяжущее.
3. Добавка, заменяющая часть цемента и заполнителя при приготовлении тяжёлого бетона и раствора.

В целом, при использовании золы снижается потребление природных ресурсов (песок, гравий, щебень), необходимых для реализации строительных проектов. Также использование золы приводит к сокращению выбросов парниковых газов.

В дорожном строительстве летучая зола, используемая как структурный наполнитель, является лучшим геотехническим материалом, чем природные грунты, особенно вследствие фракционного состава, плотности, характеристик уплотнения, прочностных характеристик, проницаемости и удобства при проведении работ. Кроме того, использование летучей золы приводит к сбережению ценной плодородной земли, которая бы в противном случае использовалась для таких целей.

В 2016 г. в Ступинском районе Московской обл. завершен проект строительства дороги с использованием золошлаков Каширской ГРЭС. Золошлаки применялись в качестве грунта для сооружения земляного полотна. По результатам реализации проекта была построена транспортная развязка и надземный путепровод в районе железнодорожной станции Жилёво, 87-й километр железнодорожного перегона Михнево-Жилёво. Построенный объект представляет собой шестиполосное дорожное полотно (по три полосы в каждую сторону) длиной 105,7 метров, с максимальной высотой насыпи – 14 метров. Вместе со съездами

и участком главного хода автомобильной дороги общая протяженность строительства составила 3...4 км.

Более подробная информация о реализованных проектах с использованием летучей золы при строительстве различных объектов приведена в Приложении Н и представлена в [38].

1.3.2 Применение золы в сельском хозяйстве

Практика мирового земледелия свидетельствует о том, что в зонах с промывным режимом увлажнения невозможно создать высокое плодородие почвы без известкования. Так, например, почвы на территории Дальнего Востока России, Красноярского края в большинстве своем кислые, имеют тяжелый гранулометрический состав, часто переувлажняются. Поэтому, чтобы улучшить условия произрастания культурных растений и условия их питания, необходимо вносить мелиоранты. Основными химическими мелиорантами кислых почв являются карбонатные породы – известняк, доломит.

В связи с подорожанием транспортных услуг и цен на импортируемые удобрения особого внимания заслуживает вопрос применения вторичного сырья, в том числе местных золошлаков в сельском хозяйстве в качестве мелиорантов и удобрений. Тем более, что во многих случаях отмечается значительное накопление золошлаков на золошлакоотвалах вблизи работающих угольных ТЭС. Однако, для использования золошлаков с целью раскисления почв должны быть проведены соответствующие исследования с учетом свойств конкретных золошлаковых материалов и исходных свойств почв.

Россия. Известкование почв позволяет уменьшить процесс химизации земледелия и является природоохранным и энергосберегающим фактором. На почвах с оптимальной реакцией среды можно снижать дозы азотных и фосфорных удобрений на 15...20 %, уменьшая загрязнение почвы и растений, экономя минеральные ресурсы. Кроме того, на хорошо известкованных почвах снижается подвижность в почве и поступление в растения многих токсичных для человека

веществ (тяжелых металлов, радионуклидов, остатков пестицидов и т.п.). Известкованием создается оптимальная реакция среды в почве и оптимальное содержание кальция в почвенно-поглощающем комплексе.

Вопрос использования золы эстонских сланцев в качестве известковых удобрений изучался еще с 1960-ых гг. в СССР. Сланцевая зола отличается способностью нейтрализовать почвенную кислотность и содержит многие нужные для растений питательные элементы. Из питательных элементов в сланцевой золе в значительном количестве содержатся не только кальций, но и сера, магний и калий. Они являются относительно хорошо растворимыми веществами. Особенно большая нейтрализующая способность свойственна пылевидной сланцевой золе, причем наиболее крупная пылевидная зола имеет и наиболее высокую нейтрализующую способность, а также максимальное содержание кальция и магния. Чем мельче зола, тем меньше ее нейтрализующая способность, и тем выше содержание калия и серы.

Из результатов химических анализов каменноугольных зол стало ясно, что золы большинства ТЭС характеризуются отсутствием или незначительным содержанием соединений кальция и магния, поэтому их изучение было нецелесообразно. Особое внимание уделялось золам углей Канско-Ачинского бассейна. Результаты исследований показали высокую эффективность зол, используемых в качестве известкового удобрения, внесенного в почву из расчета гидролитической кислотности. Благодаря наличию в их составе других питательных веществ, в том числе микроэлементов, наблюдается превышенное действие зол на урожай и на качество получаемой продукции по сравнению с молотым известняком.

Индия. Наличие кальция, магния, цинка, железа и других элементов делает летучую золу источником микроэлементов для применения ее в сельском хозяйстве. Ее применения увеличивают рост и урожайность сельскохозяйственных культур от 15 до 200 и более %. Летучая зола является также хорошим кондиционером почвы, мелиорантом кислых почв и ее применение позволяет улучшить водопоглощающую способность и другие физические свойства почв, важные для роста растений.

Единичные эксперименты и опыты, проведенные ранее, в настоящее время перешли в стадию промышленных и научных проектов с тем, чтобы показать полезное применение летучей золы в сельском хозяйстве. 15 проектов, охватывающих широкий спектр агроклиматических условий, комбинаций «почва-урожай» были поддержаны Миссией по проблеме летучей золы, лесоводством и растениеводством. Проектами также были предусмотрены сбор данных и анализ аспектов возможного отрицательного воздействия соединений тяжелых металлов, токсичных элементов и радиоактивности летучей золы. В результате выполненного анализа свойств летучей золы было установлено, что она не представляет серьезной опасности в части возможного неблагоприятного воздействия, однако, нам необходимо провести работу по снятию обеспокоенности общества этими аспектами [34].

Полевые проекты более чем на 50 местах, на которых растут зерновые культуры, овощи, масличные культуры, а также на заброшенных территориях, рекультивируемых золой, территориях лесохозяйственного и цветоводческого назначения показали обнадеживающие результаты. Улучшение урожайности было зарегистрировано при дозах летучей золы от 20 до 100 т/га. В среднем наблюдалось увеличение урожайности на 20...30 % [11, 42]. Зола была использована совместно с гипсом для рекультивации соленых щелочных почв, приводя в результате к экономии ценного гипса от 50 до 75 % [42].

Основными преимуществами использования золы в сельскохозяйственных целях являются:

- улучшение структуры почвы;
- снижение насыпной плотности почвы;
- улучшение водопоглощения;
- оптимизация показателя pH;
- улучшение аэрации почвы;
- снижение коркообразования на почвах;
- снабжение почвы микроэлементами - Fe, Zn, Cu, Mo, B и т.д.
- снабжение почвы макроэлементами - K, P, Ca и др.

Из 150 млн га обрабатываемых земель на 10 млн га земли в год можно безопасно применять летучую золу. При внесении умеренной дозы летучей золы в количестве 20 т/га, ее использование составит 200 млн т/год. Тем самым спрос на летучую золу будет больше текущего выхода. Дефицит летучей золы будет покрываться за счет использования золы, накопленной на гидрозолошлакоотвалах ее запасов в количестве 1,5 млрд т. Урожайность полей после внесения золы повысилась бы на 5 млн т продовольственных зерновых культур в год с ежегодным доходом в 623 млн долл. США [11].

1.3.3 Использование золошлаков для заполнения горных выработок и карьеров

В сравнительно небольшой промежуток времени возможна масштабная утилизация золошлаков для закладки шахт, что существенно может повысить уровень их использования. Во многих странах реализованы проекты по применению золошлаковой пульпы для закладки отработанных штреков, что позволяет одновременно использовать золошлаки и уменьшить риск возникновения пожаров в отработанных секциях. Такой опыт имеется в странах ЕС, США, Индии и других странах.

Индия. Около трети ТЭС Индии находятся рядом с шахтами. В большинстве случаев для обратной засыпки шахт используется песок с русел рек, которые обычно находятся в 50...80 км. Помимо платы за недра огромная сумма расходов приходится на транспортировку песка. По оценкам около 15...20 млн т золы в год можно безопасно использовать для закладки шахт. При этом экономия составит около 30 млн долл. США в год [11].

Технология использования летучей золы для заполнения шахт была успешно внедрена при участии компании NTPC и Центра научно-исследовательского института горного дела (CMRI).

Использование летучей золы в качестве наполнителя в дополнение к варианту использования речных песков, является экономичным и безопасным. Он позволяет изолировать пожароопасные области шахты.

Летучая зола 20 основных ТЭС может быть успешно использована для закладки шахт (рисунок 1.13). Это экологически приемлемое и экономически целесообразное полезное использование летучей золы. Технологии использования летучей золы для заполнения шахт также позволят извлечь пограничные верхние и нижние пласты углей.

Работы НИОКР проводились в области транспортирования летучей золы в плотной фазе для заполнения шахт, технологий плотного заполнения выработок для добычи толстых пластов до высоководных слоев и т.д. [34].



Рисунок 1.13 — Заполнение шахт золошлаковой пульпой в Индии

США. В 2011 г. в 150 км от г. Питсбург, Пенсильвания, США был завершен проект по обратной засыпке шахты Ревлок с применением золошлаковой смеси. Шахта Ревлок работала с 1917 г. до своего закрытия в 1980-х гг. В результате работы шахты остались отвалы вскрышных и вмещающих пород, которые повышали кислотность почвы и местных ручьев. Мероприятия по рекультивации снизили кислотность по сравнению с исходным уровнем на 93 %, уровень алюминия – на 95 %, марганца – на 71 %, а железа – на 92 %. За время реализации проекта с 1989 по 2011 гг. с участка было вывезено около 3,2 млн т вскрышных

и вмещающих пород. Примерно такое же количество золошлаковой смеси, взятой в т.ч. из резервов Ebensburg Power Company, выполняющей работы, было возвращено для обратной засыпки.

В ходе проекта было рекультивировано около 23 га земли, из которых 8 га пригодны для промышленного применения. Отвалы вскрышных и вмещающих пород и пожары исчезли, земля вернулась к своему естественному состоянию, а ручей Блэклик приобрел качество, пригодное для жизни рыб и других водных организмов [33].

1.3.4 Использование золошлаков в качестве сорбентов и биосорбентов

Для очистки водных объектов и почвы от нефти и нефтепродуктов могут применяться сорбенты различного происхождения – не только природного, но и техногенного. В качестве последних эффективно применяются алюмосиликаты из золошлаков ТЭС.

Биосорбенты – препараты, изготовленные на основе сорбционного материала (носителя) и иммобилизованных на нем клеток микроорганизмов. В качестве носителя используются различные природные и искусственные материалы [43-45]. Однако перспективнее использовать отходы производства с целью сокращения объемов их складирования, а также эффективного использования полученных биосорбентов в природоохранных технологиях [46].

Кроме того, золошлаки ТЭС могут эффективно применяться в качестве сорбентов при очистке хозяйственно-бытовых стоков, поглощая ионы аммония. Отработанный сорбент можно в дальнейшем использовать как мелиорирующую добавку с пролонгированным удобрительным эффектом при формировании насыпных грунтов при рекультивации нарушенных территорий [47].

1.3.5 Перспективы использования золы ТЭС в водородной энергетике

В связи с исчерпанием традиционных энергетических ресурсов, большой интерес ученых всего мира представляет разработка технологий, в которых используются альтернативные энергоносители, в том числе, водород. При этом, одна из проблем водородной энергетики – хранение и транспорт водорода. Существуют различные технологии хранения и транспортирования упомянутого энергоносителя, обладающие теми или иными недостатками, которые в разное время достаточно подробно описаны авторами в большом количестве работ, в том числе в [48 - 51]. Для хранения водорода в больших количествах при атмосферном и повышенном давлениях используются газгольдеры, естественные и искусственные подземные резервуары. В таких системах водород хранится в больших количествах с продолжительным, например, сезонным, циклом заправки хранилища и отбора из него водорода [50, 51]. Газообразный водород обычно хранят и перевозят под давлением до 15...35 МПа в баллонах емкостью от нескольких литров до нескольких кубических метров [52]. Для хранения и перевозки небольших количеств сжатого водорода обычно используют стальные баллоны с рабочим давлением до 15...20 МПа. Водород также может храниться в жидком виде (в виде криогенной жидкости).

Кроме упомянутых технологий хранения и транспортирования водорода, которые давно освоены и описаны, существует ряд других – более перспективных методов, в том числе хранение водорода в микрокапсулированном виде [50, 53]. Этот метод можно отнести к хранению газообразного водорода под давлением (35...65 МПа), где роль «баллонов» выполняют стеклянные микросферы диаметром 5 – 500 мкм с толщиной стенки ~ 1 мкм. При повышенной температуре (200...400 °С) стеклянные стенки становятся проницаемыми для водорода, что позволяет проводить заправку системы хранения водородом и выдачу его потребителю. По данным авторов патента [54] перспективными являются технологии, позволяющие создать поглотители, предназначенные для накопления,

хранения и транспортирования водорода, которые изготавливаются в виде изделий необходимых форм и размеров (блоков или зерен) и имеющих высокую сорбционную способность. Для практического использования необходимо, чтобы устройства, позволяющие хранить и перевозить водород, были недорогими, относительно легкими, безопасными и доступными для многократного использования.

Так, подобными поглотителями могут служить слоистые наноструктуры, преимущественно углеродные (углеродные нити, нанотрубки, наночастицы, нановолокна), упомянутые в патенте [55]. В патенте [54] описано применение образцов из карбида кремния, имеющих высокую сорбционную способность.

Золы ТЭС, содержащие в себе до 60 % оксидов кремния и до 30 % оксидов алюминия, также обладают ярко выраженными сорбционными свойствами. Таким образом, одним из перспективных направлений использования побочных продуктов сжигания угля является применение микросфер от сжигания углей для сорбции, хранения и транспортирования водорода [56]. Известно большое количество технологий, в которых микросферы широко используются в качестве наполнителей для различных материалов. Так, например, авторы патента «Способ сорбции и хранения гелия или водорода» [57] описывают пример применения для этих целей полых микросфер из золы Экибастузского угля, сжигаемого на Рефтинской ГРЭС, обладающих достаточной прочностью. В предложенной технологии водород под давлением вводился во внутреннюю полость алюмосиликатных микросфер, предварительно отфлотированных в воде.

1.4 Обзор нормативно-технической документации по обращению с золошлаками

1.4.1 Нормативно-техническая документация в области обращения с золошлаками ТЭС в России

В 2015 г. вступило в силу новое природоохранное законодательство Рос-

сийской Федерации с последующим ужесточением ответственности за негативное воздействие промышленных объектов на окружающую среду, вводятся новые термины и определения, определяются механизмы стимулирования предприятий за внедрение наилучших доступных технологий, меняется порядок расчета экологических платежей за загрязнение воздушного, водного бассейнов и размещение отходов. Это напрямую касается угольных ТЭС, в результате деятельности которых образуются золошлаки. Самым масштабным законодательным актом в области охраны окружающей среды с момента принятия Федерального закона «Об охране окружающей среды» в 2002 г. стал Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [58]. Ключевым аспектом всего природоохранного законодательства является внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) при ведении хозяйственной деятельности юридическими и физическими лицами. Данный ФЗ содержит положения, касающиеся широкого круга вопросов государственного регулирования природоохранной деятельности: это и реформирование природоохранного нормирования вообще, и внедрение НДТ и комплексных экологических разрешений в частности, категорирование объектов хозяйственной и иной деятельности в зависимости от уровня негативного воздействия на окружающую среду и соответствующая дифференциация обязательных экологических требований к ним, введение единой государственной системы учета объектов хозяйственной и иной деятельности, законодательное регулирование платы за негативное воздействие на окружающую среду, создание системы экономического стимулирования при осуществлении природоохранных мероприятий [59].

Основными федеральными законами Российской Федерации, регулирующими деятельность в области обращения с золошлаками энергетики, являются:

1. Федеральный закон №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [60].
2. Федеральный закон №219-ФЗ «О внесении изменений в ФЗ «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [73].

3. Федеральный закон №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [61].

4. Федеральный закон №268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [62].

5. Федеральный закон № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» [63].

6. Федеральный закон № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе» [64].

7. Федеральный закон № 343-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О недрах» [65].

С марта 2023 г. принят закон об обращении с вторичными ресурсами и их вовлечении в хозяйственный оборот (Федеральный закон №268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [62]). Законом в числе прочего вводятся новые понятия, отсутствовавшие ранее:

- вторичные ресурсы - отходы, которые или части которых могут быть повторно использованы для производства товаров, выполнения работ, оказания услуг или получения энергии и которые получены в результате раздельного накопления, сбора или обработки отходов либо образованы в процессе производства;
- вторичное сырье - продукция, полученная из вторичных ресурсов непосредственно (без обработки) или в соответствии с технологическими процессами, методами и способами, предусмотренными документами в области стандартизации РФ, которая может использоваться в производстве другой продукции и (или) иной хозяйственной деятельности.

Согласно упомянутому закону, вторичные ресурсы подлежат утилизации, и их захоронение не допускается. Также устанавливаются требования при обращении с побочными продуктами производства, к которым могут быть отнесены золошлаки. Учет побочных продуктов производства осуществляется обособ-

ленно от учета основной продукции производства и отходов. Информация об отходах подлежит отражению в программе производственного экологического контроля и отчете об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля. Обращение с побочными продуктами производства будет осуществляться по особым правилам, предполагающим их использование в течение трех лет.

С 1 сентября 2023 г. вступил в силу Федеральный закон № 343-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О недрах» [65], согласно которому для ликвидации горных выработок и иных сооружений, связанных с использованием недр, рекультивации земель можно использовать не только вскрышные и вмещающие горные породы, отходы недропользования V класса опасности, образовавшиеся при осуществлении пользования недрами, а также отходы производства черных металлов IV и V классов опасности, **но и золошлаковые отходы V класса опасности от сжигания угля**, фосфогипс V класса опасности.

Наряду с упомянутыми федеральными законами, принят ряд актов Правительства Российской Федерации в целях развития норм федеральных законов, а также ведомственных актов Минприроды России.

Наиболее существенные из них:

1. Приказ Минприроды России №1029 «Об утверждении порядка разработки и утверждения нормативов образования отходов и лимитов на их размещение» [66].
2. Приказ Минприроды России от 25 февраля 2010 г. № 49 «Об утверждении Правил инвентаризации объектов размещения отходов» [67].
3. Приказ Минприроды России от 08 декабря 2020 г. №1028 «Об утверждении Порядка учета в области обращения с отходами» [68].
4. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 N 792 "Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов, утвержденного приказом Минприроды России" [69].

5. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов" [70].

6. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 г N792 «Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов [71].

Помимо упомянутых федеральных законов и приказов министерств и ведомств, в Российской Федерации действует ряд нормативно-технических документов разного уровня, затрагивающих вопросы обращения с золошлаками ТЭС напрямую или косвенно.

Согласно п.17 Указа Президента Российской Федерации «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» [72] неблагоприятная окружающая среда является причиной ухудшения здоровья и повышения смертности населения, особенно той его части, которая проживает в промышленных центрах и вблизи производственных объектов. Согласно п. 18 этого же документа ежегодно экономические потери, обусловленные ухудшением качества окружающей среды без учета ущерба здоровью людей, составляют 4...6 процентов валового внутреннего продукта.

В соответствии с п. 44 Указа Президента Российской Федерации «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» должны быть решены следующие основные экологические задачи:

- снижение или предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и рациональное использование природных ресурсов;
- ликвидация накопленного экологического ущерба, восстановление деградированных природных экосистем.

Для решения вышеуказанных экологических задач Правительство РФ в 2018 г. утвердило документ «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» [73], (далее по тексту Стратегия) которая рекомендует органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации в пределах своей компетенции:

- принять участие в реализации мероприятий, предусмотренных Стратегией;
- руководствоваться положениями Стратегии при разработке и реализации территориальных схем и региональных программ в области обращения с отходами.

В перечне, состоящем из 20 основных видов промышленных предприятий - источников образования отходов, рассматриваемых в Стратегии [73], включая все основные структурные сферы хозяйственной деятельности, угольные ТЭС, а также объекты, эксплуатирующие промышленные установки для сжигания твердого топлива, и золошлаковые отвалы по значимости занимают с третьей по пятую позиции соответственно.

В 2020 г. Правительство РФ утвердило Энергетическую стратегию до 2035 г. [8]. Согласно упомянутому документу, уровень утилизации побочных продуктов сжигания угля в 2018 г. составил 8,4 % от годового уровня их образования на ТЭС России. Целевыми показателями Энергетической стратегии до 2035 г. предусмотрено достижение уровня утилизации золошлаков к 2025 г. – 15 %, а к 2035 г. – 50 %.

В 2022 г. Правительством России утвержден Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности, которые образуются в результате сжигания угля, торфа и их смесей в энергетических целях [74]. Наряду с Энергетической стратегией до 2035 г., Комплексный план рассчитан до 2035 года, и устанавливает целевой показатель по увеличению доли утилизируемых золошлаков тепловых электростанций и котельных от годового объема образования в 15 % к 2024 году и в 50 % к 2035 г. Кроме того, в документе содержится информация о 12 межотраслевых мероприятиях, направленных на создание экономических предпосылок и нормативное стимулирование внедрения практик вовлечения золошлаков ТЭС и котельных в хозяйственный оборот в качестве вторичного сырья, что позволит заместить до 15 млн т природных ресурсов ежегодно и предотвратит выброс до 6 млн т парниковых газов в пересчете на CO₂-экв. Меры позволят до 2035 года сэкономить угольным ТЭС до 60 млрд

рублей в связи с исключением необходимости расширения емкостей золошлакоотвалов [75].

Комплексный план будет реализовываться в два этапа:

- на первом этапе будет происходить совершенствование организационного методического и нормативно-технического обеспечения практик утилизации отходов;
- второй этап будет направлен на развитие практик утилизации отходов.

Для каждого этапа Комплексного плана установлены:

- перечень мероприятий, которые необходимо выполнить;
- сроки реализации мероприятий;
- ожидаемый результат от выполнения того или иного мероприятия.

Необходимо отметить, что в Российской Федерации на текущий период не сформирован полноценный комплекс нормативных документов в области обращения с золошлаками энергетики, которого было бы достаточно для достижения уровня безотходного производства. В некоторых нормативно-правовых документах, упомянутых ниже, наблюдается несоответствие формулировок и трактований, что существенно затрудняет их применение в различных отраслях хозяйственной деятельности [15].

Согласно Федеральным законам №184-ФЗ [76] и №162-ФЗ [77] стандарты, действующие на территории Российской Федерации, бывают четырех видов: международные, региональные, национальные стандарты и стандарты организаций, к которым относятся и технические условия. Каждый из перечисленных нормативно-технических актов разрабатывается, согласовывается и утверждается в строго установленном порядке.

В связи с изложенным выше, непонятен статус следующих нормативно-технических документов Российской Федерации:

- ГОСТ 26644-85 «Щебень и песок из шлаков тепловых электростанций для бетона». Технические условия [78];
- ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов». Технические условия [79];

- ГОСТ Р 57789-2017 «Золы, шлаки и золошлаковые смеси ТЭС для производства искусственных пористых заполнителей». Технические условия [80].
- ГОСТ 25592-2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов». Технические условия [81].

ГОСТ 25818-2017, ГОСТ Р 57789-2017 и ГОСТ 25592-2019 имеют статус Межгосударственных (региональных) стандартов. Нет однозначного понимания, являются ли указанные документы Национальными стандартами или Региональными стандартами, или Стандартами организаций (техническими условиями) согласно Федеральному закону №162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» [77].

Еще одним действующим документом в области применения золошлаков ТЭС являются ведомственные строительные нормы ВСН 185-75 «Технические указания по использованию зол уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твердого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог» [82].

С сентября 2022 г. в нашей стране заработала электронная торговая площадка по купле-продаже вторичных ресурсов (ЭТП) Российского экологического оператора. Участниками ЭТП стали 36 % компаний, предоставляющих услуги по обращению с отходами. На ЭТП представлены вторичные ресурсы и сырье, в том числе и золошлаки; их можно покупать и продавать, заключать сделки по переработке, покупке, выставлять заказы на исполнение лотов в рамках расширенной ответственности производителя. Кроме того, с целью реализации проектов по повышению объёмов утилизации золошлаковых отходов разработана интерактивная карта, на которой представлена информация о местоположении золошлакоотвалов.

Региональные программы по повышению уровня утилизации золошлаков ТЭС утверждены в 12 субъектах РФ.

В настоящее время ведется активная работа различных государственных структур по вовлечению золошлаков ТЭС в хозяйственный оборот, однако, отсутствует пакет нормативно-технической документации в области обращения с

продуктами переработки золошлаков энергетики (зольные микросферы, недожог угля, магнетит, алюмосиликаты и др.), начиная с определения их как продуктов. Разработка недостающей нормативно-технической документации позволит увеличить уровень утилизации золошлаков ТЭС в России и будет способствовать ликвидации накопленного экологического вреда согласно Указу Президента Российской Федерации «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».

Таким образом, необходим переход от анализа и регулирования объемов накопления отходов к организации производства и регулированию оборота побочных продуктов сжигания угля.

Указанная выше продукция переработки золошлаков должна классифицироваться в строгом соответствии с кодификаторами, а именно ОКПД-2 - Общероссийским классификатором продукции по видам экономической деятельности, ОКВЭД-2 - Общероссийским классификатором видов экономической деятельности, ТН ВЭД - Товарной номенклатурой внешнеэкономической деятельности и ОКС - Общероссийским классификатором стандартов.

Для достижения целей по вовлечению золошлаков ТЭС в хозяйственный оборот страны, а также целей, прописанных в Энергетической стратегии до 2035 г. [8], в законодательном аспекте необходимо следующее:

- создание единого центра ответственности федерального уровня в области обращения с золошлаками энергетики, который бы проводил государственную политику и координировал действия в области решения проблемы золошлаков, инициируя разработку необходимых нормативных документов, реализацию пилотных проектов с использованием золошлаков ТЭС в регионах страны, проводил круглые столы, семинары и конференции, размещал публикации в СМИ и т.д., что позволило бы существенно увеличить уровень утилизации золошлаков ТЭС. Так, например, в Индии таким Центром ответственности является Миссия по проблеме летучей золы, созданная Министерством науки и технологии Индии; в Китае – это Китайская ассоциация циркулярной экономики под управлением

Комитета по контролю и управлению государственным имуществом Государственного совета;

- разработка недостающей нормативно-технической документации в области обращения с золошлаками ТЭС;
- активное межотраслевое взаимодействие на федеральном уровне с реализацией стратегий развития добывающей, обрабатывающей, металлургической, строительной, транспортной и других отраслей экономики, включающих применение золошлаков энергетики в различных технологиях взамен природных ресурсов и материалов;
- разработка и реализация целей дорожных карт соответствующими федеральными органами исполнительной власти во всех угольных регионах РФ;
- разработка и реализация региональных программ и дорожных карт, стимулирующих использование золошлаков энергетики в различных отраслях;
- государственная поддержка малого и среднего бизнеса, занимающегося переработкой золошлаков ТЭС с целью получения полезной продукции;
- совершенствование квалификации персонала в области обращения с золошлаками энергетики за счет постоянно действующей системы подготовки, повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов.

1.4.2 Международные стандарты в области использования летучей золы в цементах и бетонах

Наиболее масштабным и высокотехнологичным направлением использования летучей золы является ее применение при производстве бетонов и цементов. При сжигании каменных, битуминозных и полубитуминозных углей в котлах с твердым шлакоудалением образуется кремниевая зола, имеющая пуццолановые свойства. В некоторых странах она относится к летучей золе класса F. При сжигании бурых углей с высоким содержанием оксидов кальция и серы также образуется зола, которой присущи гидравлические характеристики. Благодаря более высокому содержанию оксидов кальция, такая зола является кальциевой,

в некоторых странах называемая летучей золой класса С [83].

Определения типов золы и их свойств представлены в стандартах и соответствующих технических требованиях: в Европейском союзе они представлены в стандарте EN 450-1 [84], в США – ASTM C 618 [85], в Австралии и Новой Зеландии – AZ/NZS 3582 [86], в Японии – JIS 6201 [87], в Индии – IS 3812-1 [88], в Китае – GB/T 1596 [89] и в России – ГОСТ 25818 [79]. Указанные стандарты применяются вместе с другими нормативно-техническими документами в области использования золошлаков и соответствующим природоохранным законодательством.

Практически все стандарты относятся к летучей золе или золе, образованной от сжигания пылеугольного топлива (ЕС, Австралия/Новая Зеландия и Япония), в частности, к летучей золе, образованной от сжигания антрацита, битуминозных, полубитуминозных и бурых углей (США, Индия и Китай) или угольных смесей (Россия). Данные стандарты содержат требования к химическим и физическим свойствам золы.

Лишь европейские стандарты содержат требования к золе, полученной при совместном сжигании некоторых видов топлива в определенных количествах, для обеспечения качества золы в требуемом диапазоне характеристик. Модификация золы относится к тем видам, которые соответствуют требованиям стандарта EN 450-1, за исключением двух показателей – крупности и потерь при прокаливании. Летучая зола может быть модифицирована посредством классификации, отбора, рассевки, сушки, смешивания, размола и извлечения недожога или посредством комбинации этих процессов. Модифицированная зола может состоять из различных видов золы, каждая из которых соответствует основным критериям стандартов. В ЮАР в полной мере применяется европейский стандарт EN, в Израиле он вступил в силу с минимальными изменениями, за исключением требований к золе, образованной от совместного сжигания топлива, и системы контроля качества. Все определения и терминология в нормативных документах относится к золе, уловленной из потока дымовых газов электрофильтрами или другими золоуловителями. Они относятся к кремниевой и/или кальциевой золе

(ЕС, Япония, Индия, Россия) или золе классов F или C в зависимости от угля, сжигаемого на ТЭС США или Китая. Кальциевая зола (зола класса C) характеризуется наличием реактивного оксида кальция в количестве более 10 % в отличие от кремниевой золы (золы класса F). Согласно требованиям австралийского стандарта, общее количество извести в золе лимитируется 10 %, тогда как в стандарте Новой Зеландии этот параметр не может превышать 25 % вне зависимости от того, является зола кальциевой или кремниевой. В американском стандарте ASTM указано, что содержание извести в золе класса C, как правило, выше, чем в золе класса F и составляет до 18 %. В европейском стандарте по использованию летучей золы в цементах EN 197-1 приводится два вида кальциевой золы: зола класса W₁ с содержанием реактивной извести от 10 до 15 % с тестированием золы на реакционную способность, как для кремниевых типа, и зола класса W₂ с содержанием извести более 15 %, рассматриваемая в качестве вяжущего с отдельными требованиями по показателям прочности. Кроме того, существуют нормативные правила, учитывающие повышенное содержание серы. Для достижения прочности бетона содержание извести является очень важным. Сравнительный анализ стандартов разных стран по использованию золы в цементах и бетонах в части области применений и определений летучей золы представлен в таблицах 1.7 – 1.8.

Сравнения требований к физическим и химическим характеристикам летучей золы, определенных различными национальными стандартами, представлены на основе оценки их реакционной способности для кремниевой и кальциевой золы с целью ее использования в бетонах. В стандартах ЕС и Японии рассматривается только кремниевая зола. В европейском стандарте рассматривается зола двух видов в зависимости от крупности. В стандартах Австралии, Китая и РФ приводятся три класса в зависимости от крупности золы. В российском стандарте класс золы в зависимости от ее крупности определяет ее применение при производстве различных бетонных изделий и конструкций.

Кроме требований к крупности золы, большинство стандартов содержат требования к плотности частиц, водопотреблению, способности вступать в реакцию с известью, индексу активности, времени схватывания, увеличению в объеме.

Требования к химическому составу включают содержания основных оксидов металлов ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), а также содержание оксидов серы. Требования по содержанию MgO должны соблюдаться согласно законодательству стран ЕС, Индии и России.

Согласно ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» [79] золу применяют как минеральную добавку или наполнитель при изготовлении тяжелых, легких, ячеистых бетонов, сухих строительных смесей и строительных растворов, а также в составе минеральных вяжущих для приготовления смесей и укрепленных грунтов в дорожном строительстве. При изготовлении тяжелых, легких бетонов и строительных растворов золы следует применять в целях экономии цемента, заполнителей, улучшения технологических свойств бетонной и растворной смесей, а также показателей качества бетонов и растворов.

Таблица 1.7 - Области применений и определения в стандартах по использованию летучей золы в цементах и бетонах

Параметр/ страна	ЕС	США	Австралия/ Новая Зеландия	Япония	Индия	Китай	РФ
	EN 450-1	ASTM C 618	AZ/NZS 3582	JIS 6201	IS 3812-1	GB/T 1596	ГОСТ 25818
Тип топлива	Уголь, совместно сжигаемое с углем топливо	Антрацит, битуминозный, полубитуминозный, бурый угли	Уголь	Уголь	Антрацит, битуминозный, полубитуминозный, бурый угли	Антрацит, битуминозный, полубитуминозный, бурый угли	Уголь или угольные смеси
Определение золы	мелкодисперсный порошок, состоящий, в основном, из сферических стеклообразных частиц, образующийся от сжигания пылевидного угля или совместно сжигаемого с углем топлива, обладающий пуццолановыми свойствами и состоящий, в основном, из SiO_2 и Al_2O_3	зола класса F обычно образуется от сжигания антрацитов и битуминозных углей; зола класса C обычно образуется от сжигания полубитуминозных и бурых углей	твердый материал, уловленный из потока дымовых газов котла, работающего на пылевидном топливе	зола, уловленная из потока дымовых газов пылеугольного котла с помощью золоуловителей	кремниевая зола от сжигания пылевидного топлива с содержанием реактивного СаО менее 10 % для использования; образована от сжигания антрацита или битуминозного угля /Кальциевая зола от сжигания пылевидного топлива с содержанием реактивного СаО не менее 10 % для использования; образована от сжигания бурого или полубитуминозного угля	летучая зола класса F от сжигания антрацита или битуминозного угля; Летучая зола класса C от сжигания лигнита полубитуминозного угля	кремниевая летучая зола от сжигания пылевидного угля с содержанием реактивного СаО менее 10 %. Кальциевая летучая зола с содержанием реактивного СаО более 10 % для использования
Не рассматривается	зола от сжигания бытовых и промышленных отходов не соответствует определению		летучая зола от сжигания в котлах с кипящим слоем			зола от сжигания коммунальных и промышленных отходов; зола от сжигания в котлах с кипящим слоем	

Таблица 1.8 - Сравнение требований стандартов разных стран в части физических и химических характеристик летучей золы для ее использования в цементах и бетонах

Страны	ЕС		США		Индия		Австралия			Китай		РФ		Япония
Классификация согласно стандарту	EN 450-1		ASTM C 618		IS 3812-1		AS 3582.1			GB/T 1597		ГОСТ 25818		JIS 6201
	Кат. N	Кат. S	Класс F	Класс C	кремниевая	кальциевая	Отд.класс (мелкая)	Класс 1 (средняя)	Класс 2 (крупная)	Класс F	Класс C	Кремниевая	Кальциевая	
Потери массы при прокаливании, макс, %	<5; <7; <9 (кат. A;B;C)		6.0 ⁶⁾	6	5.0		3	4	6	≤5; ≤8 ⁸⁾ ; ≤10 (класс I; II; III)		<10;<15 (вид I;II) ⁹⁾	<3;<5 (вид I;II)	5
CaO _{своб} , макс, %	1.5 ¹⁾									≤ 1.0	≤ 4.0		<5 (вид I; II)	
SO ₃ , макс, %	3.0		5.0		3.0		3,0			≤ 3.0 (≤ 3.5 ⁸⁾)		<3;<5 (вид I; II)	<5 (вид I; II)	
Cl, макс, %	0.1				0.05									
CaO, %				(> класс F)			<10							
CaO _{реакц} , макс, %	10				< 10	> 10						< 10	> 10	
SiO ₂ реакц, мин, %	25				20									
SiO ₂ , мин %					35	25								45
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ мин, %	70		70	50	70	50	70			≥ 70	≥ 50	≥ 70		
Na ₂ O _{экв} , макс, %	5				1.5							< 3	< 1,5 (вид I;II)	
MgO, макс, %	4				5							< 5		
Влажность, %			3.0		2.0		0.5			≤ 1.0		≤ 1.0		1
Остаток на сите 45 мкм, макс, %	40 (±10%)	12	34 (±5%)		34		15	25	45	≤12; ≤30; ≤45 (класс I; II; III)				
Удельная поверхность частиц, см ² /г					мин. 3200							>2500/1500 (вид I/II)	>2500/2000 (вид I/II)	мин. 2400
Плотность, кг/м ³	± 200 ²⁾		5% ²⁾							≤ 2.6				
Увеличение в объеме, макс	10 мм ³⁾		0.8% ⁷⁾		0.8%						≤ 5 мм			
Индекс активности через 28 суток, мин, %	75 ⁴⁾		75 ⁴⁾		80					≥ 70				60
Водопотребность, макс, % в сравнении с контрольным образцом	95 ⁵⁾		105		105					≤95; ≤105; ≤115 (класс I; II; III)				

Примечания:

- 1) содержание $\text{CaO}_{\text{своб}}$ может достигать 2,5 % по массе при обеспечении соответствующей прочности;
- 2) максимальное отклонение от заявленного показателя;
- 3) только при содержании $\text{CaO}_{\text{своб}} > 1.5\%$;
- 4) согласно требованиям стандарта EN 196, нет определенного соотношения летучей золы к цементу, водоцементное отношение – 0,5;
- 5) только для золы категории S;
- 6) возможно увеличение показателя потерь при прокаливании до 12% в золе класса F при наличии приемлемых характеристик или результатов лабораторных испытаний;
- 7) согласно требованиям ASTM C-1012, соотношение «летучая зола/цемент» составляет 20/80, равномерная осадка;
- 8) в случае применения летучей золы при производстве цемента;
- 9) вид I - для железобетонных конструкций и изделий из тяжелого или мелкозернистого по ГОСТ 26663 и легкого по ГОСТ 25820 бетонов; вид II - для бетонных конструкций и изделий из тяжелого или мелкозернистого по ГОСТ 26663 и легкого по ГОСТ 25820 бетонов, строительных растворов по ГОСТ 28013; показатели даны для летучей золы от сжиганий каменных углей; в случае сжигания антрацитов потери при прокаливании не должны превышать 20 и 25% для золы видов I и II соответственно.

Согласно ГОСТ 25818–2017 [79], основные золы с содержанием оксида кальция CaO не менее 30% по массе, при изготовлении строительных растворов и бетонов для сборных и монолитных бетонных и железобетонных изделий и конструкций следует применять в качестве компонента цемента или другого вяжущего, таким образом, до 30 % цемента может быть заменено **сухой** высококальциевой золой. Для сравнения: в США и Австралии этот показатель составляет 20 %, в Индии – 35 %. В нашей стране производство цемента в 2022 году составило 60,8 млн тонн, а производство цемента в районах с угольной генерацией составило около 30 млн т. Таким образом, потенциал использования высококальциевой золы составляет около 10 млн т в год с учетом минимального транспортного плеча и снижения транспортных расходов. При использовании золошлаков взамен природных материалов (песка, гравия) себестоимость строительной продукции может снизиться на 10...20 % при близком расположении угольных ТЭС [90]. Кроме того, при замещении золошлаками части цемента существенным экологическим эффектом является снижение выбросов парниковых газов, т.к. при производстве одной тонны цемента выбрасывается около одной тонны CO_2 в случае применения традиционных технологий производства цемента.

1.5 Основные барьеры, препятствующие эффективному использованию золошлаков ТЭС в РФ, и предложения по повышению уровня их применения

Анализируя ситуацию в РФ, а также опыт передовых стран в части использования золошлаков ТЭС, таких как Китай, Индия, страны ЕС, можно сделать вывод о том, что в настоящее время основным препятствием на пути повышения уровня использования золошлаков ТЭС в нашей стране является отсутствие комплексного подхода при решении проблемы обращения с золошлаками ТЭС в части ликвидации накопленного экологического ущерба и снижения негативного воздействия угольных ТЭС на окружающую среду, который бы учитывал следующее:

- рассмотрение проблемы обращения с золошлаками ТЭС на всех этапах жизненного цикла угольной энергетики, включая этап стратегического планирования в электроэнергетике (при разработке Энергетической стратегии, Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики, Схем и программ развития электроэнергетических систем - СиПР);
- при обосновании проектов в рамках программы модернизации и перехода на НДТ учет перспективных планов развития регионов размещения угольных ТЭС и потенциальных потребностей различных предприятий в золошлаках ТЭС;
- необходимость включения в проектную документацию требований использования золошлаков при производстве строительных материалов и изделий, при реализации проектов строительства и рекультивации объектов, заполнения отработанных горных выработок и вертикальной планировке территории;
- при строительстве новых угольных блоков и в проектах реконструкции систем ЗШУ ТЭС внедрение наилучших технических решений с отказом от систем гидрозолошлакоудаления и внедрением безводных технологий эвакуации и транспортирования золошлаков ТЭС;
- освоение технологий комплексной переработки золошлаков ТЭС в промышленном масштабе с запуском демонстрационных проектов в регионах РФ, финансируемых при участии государства;

- организацию строительства технопарков (кластеров) по переработке золошлаков угольных ТЭС с особым налоговым режимом для резидентов;
- создание льготных условий кредитования, субсидирования и налогообложения для участников, реализующих проекты в области обращения с золошлаками ТЭС;
- получение государственных субсидий на перевозку золошлаков железнодорожным транспортом от угольных ТЭС до мест их использования;
- разработку и доработку соответствующих НПА и НТД, обеспечивающих стимулирующие механизмы для повышения уровня использования золошлаков;
- разработку ГОСТ на продукты, полученные путем переработки золошлаков ТЭС (зольные микросферы, угольный концентрат, железный концентрат, алюмосиликаты и др.);
- дополнение ОКПД, ТН ВЭД в части классификации продукции, получаемой из золошлаков;
- разработку НПА и НТД, а также технологий для использования золошлаков 4 класса опасности;
- разработку учебных планов и программ основного и дополнительного профессионального образования студентов и слушателей по обращению с золошлаками ТЭС в энергетических вузах регионов РФ;
- информирование общественности и повышение осведомленности ключевых лиц, принимающих решения по проблеме обращения с золошлаками ТЭС.

В России в подавляющем большинстве случаев на ТЭС применяются неэкономичные и неэкологичные системы гидрозолоудаления, которые существенным образом препятствуют повышению уровня использования золошлаков из-за невозможности их использования для производства строительных материалов [91]. Для сравнения - в странах ЕС, Индии, Китае на ТЭС преимущественно используются сухие системы золошлакоудаления, а сухая зола является максимально востребованным продуктом в строительном секторе стран. Таким образом, при реконструкции систем ЗШУ ТЭС и строительстве новых угольных энергоблоков переход на сухие системы удаления золы и шлака является перспективным и необходимым для

повышения уровня использования побочных продуктов сжигания угля. С целью выбора технологии и схем обращения с золошлаками необходимо проведение научной экспертизы проектов, что позволит внедрить НДТ, повысить экологические и технико-экономические характеристики ТЭС.

Для повышения уровня использования накопленных золошлаков и с целью высвобождения емкостей золошлакоотвалов, близких к проектному заполнению, значительное количество золошлаков в достаточно короткий период может быть использовано в проектах дорожного строительства, для закладки и рекультивации отработанных горных выработок, вертикальной планировке территорий. Высвобожденные объемы на действующих золошлакоотвалах могут быть использованы, как зоны раздельного складирования золы и шлака при внедрении технологий их раздельного транспортирования и складирования.

Важнейшим препятствием на пути использования золошлаков ТЭС является их юридический статус - «отходы». Подобный статус не стимулирует производителей использовать золошлаки, т.к. они не являются продукцией в отличие от тепловой и электрической энергии, а отход необходимо складировать.

Несмотря на то, что в настоящее время ведется масштабная работа по совершенствованию природоохранного законодательства в РФ, тем не менее, отсутствует целостный комплекс правовых и технических документов по обращению с золошлаками, соответствующий современным требованиям, в частности, касающийся разработки нормативных документов федерального уровня по обращению с продуктами, полученными из золошлаков ТЭС.

При сжигании на ТЭС России непроектных углей, углей ухудшенного качества или смесей углей образуются золошлаки неудовлетворительного качества с нестабильными свойствами, которые не отвечают требованиям потребителей.

Еще одной большой проблемой является отсутствие сформированного рынка сбыта золошлаков энергетики в связи с неготовностью угольных ТЭС к отгрузке продукции гарантированного качества с одной стороны, и неготовностью потенциальных покупателей рисковать качеством своей продукции с другой.

Недостаточный уровень просвещения и профессиональных компетенций в области обращения с золошлаками ТЭС является дополнительным тормозом, препятствующим внедрению НДТ в системы обращения с золошлаками ТЭС и переходу на сухие системы ЗШУ.

С 1996 г. сотрудниками НИУ «МЭИ» совместно с ведущими специалистами организаций электроэнергетики были разработаны и откорректированы руководящие и технические документы [92 - 96], в которых рассмотрены вопросы надежности, экономичности и экологичности систем пневмозолоудаления ТЭС.

Характерной особенностью этих документов является то, что в практической деятельности сотрудников ТЭС и энергокомпаний их можно применять, не прибегая к другим источникам информации, кроме нормативов оплаты за использование природных ресурсов. Тем не менее приходится констатировать то, что в настоящее время:

1. Нет целостного комплекса нормативно-технической документации по созданию и эксплуатации систем ЗШУ, отвечающего современным требованиям по надежности, экономичности и экологичности, предъявляемым к энергетическому оборудованию.
2. В разработанных нормативно-технических документах разного уровня присутствуют различные определения золошлаков, противоречащие друг другу.

С целью существенного повышения уровня использования золошлаков с 10...12 % от общего объема их образования важно проводить работу в двух направлениях параллельно:

1. Ликвидация накопленного экологического ущерба.
2. Снижение или предотвращение негативного воздействия угольных ТЭС на окружающую среду.

Первое направление представляет собой комплексную переработку накопленных золошлаков, размещенных на золошлакоотвалах ТЭС, и обладающих огромным потенциалом как источники минеральных ресурсов из-за уникальности своего состава. Многочисленные исследования свойств и характеристик золошла-

ков показывают, что в их составе содержится большое количество ценных компонентов – черные, цветные, редкие и драгметаллы. Таким образом, золошлакоотвалы угольных ТЭС можно считать техногенными месторождениями твердых полезных ископаемых, и подходить к ним нужно, как к перспективным объектам для последующей переработки. В связи с этим, необходимо внедрять технологии, которые позволят при переработке золошлаков получать конкурентоспособную и ликвидную продукцию. Технологии должны быть экологически чистыми, т.к. золошлакоотвалы расположены вблизи населенных пунктов, что ужесточает требования к экологической безопасности. Ниже приведены основные продукты и компоненты, которые можно получить путем переработки золошлаков ТЭС.

Недожог. Одним из ценных продуктов, получаемым из золошлаков, является недожог, который можно сжигать повторно на ТЭС или использовать для производства угольных брикетов. Для выделения недожога из золошлаков применяются как безводные методы (грохочение, электростатическая сепарация), так и флотация.

Магнитный концентрат является еще один ценным продуктом, который можно получить из золошлаков. В качестве оборудования для извлечения оксидов железа применяются магнитные сепараторы. Также известны исследования по извлечению оксидов железа из золошлаков и минеральных структур с применением электромагнитного микроволнового излучения.

Редкие и редкоземельные металлы. Практически всех золошлаки содержат редкоземельные металлы (РЗМ), в том числе РЗМ тяжелой группы [60]. Извлечение РЗМ из золошлаков осуществляют двумя стадиями: на первой стадии происходит вскрытие золошлаков кислотными или щелочными реагентами в коллективный продукт, на второй стадии - жидкостной экстракцией металлов из полученного продукта [61 - 63].

Алюмосиликатные полые микросферы. Еще один продуктом из золы ТЭС являются алюмосиликатные полые микросферы, называемые за рубежом ценосферами. Зольные микросферы представляют собой пустотелые стеклянные шарики,

которые эффективно применяются в качестве наполнителей композиционных материалов, используются в строительной, химической, нефтегазовой промышленности, при производстве пластмасс, в машиностроении, производстве огнеупоров и др.

Алюмосиликаты, оставшиеся после извлечения из золошлаков ценных компонентов, возможно использовать в качестве техногенного наполнителя в различных применениях.

Существуют и другие технологии глубокой переработки золошлаков. Однако, целесообразность их внедрения должна подтверждаться технико-экономической оценкой, а также оценкой экологических показателей.

Выводы по главе 1 и постановка цели исследования

Анализ состояния проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России и за рубежом показывает, что до 2050 г. уголь останется одним из основных источников энергии как в России, так и за рубежом, несмотря на повышение доли ВИЭ в мировом топливном балансе.

В настоящее время объем образования золошлаков ТЭС в России составляет 20...25 млн т в год, в то время, как объем их использования - не более 20%, что существенно уступает показателям в США, странах ЕС, Индии, Китае и др.

На золошлакоотвалах ТЭС России размещено около 1,7 млрд т золошлаков, и эта цифра продолжает непрерывно расти, все более усиливая негативное воздействие на окружающую среду, что проявляется в ухудшении качества воздуха, загрязнении водоносного горизонта и деградации почвы вблизи ТЭС.

При сжигании большого количества различных марок углей на ТЭС России характеристики и свойства золошлаков значительно отличаются друг от друга, что является существенным ограничением их использования.

В мире накоплен обширный опыт в области использования побочных продуктов сжигания угля, который может быть успешно применен в экономике нашей

страны. В России ведется масштабная работа по совершенствованию законодательства по обращению с отходами энергетики, однако, полноценной законодательной базы, стимулирующей использование золошлаков ТЭС, на сегодня нет. В подавляющем большинстве случаев на ТЭС России применяются системы гидрозолошлакоудаления, которые обладают целым рядом недостатков и «тормозят» применение золошлаков в различных направлениях.

Отсутствуют актуализированные методические рекомендации по созданию новых надежных, экономичных и экологических систем обращения с золошлаками ТЭС, а также методические рекомендации по повышению показателей надежности, а также эколого-экономических характеристик при эксплуатации существующих систем золошлакоудаления на ТЭС.

Отсюда логически вытекает цель всей работы, которая сводится к необходимости разработки комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России, для чего необходимо выполнить следующие задачи:

- выявить основные барьеры, препятствующие эффективному использованию золошлаков ТЭС в РФ;
- определить оптимальные параметры пневмотранспорта золошлаков в системах ЗШУ ТЭС;
- создать математический аппарат для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС;
- разработать формы криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС с целью минимизации абразивного износа и продления срока службы трубопроводов при пневмо- и гидротранспорте золошлаков.
- разработать стимулирующий механизм для повышения заинтересованности угольных ТЭС в увеличении уровня использования золошлаков;
- разработать предложения по комплексному подходу при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России.

Глава 2 Разработка рекомендаций по созданию надежных, экономичных и экологических систем ЗШУ ТЭС

Во второй главе рассмотрены результаты разработки рекомендаций по созданию надежных, экономичных и экологических систем золошлакоудаления ТЭС на основе анализа существующих и перспективных систем обращения с золошлаками, используемых на твердотопливных ТЭС, а также результаты разработки рекомендаций по реконструкции систем гидрозолошлакоудаления с переходом на «сухие» системы ЗШУ ТЭС.

2.1 Анализ эксплуатации существующих схем ЗШУ на ТЭС России

Массовый выброс летучей золы, т/ч, поступающей в атмосферу с дымовыми газами котлов, определяется по выражению (2.1) [97, 98]:

$$G = 0,01B \left(A^P + q_4 \frac{Q_n^P}{32,7} \right) \left[1 - a_{ун} \left(1 - \frac{\eta_{зy}}{100} \right) \right], \quad (2.1)$$

где: B – расход сжигаемого топлива, кг/ч;
 A^P – зольность топлива в расчете на рабочую массу, %;
 q_4 – потери теплоты топлива с механическим недожогом;
 Q_n^P – теплота сгорания топлива, МДж/кг;
 $32,7$ – теплота сгорания недожога, МДж/кг;
 $a_{ун}$ – доля золы в уносе;
 $\eta_{зy}$ – степень улавливания золы в золоуловителе, %.

Согласно [11] в зависимости от вида топлива и технологий сжигания углей доля золы и шлака ($a_{шл}$ и $a_{ун}$) различна (таблица 2.1), что подтверждается данными, представленными энергокомпаниями.

Таблица 2.1 - Доли золы и шлака при сжигании каменных и бурых углей

Технология сжигания топлива	Доли золы и шлака от общей зольности	
	$a_{шл}$	$a_{ун}$
Факельное сжигание каменных углей с жидким шлакоудалением	0,15÷0,20	0,80÷0,85
Факельное сжигание бурых углей с жидким шлакоудалением	0,20÷0,030	0,70÷0,80
Факельное сжигание углей с твердым шлакоудалением	0,05÷0,15	0,85÷0,95
Сжигание углей в котлах с кипящим и циркулирующим кипящим слоем	0,70÷0,90	0,10÷0,30

В подавляющем большинстве случаев на ТЭС России применяются гидравлические системы ЗШУ (ГЗУ) с оборотной схемой водоснабжения. В таких системах зола и шлак совместно транспортируется в виде золошлаковой пульпы с помощью багерных насосов и размещается на гидрозолошлакоотвалах. Раздельная транспортировка применяется при наличии соответствующих требований к использованию шлака и золы, не допускающих их смешения. Система с багерными насосами применяется, преимущественно, для совместного удаления золы и шлака на большие расстояния (до 10 км) от котлов любой мощности.

Классификация систем ЗШУ ТЭС представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Типы и виды систем ЗШУ ТЭС

Параметр	Вид и тип систем ЗШУ
По виду рабочей среды, перемещающей золу и шлак	- пневматические - гидравлические - механические - комбинированные
По способу удаления золы и шлака	- совместное - раздельное
По схеме водоснабжения	- прямоточные - оборотные
По компоновке и дальности транспортирования	- вакуумные - напорные - комбинированные - с аэрожелобами
Установки внутреннего транспорта	- самотечные установки - аэрожелоба - вакуумные установки - низконапорные установки - высоконапорные установки - двухступенчатые пневмотранспортные установки - установки гидротранспорта
Установки внешнего транспорта	- пневмотранспортные установки (вакуумные, низко- и высоконапорные установки со струйными насосами; высоконапорные установки с пневмовинтовыми и пневмокамерными насосами) - установки гидротранспорта - автотранспорт - конвейерный транспорт

Классификация различных способов совместного удаления золы и шлака ТЭС и котельных представлена на рисунке 2.1.

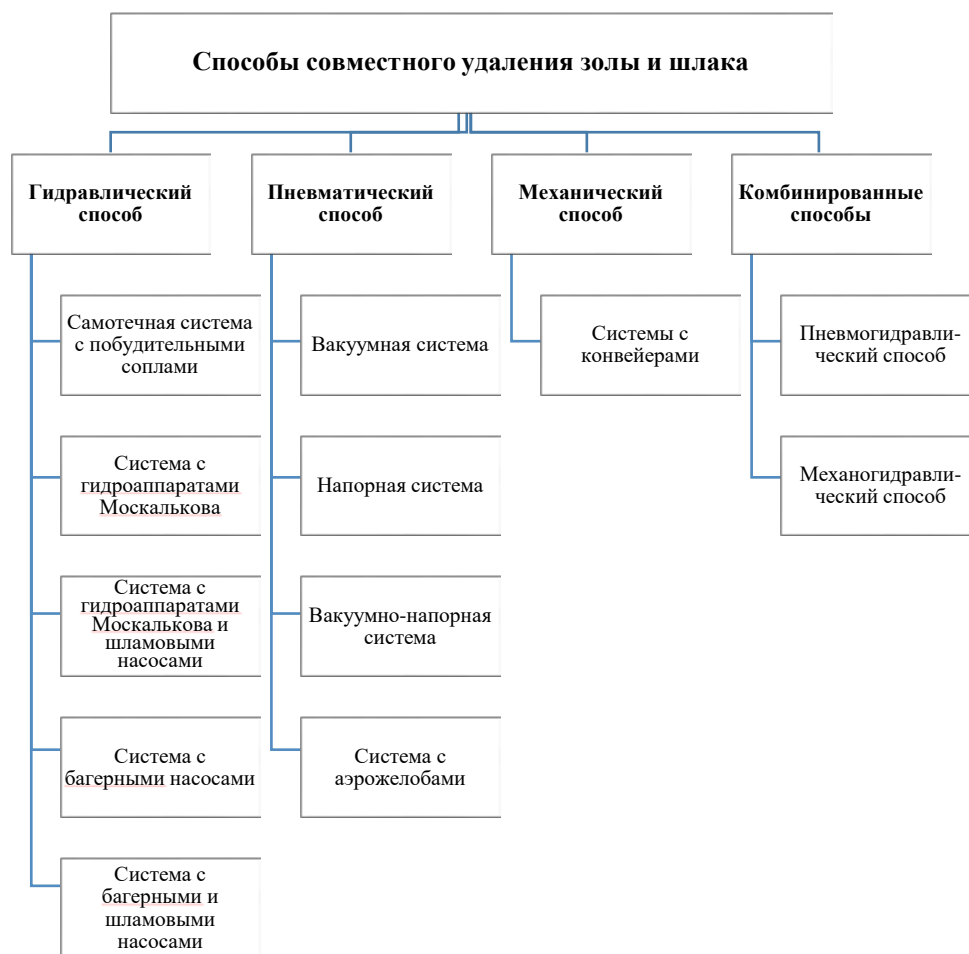


Рисунок 2.1 — Классификация способов совместного удаления золы и шлака

Согласно [99] выбор типа системы ЗШУ определяется исходя из:

- технологических особенностей энергетического производства (вид выводимого шлака из топки котла, способ очистки дымовых газов, расход и свойства золы и шлака, необходимость использования и наличие достаточного количества воды);
- удаленности ТЭС от существующих и потенциальных рынков сбыта золошлаков;
- годовых объемов и помесячного графика поставки потребителям золошлаков с требуемыми свойствами, требований существующих и потенциальных потребителей к свойствам золошлаков;

- наличия доступной транспортной инфраструктуры для доставки золошлаков потребителям на экономически целесообразные расстояния;
- климатических условий, мест для размещения золошлакоотвалов, их удаленности от промплощадки ТЭС и рельефа местности для транспорта неостребованной части золошлаков на отвалах;
- требований по надежности и технико-экономическим показателям работы системы ЗШУ;
- требований природоохранного законодательства при обращении с золошлаками энергетического производства.

При мокром золоудалении в пульпе систем ГЗУ присутствуют оксиды серы, азота, углекислый газ. Возможно растворение и токсичных веществ: ванадий, мышьяк, фтор, ртуть и др. Значение pH воды в оборотных системах гидрозолоудаления может быть от сильнокислотного до сильнощелочного. Возможно образование кальциевых отложений. Для поддержания солевого баланса и предотвращения интенсивного образования отложений часть оборотной воды сбрасывают в водоемы и заменяют ее свежей.

Качество воды в системе ГЗУ зависит от вида сжигаемого топлива и типа установленного оборудования. Состав и степень загрязненности этих вод определяются на основе фактических данных химического контроля. По современной классификации продувочные воды ГЗУ относятся к токсичным стокам, в связи с чем оборотные системы должны быть бессточными. Допускается и рекомендуется максимально возможное использование воды из оборотных систем ГЗУ для производственных нужд при условии, что образующиеся при этом стоки возвращаются в систему ГЗУ или полностью используются с соблюдением экологических требований.

Все системы ГЗУ на существующих угольных ТЭС имеют продувку. Экологически и экономически приемлемых способов очистки данного вида сточных вод в настоящее время не разработано. В ГЗУ часто сбрасывают другие сточные воды ТЭС. Обычно продувка составляет 1...3% от расхода циркулирующей воды, что составляет большие объемы. При этом концентрация вредных веществ

в ней велика, и их выделение требует значительных капиталовложений. Поэтому в настоящее время ограничиваются лишь обезвреживанием содержащихся в продувочной воде ГЗУ токсичных примесей.

Более эффективным является создание оборотных систем гидрозолоудаления без продувок. Для этого необходимо исключить сброс в систему ГЗУ сточных вод других водопотребителей.

Таким образом, необходимо создать оборотные системы ГЗУ с дефицитным водным балансом, а также внедрить установки сгущения пульпы.

Наиболее экологичным решением является отказ от систем гидрозолоудаления на ТЭС и переход на «сухие» системы.

Блок-схема системы ЗШУ совместного внешнего удаления золы и шлака с оборотным водоснабжением представлена на рисунке 2.2 [99].

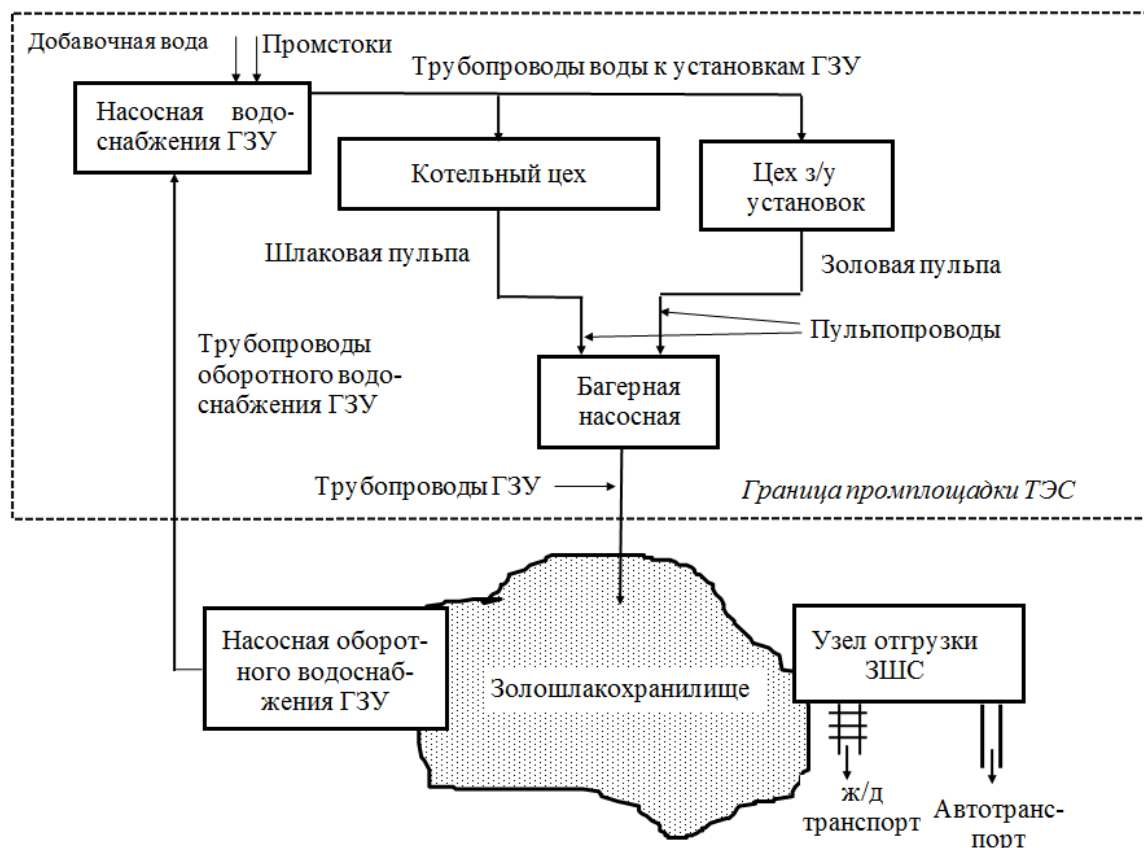


Рисунок 2.2 - Блок-схема традиционной системы ГЗУ ТЭС при совместном транспортировании золы и шлака на золошлакохранилище

Системы ГЗУ на ТЭС России выполняются преимущественно по схеме совместного внешнего удаления золы и шлака. Однако, на некоторых ТЭС созданы системы ГЗУ с отдельным удалением, складированием и отгрузкой золы и шлака для удовлетворения требований к потребительским свойствам отгружаемых шлака и золы [99]. В таком случае на оперативном шлакохранилище создаются узлы отгрузки шлака, а также, в случае необходимости, могут размещаться установки по обезвоживанию шлака и насосная станция возврата осветленной воды. Оперативные шлакохранилища могут располагаться как на промплощадке ТЭС, так и за ее пределами.

Пневматические системы на ТЭС применяются, если невозможно применение других способов ЗШУ, а также в тех случаях, когда золошлаки не складировались, а используются в промышленности. Классификация пневмотранспортных систем ЗШУ ТЭС представлена на рисунке 2.3.

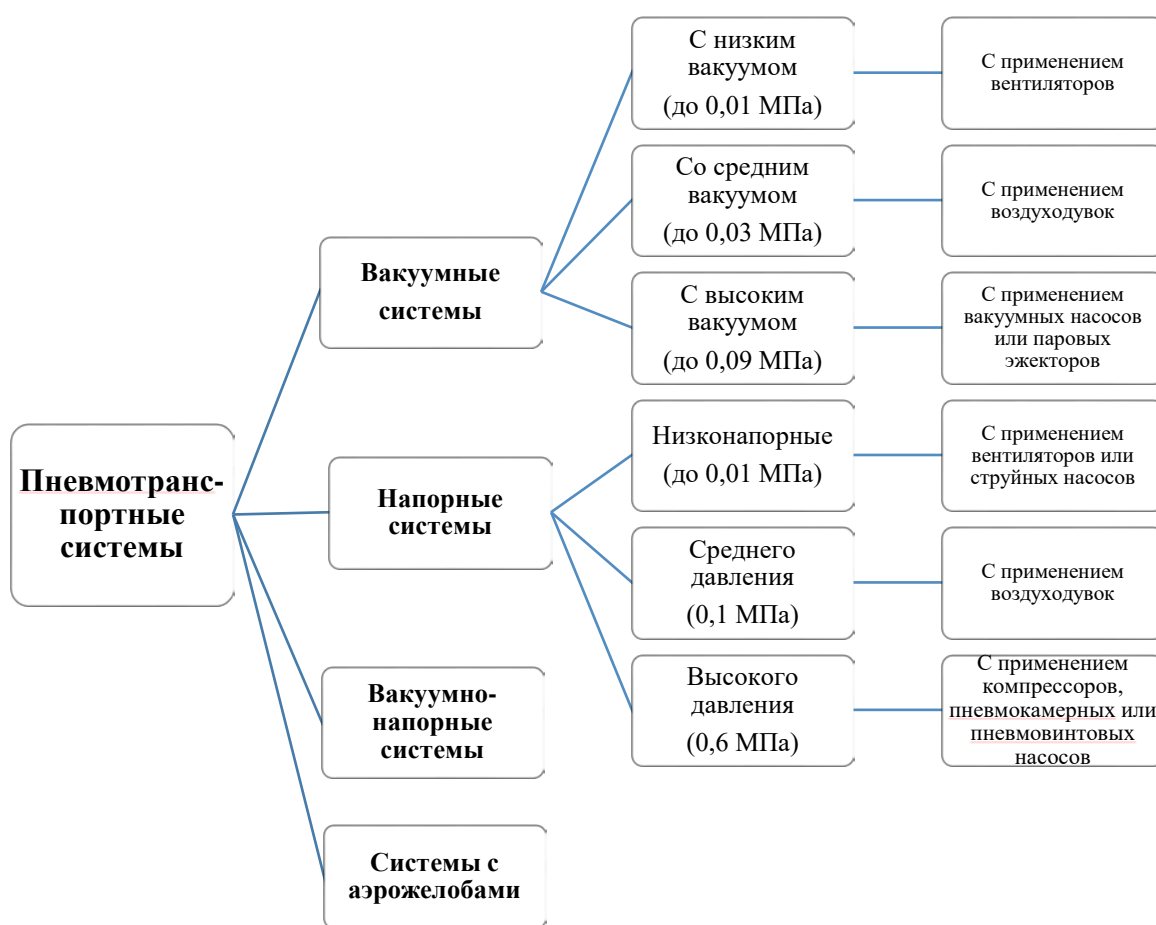


Рисунок 2.3 - Классификация пневмотранспортных систем ЗШУ

Пневмогидравлические (комбинированные) системы ЗШУ чаще всего применяются на ТЭС, оснащенных сухими золоуловителями. В 70-х годах XX века преимущественно на блочных ТЭС России было начато сооружение установок по отгрузке сухой золы (УОСЗ) потребителям. Нормами технологического проектирования ВНТП-81 на ТЭС с сухими золоуловителями предусматривается внутристанционное пневмогидравлическое золоудаление: зола из-под золоуловителей собирается пневмосистемами в промежуточный бункер, а из него транспортируется в установку отгрузки сухой золы по пневмозолопроводам (ПЗП) или при отсутствии потребителей сухой золы подается по каналам ГЗУ в насосную станцию, откуда совместно со шлаком в виде пульпы транспортируется на ЗШХ. Потребителям сухая зола может отгружаться непосредственно из промежуточных бункеров и/или со склада сухой золы. При этом на золошлакоотвалах также могут сооружаться узлы отгрузки гидратированных золошлаковых смесей (ЗШС) потребителям. Пример реализации комбинированной схемы ЗШУ приведен на рисунке 2.4.

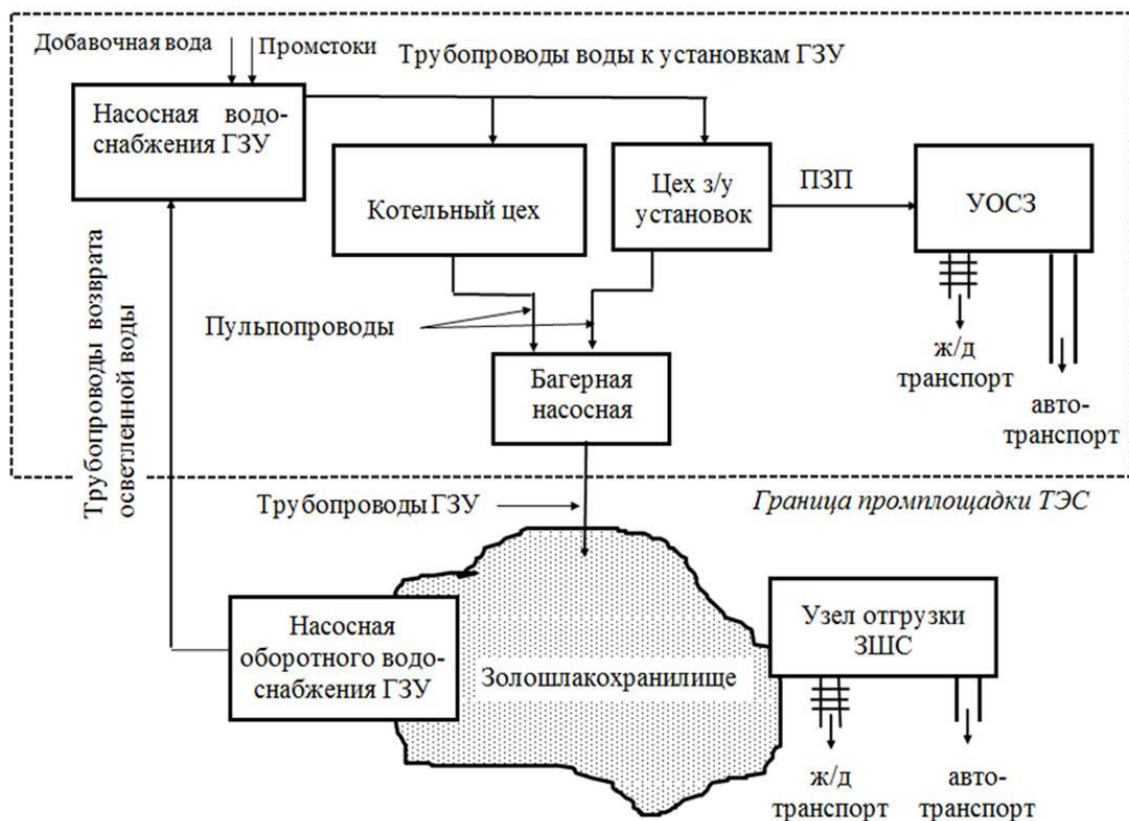


Рисунок 2.4 - Блок-схема комбинированной системы ЗШУ с отгрузкой потребителям сухой золы

2.2 Сравнение систем ЗШУ ТЭС

Характерной чертой любых систем ГЗУ является использование воды для внешнего транспорта золошлаков на золошлакоотвал. Использование воды в системах ГЗУ определяет, как их достоинства, так и недостатки согласно [100, 101] (таблица 2.3).

Безводные технологии золоудаления являются перспективными с точки зрения минимизации ущерба окружающей среде в районе расположения угольных ТЭС, снижения затрат на транспорт золы в системе ЗШУ, расширения спектра технологий использования золы в различных отраслях экономики и др. К сожалению, в России крайне редко применяются «сухие» технологии золоудаления, что существенным образом сказывается на спросе такой золы и, соответственно, на уровне ее утилизации. Подобная система применена на Черепетской ГРЭС, Сахалинской ГРЭС-2, Рефтинской ГРЭС [102]. «Сухой» вариант золошлакоудаления — естественный выбор для электростанций, где текущие золошлакоотвалы близки к исчерпанию. Кроме того, что использование технологии сухого золошлакоотвала на порядок более экологичное и экономически выгодное решение, чем повсеместно действующее «мокрое» золоудаление, отпадает необходимость в строительстве ограждающих дамб для гидрозолошлакоотвалов, сведен к нулю расход воды, а объемы образовавшихся золошлаков можно использовать для производства строительных материалов.

Существуют несколько ведущих мировых производителей технологических циклов сухого ЗШУ: Magaldi Group (Италия), Clyde Bergemann Power Group (Германия), Claudius Peters (Франция), Lodige (Германия), Tenova Takraf (Германия), Tedo (Чехия), Alstom (Швейцария).

Разработка технического решения по реализации сухого золоудаления должна рассматриваться в комплексе с вопросом строительства завода-спутника по производству силикатного кирпича и других строительных материалов, за счет привлечения бизнес-компаний, которые и будут являться собственниками таких перерабатывающих предприятий.

Таблица 2.3 – Сравнение достоинств и недостатков систем ГЗУ и ПЗУ.

Достоинства систем ЗШУ	
ГЗУ	ПЗУ
- возможность непрерывного удаления большого количества золошлаков на расстоянии до нескольких десятков км; - совмещение процессов охлаждения, грануляции и транспорта шлака; - возможность механизации процесса перемещения и укладки золошлаков в отвал; - использование в работе сравнительно простого и надежного оборудования.	- достигнутый уровень надежности современных систем ПЗУ не ниже, а в случае транспортирования высококальцевой золы выше надежности систем ГЗУ; - широкий диапазон регулирования производительности установок пневмотранспорта золы; - технологическая гибкость и адаптируемость к изменяющимся техническим условиям на поставку золы потребителям без значительных инвестиций; - стабильность потребительских свойств золы при ее сборе, транспортировании, временном хранении и отгрузке; - возможность отгрузки сухой золы по группам фракций в зависимости от потребительского спроса.
Недостатки систем ЗШУ	
ГЗУ	ПЗУ
- образование твердых отложений в трубопроводах системы ГЗУ, необходимость очистки оборотной воды от растворенных соединений; - необходимость частой замены напорных золошлакопроводов вследствие их абразивного и коррозионного износа; - необходимость значительных инвестиций и достаточно продолжительного периода для модернизации технологической схемы системы ГЗУ при изменении марок сжигаемых углей и/или технических требований к потребительским свойствам отгружаемых потребителям золошлаков; - высокие энергозатраты и большой удельный расход воды на гидротранспорт золошлаков; - загрязнение атмосферного воздуха за счет пыления золоотвала; - загрязнение подземных вод растворами соединений тяжелых металлов; - деградация почв в зоне влияния гидрозолоотвала - необходимость дополнительных затрат на кондиционирование золошлаков при их отгрузке потребителям; - ухудшение потребительских свойств золы при взаимодействии с водной средой; - изъятие из рационального землепользования значительных площадей для размещения золошлакоотвалов и трубопроводов внешнего ЗШУ	- загрязнение атмосферного воздуха за счет пыления золоотвала; - невозможность транспортирования золы на расстояние более 3 км без промежуточных станций перекачки; - повышенный абразивный износ криволинейных и прямолинейных участков трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС.

Влияние гидрозолошлакоотвалов ТЭС на окружающую среду [103] приведено на рисунке 2.5.

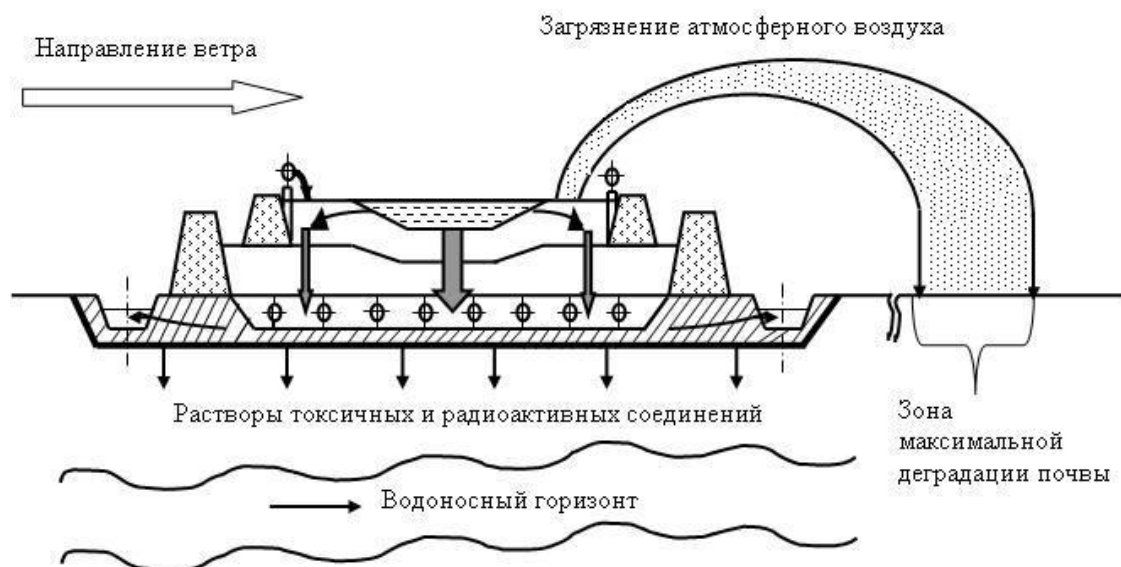


Рисунок 2.5 — Загрязнение окружающей среды гидрозолошлакоотвалами ТЭС

Во многих развитых странах золошлаки, именуемые побочным продуктом ТЭС, проходят предпродажную подготовку продукта, доводя его характеристики до требований строительных нормативных документов.

Одной из наиболее перспективных технологий удаления шлака от котлов энергоблоков мощностью до 800 МВт является пневмомеханическое шлакоудаление. Технологии сухого шлакоудаления подробно представлена в работах [104 - 110]. Данная технология позволяет отгружать шлак в сухом виде в соответствии с техническими условиями потребителей в виде крупнодробленого или мелкодробленого шлака, а также в виде шлаковой пыли требуемого фракционного состава. Производительность эксплуатируемых установок шлакоудаления является регулируемой и составляет от 0,5 до 50 т шлака в час. Единственным ограничением для применения пневмомеханического шлакоудаления является требование к виду шлака — **шлак должен быть только в твердом виде**. Для котлов с жидким удалением шлака эта технология неприменима.

Такая технология обеспечивает надежное удаление падающих из холодной

воронки котла частиц и агломератов шлака любых размеров от котлов, сжигающих уголь и другое органическое твердое топливо, существенным образом не только повышая надежность и экономичность системы шлакоудаления, но и уменьшая воздействие ТЭС на окружающую среду. Вода в системе шлакоудаления не используется, а, следовательно, сточные воды не образуются.

Достоинства сухих технологий шлакоудаления на ТЭС и полученные результаты их использования достаточно подробно представлены в [110 - 112]. Самым главным достоинством применения пневмомеханической технологии шлакоудаления является возможность приступить к созданию экологически приемлемых систем золошлакоудаления ТЭС с возможностью отгрузки золы и шлака в сухом виде в соответствии техническими требованиями потребителей в объеме до 100 % их образования, следствием чего происходит:

- снижение издержек производства энергии за счет минимизации затрат на удаление золошлаков;
- улучшение экологических показателей электростанций в связи с отсутствием системы гидрозолошлакоудаления;
- рост объемов продаж золы и шлака за счет обеспечения их лучших потребительских свойств.

Основные эколого-экономические и технологические преимущества использования пневмомеханической технологии шлакоудаления по сравнению с традиционными системами гидрозлакоудаления на ТЭС состоят в том, что происходит:

- снижение себестоимости удаления шлака в 1,5...2 раза;
- повышение КПД котла не меньше, чем на 0,35...0,40 % за счет использования теплоты шлака, которая не теряется в окружающую среду, а возвращается в топку котла;
- значительное снижение потребления энергии на собственные нужды за счет резкого уменьшения энергозатрат на удаление шлака в связи с отсутствием багерных насосных и системы обратного водоснабжения системы шлакоудаления;

- отсутствие вынужденных остановов котлов из-за неисправностей системы шлакоудаления вследствие отложений в пульпопроводах и трубопроводах обратного водоснабжения, а также абразивного и коррозионного износов оборудования системы шлакоудаления;
- улучшение экологических показателей электростанции в связи с отсутствием системы гидрошлакоудаления;
- нулевой сброс загрязненной воды из системы золошлакоудаления в окружающую среду в связи с неиспользованием воды для транспортирования шлака;
- снижение недожога в шлаке не менее чем в 4 раза, что позволяет гарантированно обеспечивать требуемое качество шлака по потерям при прокаливании по зарубежным и российским нормативам;
- продажа шлака с заданными потребительскими свойствами;
- снижение выбросов парниковых газов за счет использования золы в качестве сырья для производства цемента;
- отсутствие самотечных каналов и трубопроводов гидрошлакоудаления в котельном цехе, а также багерных насосных в главном корпусе и на промплощадке ТЭС;
- отсутствие тепловых взрывов шлаковых образований в приемном бункере шлака на выходе из холодной воронки котла.

Перспективной системой удаления золы от электрофильтров котлов энергоблоков является технология пневмозолоудаления с пневмокамерными насосами, которая подразумевает использование безводных технологий.

Таким образом, для существенного повышения уровня полезного использования золошлаков, а также снижения или предотвращения негативного воздействия объектов угольной энергетики на окружающую среду в проектах строительства новых или реконструкции существующих систем золошлакоудаления ТЭС, необходимо предусмотреть внедрение «сухих» (безводных) систем удаления золы и шлака, которые должны отвечать современным требованиям по надежности, экономичности и экологичности, описанным ниже.

2.3 Результаты технико-экономического обоснования перехода на сухие системы обращения с золошлаками ТЭС

Реконструкция системы ЗШУ на примере ТЭЦ-22. Рассмотрены результаты расчета технико-экономических показателей существующей и перспективной систем ЗШУ ТЭЦ-22. Основное топливо ТЭЦ-22 -Кузнецкий тощий уголь со средней зольностью около 20%. Доля угля в топливном балансе ТЭЦ-22 с 2014 по 2020 гг. представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Доля угля на ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» и выход золошлаков

Год	Доля угля в топливном балансе станции, %	Зольность угля, %	Выход золошлаков, тыс. т
2014	14,47	18,93	121,9
2015	23,72	18,26	159,8
2016	20,77	15,63	126,5
2017	14,50	17,21	87,5
2018	7,80	18,30	50,0
2019	0,02	19,37	0,14
2020	0,34	16,67	17,2

В периоды сжигания угля эксплуатировались котлы с жидким шлакоудалением (ЖШУ). Дымовые газы очищались от золы с помощью современных электрофильтров со степенью улавливания золы около 99%. Зола и шлак удалялись со станции с помощью оборотной системы ГЗУ: внутренних и внешних каналов ГЗУ (самотечных), распределительных пульпопроводов; ЗШХ; насосной станции осветленной воды (НОВ) с водоводом возврата воды на ТЭЦ. От котло-турбинного цеха (внутростанционная подсистема ГЗУ) зола и шлак по отдельным лоткам, расположенных в самотечных каналах, поступала на ЗШХ. Движение по лоткам осуществлялось с помощью воды, подаваемой из побудительных сопел. Подача золошлаковой пульпы от ТЭЦ до ЗШХ осуществлялась по бетонным каналам, проложенным в земле, переменного сечения. На ТЭЦ-22 функционировала система ГЗУ с золоотстойником. Осветленная вода из последнего отсека золоотстойника насосами перекачивалась для повторного использования.

Расход пульпы, поступающей на ЗШХ, составлял в зимнее время около 2000 м³/час, концентрация пульпы - 1:25...1:50. Такие показатели концентрации пульпы подтверждают неэкономичность систем ГЗУ, что приводит к повышению эксплуатационных расходов в системе. Ситуационный план внешнего гидрозолошлакоудаления ТЭЦ-22 приведен на рисунке 2.6.

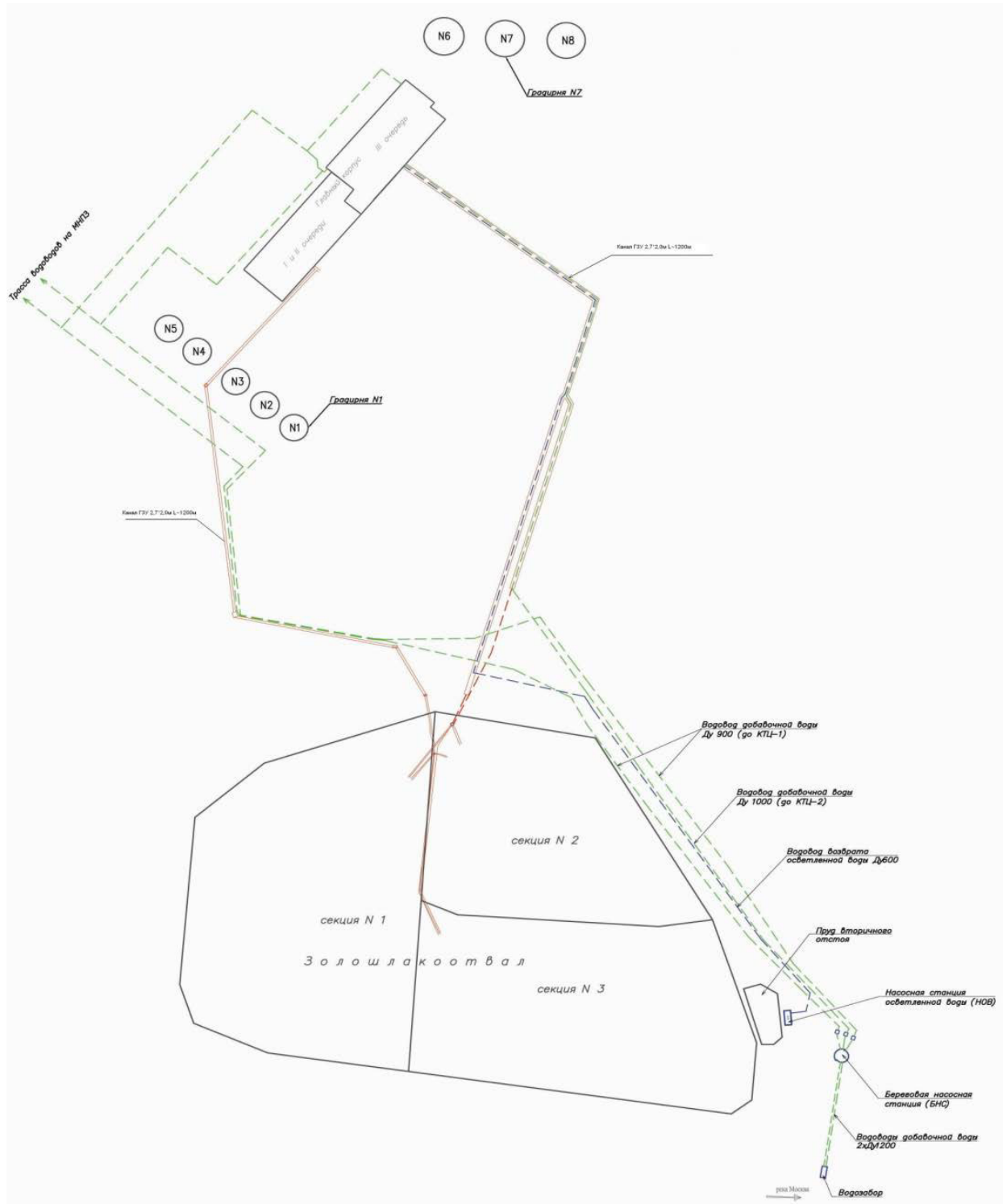


Рисунок 2.6 - Ситуационный план внешнего гидрозолошлакоудаления ТЭЦ-22

Были произведены расчеты удельных эксплуатационных издержек на обращение с золошлаками ТЭЦ-22 при существующей системе ГЗУ в разные годы, которые учитывали:

- издержки на оплату труда с учетом ЕСН;
- затраты на содержание ГЗУ;
- плату за использование природных ресурсов;
- издержки на электроэнергию;
- доход от продажи золошлаков.

Так, за период с 2014 по 2017 гг. эксплуатационные издержки на обращение с золошлаками при существующей системе ГЗУ составили от 579 до 894 руб/т в год с учетом дохода от продажи золошлаков. С учетом транспорта общего количества золошлаков на золошлакоотвал суммарные эксплуатационные издержки в системе ГЗУ составили от 70,5 до 80,5 млн руб/год. Структура расходов, на основании которых определены эксплуатационные издержки на обращение с золошлаками в 2017 г., приведена на рисунке 2.7.

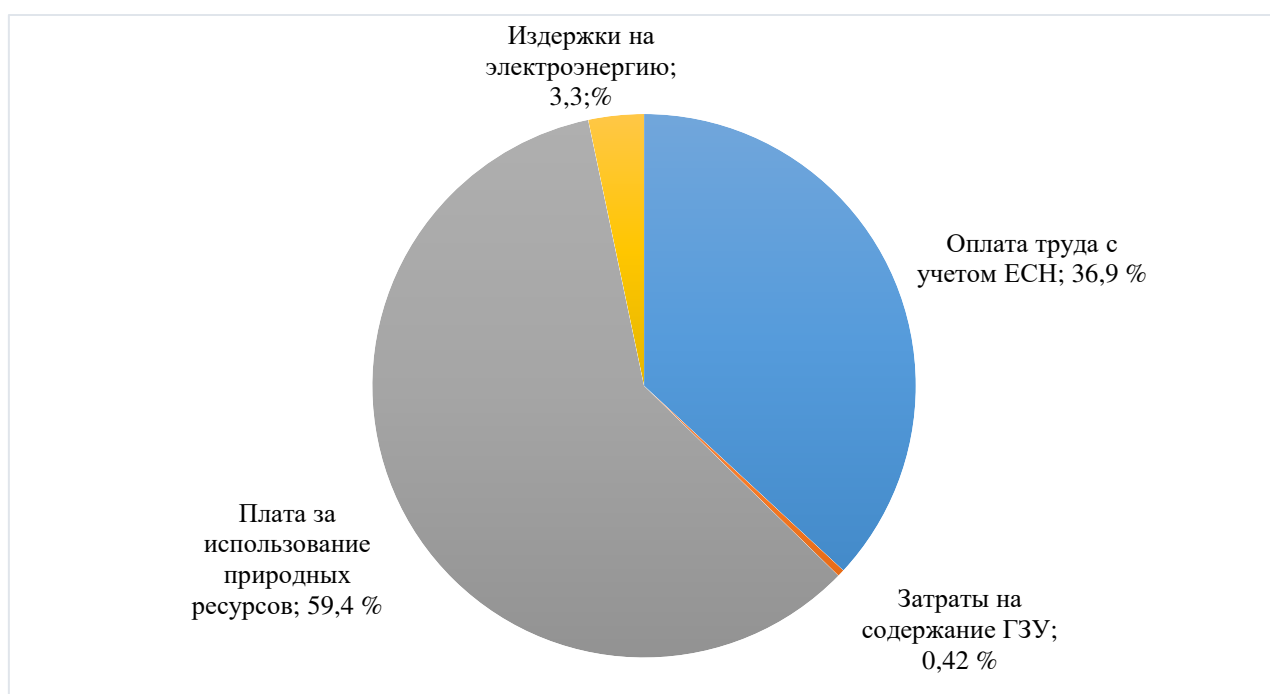


Рисунок 2.7 - Структура эксплуатационных издержек на обращение с золошлаками ТЭЦ-22 в 2017 г.

Из рисунка 2.7 следует, что основной статьей затрат была плата за использование природных ресурсов, которая, прежде всего, состояла из платы за землю, а также из экологических платежей (платы за размещение золошлаков на золошлакоотвале и платы за загрязнение водного бассейна).

В связи с малой остаточной ёмкостью золошлакоотвала, высокой стоимостью обращения с золошлаками, несоответствием эксплуатируемой системы ЗШУ требованиям, предъявляемым к современным системам обращения с золошлаками ТЭС с применением НДТ, превышением удельных выбросов оксидов азота котлов с ЖШУ по сравнению с нормативными был проработан вариант реконструкции системы ЗШУ ТЭЦ-22 с применением НДТ. Блок-схема системы обращения с золошлаками после ее реконструкции приведена на рисунке 2.8.

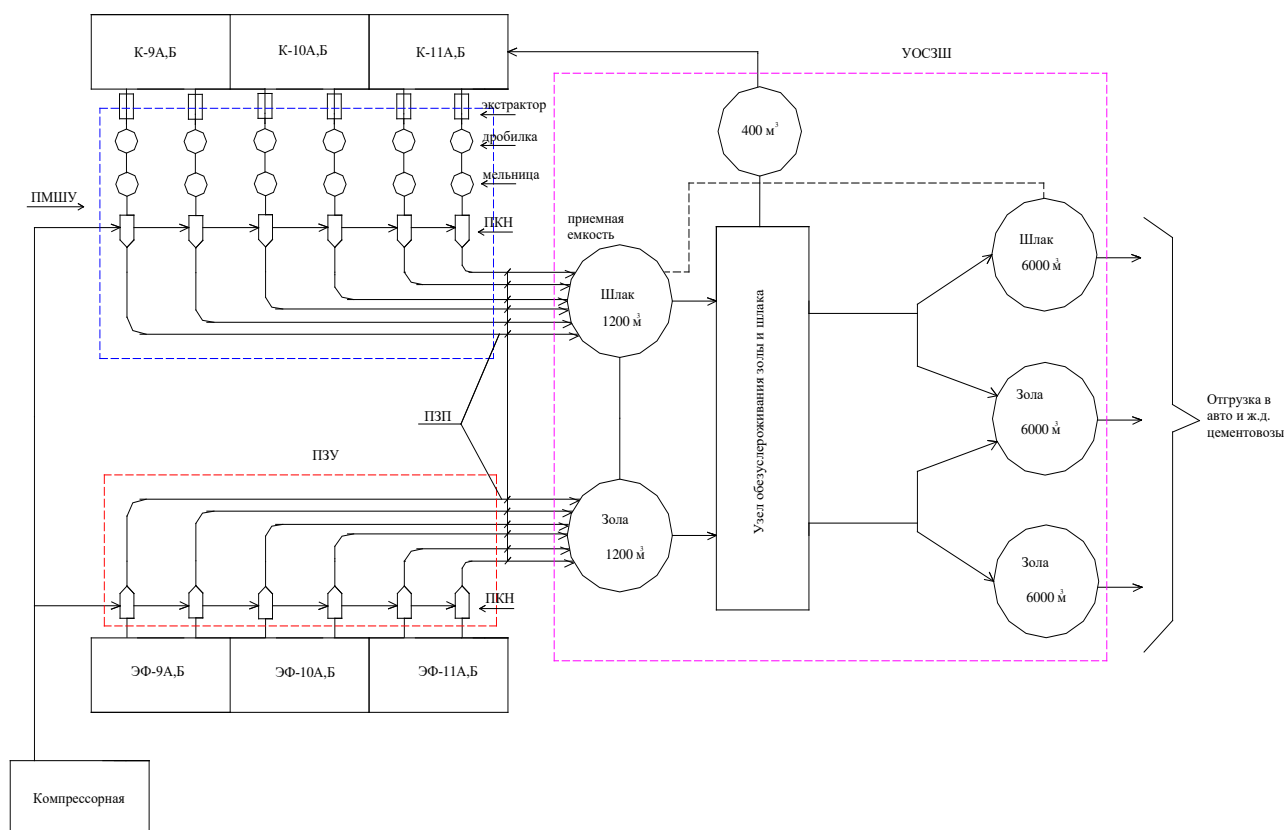


Рисунок 2.8 – Схема системы ЗШУ ТЭЦ-22 после реконструкции

Поскольку для внедрения пневмомеханического шлакоудаления (ПМШУ) есть одно требование – шлак должен быть в твердом виде, то для котлов с жидким удалением шлака эта технология неприменима. Так как на ТЭЦ-22 все котлы

с жидким шлакоудалением, требовалось перевести энергетические котлы ТЭЦ-22 на твердое шлакоудаление, а также внедрить ПЗУ вместо системы ГЗУ.

Было предложено полностью перевести на сжигание угля только энергетические блочные котлы III очереди (с 9 по 11 блок), с переводом на ПМШУ, ПЗУ и установкой отгрузки сухой золы и шлака (УОСЗШ) и полностью отказаться от сжигания твердого топлива в котлах I и II очереди, в результате чего исчезнут затраты на ТО и ремонт систем пылеприготовления и подачи твердого топлива для энергетических котлов I и II очереди, что так же повлечёт дополнительное снижение общих ремонтных затрат станции.

Выбрана схема шлакоудаления МАС с пылеприготовлением и напорным пневмотранспортом молотого шлака до установки обезуглероживания сухой золы и шлака и до силосов молотого шлака и золы. При использовании данной схемы шлак измельчается мельницами до крупности летучей золы, что позволяет его сепарировать отправляя часть на дожиг в энергетические котлы, а оставшуюся его часть продавать по ценам летучей золы (рисунок 2.9).

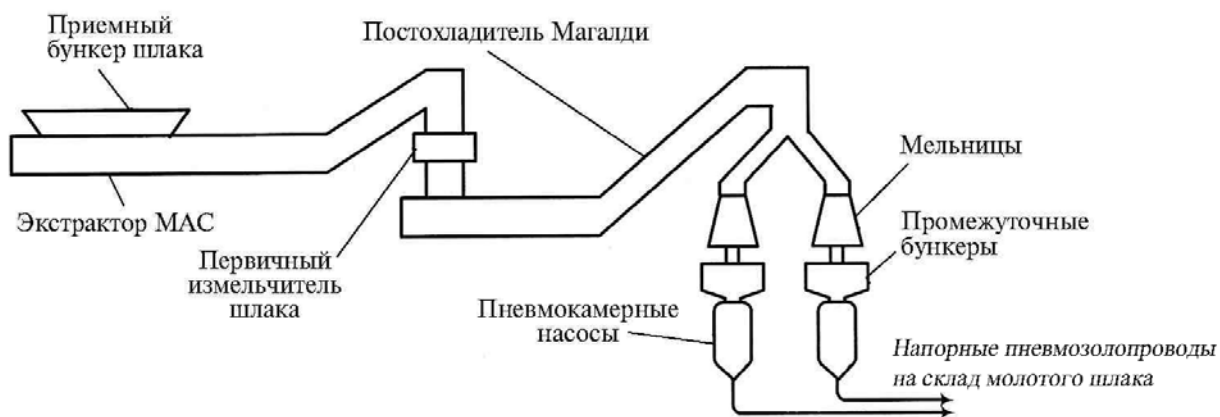


Рисунок 2.9 - Схема шлакоудаления МАС с напорным пневмотранспортом до склада молотого шлака

В качестве внутреннего транспорта выбрана система ПЗУ фирмы ENERGO-EKO-SYSTEMA (рисунок 2.10). Сухая зола от электрофильтров энергетических котлов удаляется пневмокамерными насосами по пневмозолопроводам в приёмный бункер узла обезуглероживания. В узле обезуглероживания она

разделяется, и обезуглероженная зола отправляется в силосную ёмкость для отгрузки потребителю, а другая часть золы направляется на дожиг в котлы.

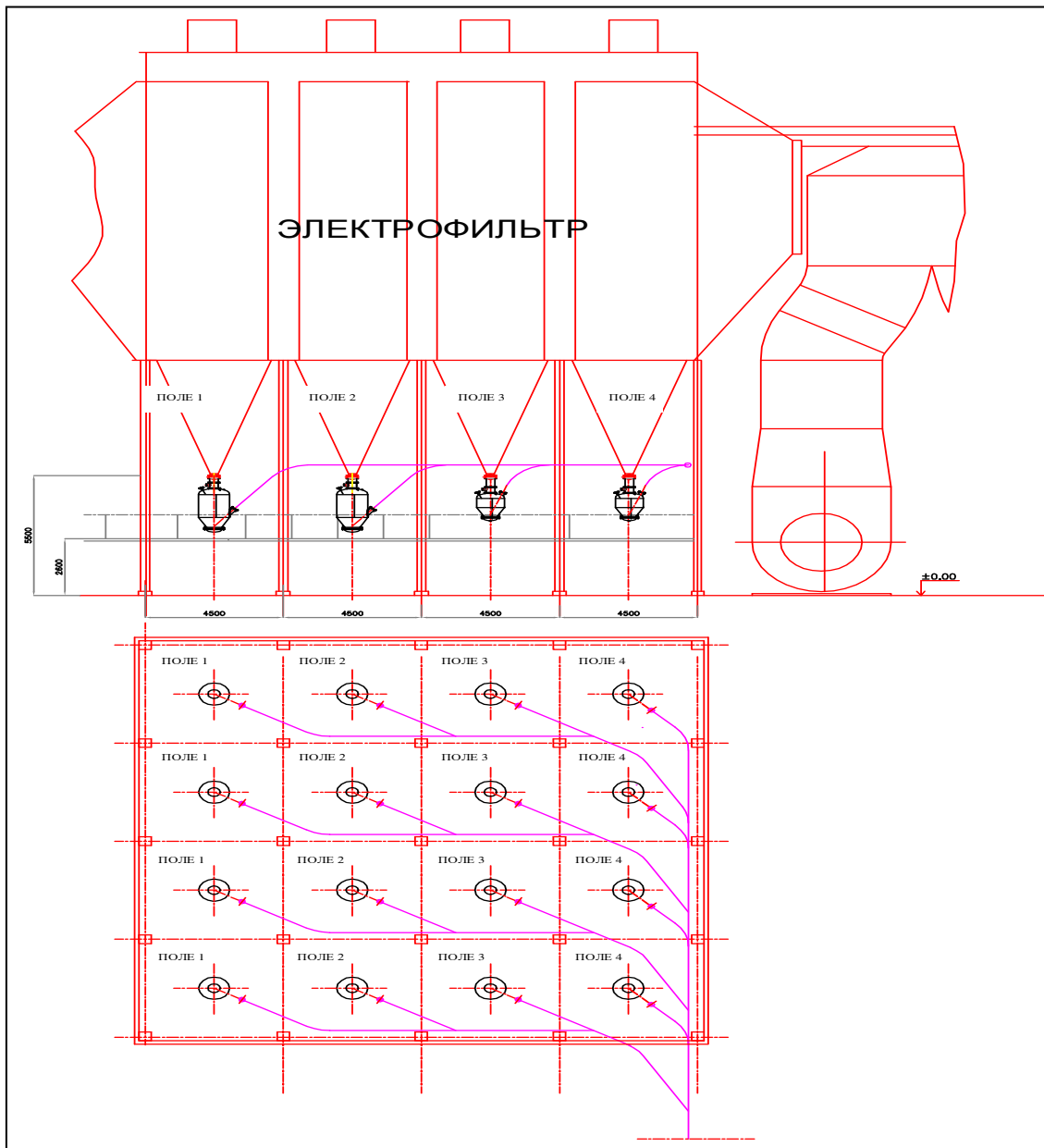


Рисунок 2.10 - Схема удаления золы из бункеров электрофильтра ЭБ 3 очереди

Преимущества системы пневмозолоудаления фирмы ENERGO-EKO-SYSTEMA:

- низкий уровень потребления воздуха и энергии;
- полное исключение использования водных ресурсов;

- относительно низкая стоимость оборудования по сравнению с другими системами механического транспортирования золошлаков;
- низкая стоимость технического обслуживания оборудования;
- возможность использования обычных видов стали в трубопроводных системах;
- высокая плотность заполнения ЗШХ при низком объеме материала.

В таблице 2.5 приведены данные оценки инвестиций по состоянию на 2015 г.

Таблица 2.5 - Оценка инвестиций на реконструкцию котлов и внедрение ПМШУ с УОСЗШ

Исходные данные для оценки инвестиций на реконструкцию котлов	Блок 9		Блок 10		Блок 11	
	Котел №9А	Котел №9Б	Котел №10А	Котел №10Б	Котел №11А	Котел №11Б
Марка котла	ТПП-210А		ТПП-210А		ТПП-210А	
Стоимость оборудования ПМШУ, млн евро:	3	3	3	3	3	3
Стоимость монтажа ПМШУ и перевода котлов на ТШУ, млн евро:	3	3	3	3	3	3
Стоимость узла обезуглероживания с учётом СМР, млн евро:	10					
Стоимость установок ПЗУ, млн евро:	3,66					
Стоимость УОСЗШ с учётом СМР, млн евро:	5,46					
Курс евро (руб.)	55					
Всего по ТЭЦ-22 млн руб.	3031,3					

Затраты на содержание систем ПМШУ, ПЗУ и УОСЗШ состоят из затрат на текущий ремонт. По данным компании «Магалди» затраты на ремонт будут составлять 1,25% от стоимости оборудования. В таблице 2.6 приведены результаты расчета эксплуатационных издержек на обращение с тонной золошлаков в случае реконструкции системы ЗШУ ТЭЦ-22.

Из таблицы 2.6 следует, что в случае реконструкции системы ЗШУ ТЭЦ-22 доход от обращения с 1 тонной золошлаков составит 1628 руб в год, а суммарный доход с учетом продажи золошлаков составит 816,3 млн руб в год.

Оценка основных эколого-экономических показателей реконструкции котлов и системы обращения с золошлаками на ТЭЦ-22 приведена в таблице 2.7.

Таблица 2.6 – Эксплуатационные издержки обращения с золошлаками при внедрении систем ПМШУ, ПЗУ и УОСЗШ

№ п/п	Показатели	Значения
1.	Издержки на оплату труда с учетом ЕСН, тыс. руб/год	8902,40
2.	Затраты на содержание ПМШУ, ПЗУ и УОСЗШ всего, тыс. руб/год	25516,25
2.1.	Ремонтные издержки на систему ПМШУ	12375,00
2.2.	Ремонтные издержки на установку обезуглероживания и отгрузки шлака	6875,00
2.3.	Ремонтные издержки на систему ПЗУ	3750,00
2.4.	Ремонтные издержки на силосный склад	2516,25
3.	Плата за использование природных ресурсов, всего, тыс. руб/год	0,000
3.1.	Плата за землю	0,000
3.2.	Экологические платежи, всего	0,000
3.2.1.	Плата за размещение золошлаков, всего	0,000
3.2.2.	Плата за загрязнение атмосферного воздуха золовыми частицами	0,000
3.2.3.	Плата за загрязнение водного бассейна	0,000
4.	Издержки на электроэнергию, тыс. руб/год	1742,10
5.	Суммарные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, тыс. руб/год	36160,75
6.	Доход от продажи золошлаков, всего, тыс. руб/год	852510,65
7.	Эксплуатационные издержки обращения со шлаками с учетом дохода от реализации золошлаков (п.5 – п. 6), тыс. руб/год	-816349,91
8.	Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, руб/т шлака	-1627,89

Таблица 2.7 – Оценка эколого-экономических показателей проекта реконструкции котлов и ЗШУ ТЭЦ-22

Показатель	Величина, млн руб./год
Снижение затрат на топливо для угольных энергоблоков	217,045
Суммарное снижение платы за выбросы оксидов азота котлами по нормативам	2,182
Расчетный доход от продажи квоты на выбросы CO ₂	111,927
Доход от продажи шлака	250,738
Доход от продажи сухой золы	601,772
Снижение затрат на эксплуатацию	58,971

В результате оценки эколого-экономических показателей предложенных к внедрению технических решений установлено, что:

- работа на угле энергоблоков №№9 - 11 будет возможна при проектной нагрузке;

- ТЭЦ-22 после предлагаемой реконструкции будет соответствовать требованиям 219-ФЗ от 21.07.2014 г.;
- выбросы оксидов азота снизятся до уровня не более нормативных;
- отгрузка золы и шлака будет возможна без ограничений по п.п.п. (не более 5°%);
- снизятся издержки на водопотребление на ТЭЦ-22;
- дисконтируемый срок окупаемости проекта составит 9 лет.

Реконструкция системы ЗШУ на примере Черепетской ГРЭС. Основной уголь – Кузнецкий ДГ. Система внешнего ЗШУ Черепетской ГРЭС (рисунок 2.11) - обратная, с возвратом осветлённой воды на электростанцию. Зола и шлак от котлов первой очереди транспортируется совместно с золой от котлов второй очереди по двум самотечным железобетонным лоткам канала ГЗУ к багерной насосной станции №1 (БНС), оттуда золошлаковая пульпа перекачивается по двум из четырех золошлакопроводам на золоотвал №4. Шлаковая пульпа от котлов второй очереди БНС №2 КТЦ перекачивается по одному из трех шлакопроводов в шлаковые емкости, в районе золоотвала №1.

Самотечный канал ГЗУ представляет собой открытый железобетонный канал, безнапорный, с уклоном – 1%, протяжённостью – 811 м, облицован базальтовой плиткой; в эксплуатации с 1953 г. Предназначен для транспортировки золошлаковой пульпы от КТЦ до багерной насосной станции №1.

Багерная насосная станция №1 состоит из двух ступеней подъема, предназначена для перекачивания золошлаковой пульпы, поступающей по самотечному каналу в приемную камеру насосной, на золоотвал №4. В случае останова насосной станции золошлаковая пульпа за счёт переключения лотков, сбрасывается из самотечного канала ГЗУ в аварийно-резервную ёмкость золоотвала №1.

Золошлакопроводы предназначены для транспортировки золошлаковой пульпы от багерной насосной станции №1 до золоотвала №4. Представляют собой четыре стальных трубопровода Ø530 мм, протяженностью 5100 м, геодезический подъём – 22 м. Проложены на низких ж/б опорах. Оборудованы сальниковыми компенсаторами, дренажными устройствами. Через р.Черепеть и канал

ливневых вод золопроводы проложены по мостовым переходам. Два трубопровода постоянно находятся в работе, один в резерве, один в ремонте.

Золоотвал №4, овражного типа, введен в эксплуатацию в июне 1985 г. Предназначен для складирования золошлаковых отходов, поступающих от котлов первой очереди и золовых отходов от котлов второй очереди. Золоотвал №4 представляет собой овраг протяженностью 4 км, перегороденный в верхней части плотиной аккумулирующего водохранилища (верховой плотиной) и в нижней части - ограждающей дамбой.

Багерная насосная станция №2 расположена на территории электростанции, обслуживается персоналом КТЦ, предназначена для транспортировки шлаковой пульпы от котлов второй очереди по шлакопроводам в шлаковые емкости в районе золоотвала №1.

Работа над проектированием и поставкой систем сухого ЗШУ и ПЗУ была начата еще в 2010 г. В связи с ужесточающимися экологическими нормами при проектировании двух блоков 225 МВт к реализации была принята схема сухого золоудаления компаний Laitex Oy и Pnueplan Oy. В процессе поставки было изготовлено более ста единиц различных типов конвейеров и управляющих ими систем. Изготовление, шефмонтаж и ввод в эксплуатацию систем для двух энергоблоков заняли почти четыре года.

Система пневмозолоудаления энергоблоков №8 и 9 главного корпуса предназначена для бесперебойной эвакуации золы из бункеров котлоагрегатов и электрофильтров энергоблоков №8, №9 и подачи её на склад золы во всем диапазоне допустимых нагрузок энергоблока: в период пуска, прогрева элементов пусковой схемы; при сбросах нагрузки и останове блока.

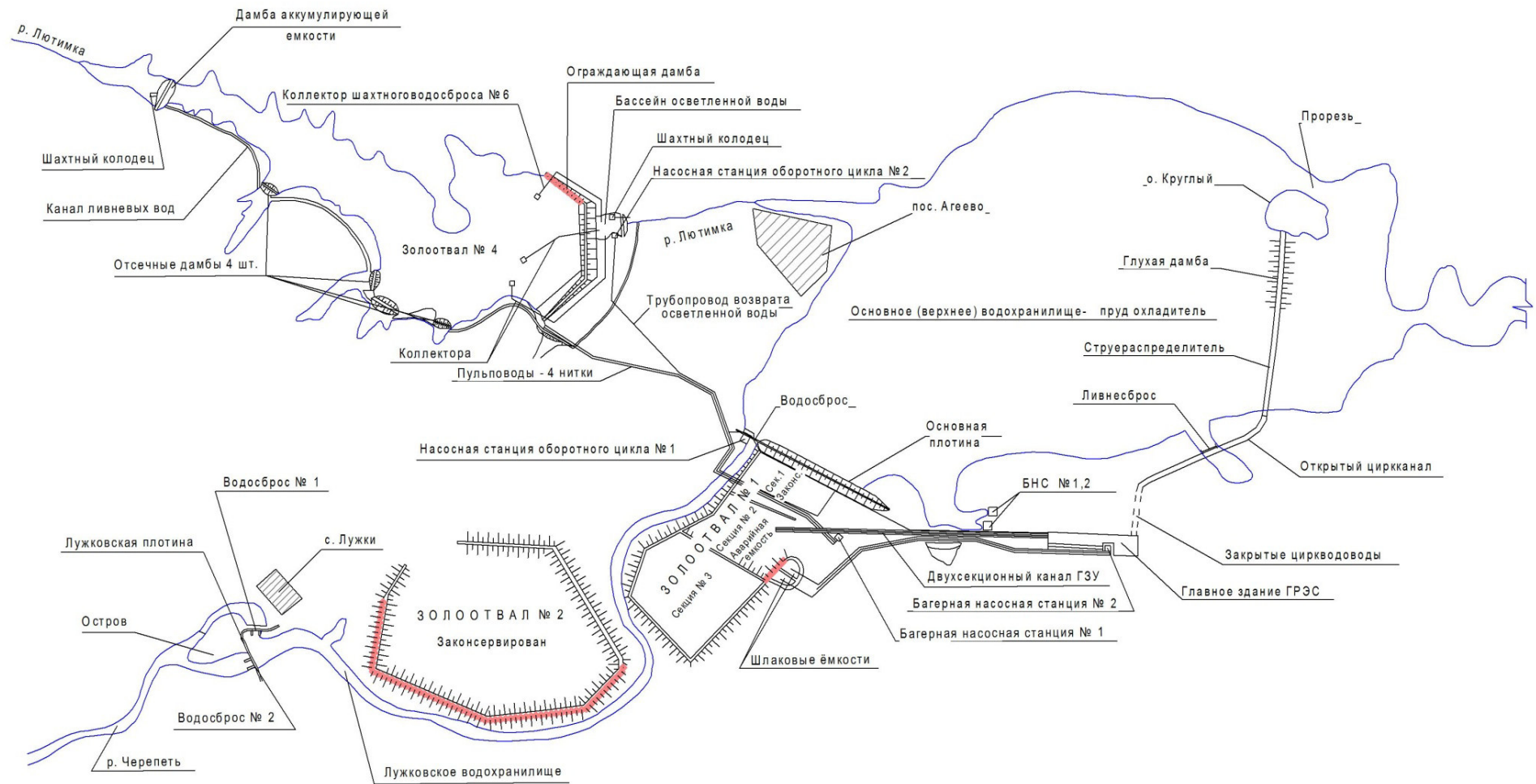


Рисунок 2.11 - Ситуационный план внешнего гидрозолошлакоудаления Черепетской ГРЭС

Системы сбора и транспортировки сухой золы (рисунок 2.12) от энергоблоков № 8 и 9 идентичны и включают в себя пневмокамерные питатели различной производительности.

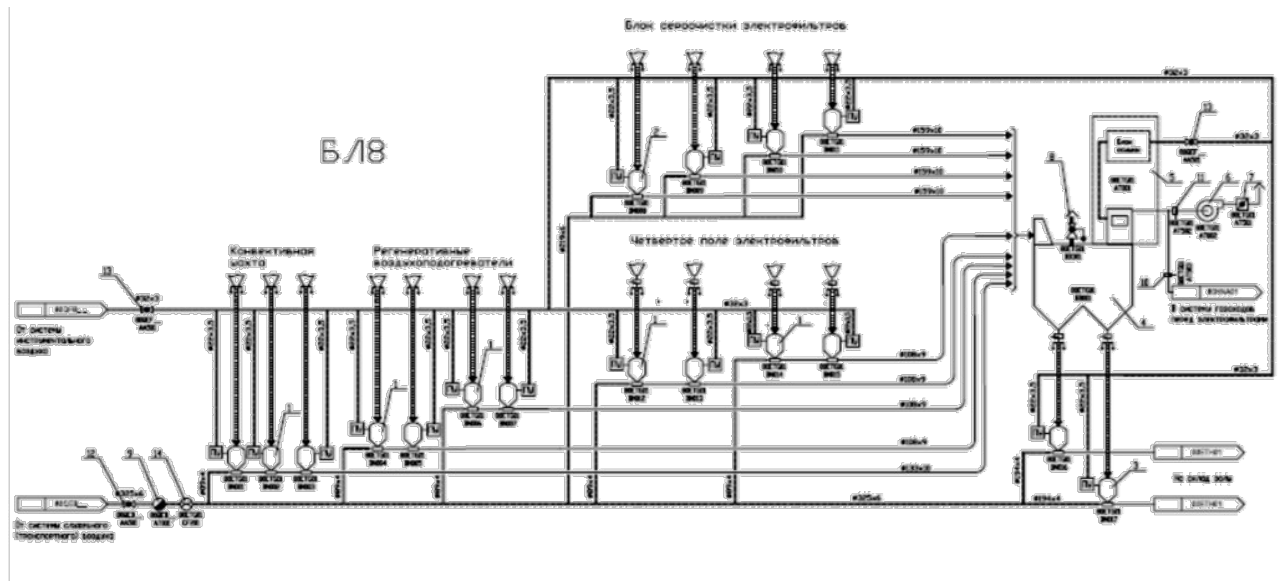


Рисунок 2.12 - Принципиальная схема золоудаления блоков 225 МВт.

Пневматическая транспортировка сухой золы от промежуточного бункера-накопителя, находящегося возле установки электрофильтров, производится пневмокамерными насосами по двум пневмозолопроводам по эстакадам до силосного склада золы.

Силосный склад золы предназначен для приема золы, подаваемой системами пневмотранспорта от промбункеров блоков № 8 и 9, ее хранения, отгрузки золы в автоцементовозы для потребителей и увлажнения водой и отгрузки увлажненной золы в автосамосвалы для вывоза избытков золы в золоотвал.

Силосный склад сухой золы запроектирован в составе двухсилосного корпуса общей емкостью 3000 м³.

Топки котлов имеют твердое шлакоудаление (рисунок 2.13). Шлак из холодной воронки топки котла поступает на транспортер, который транспортирует шлак за пределы котла в промбункер. Из промбункера через дробилки шлак сбрасывается в ковшовые элеваторы, с помощью которых шлак затем подается в бункер сбора и хранения шлака емкостью 20 м³. Выход шлака от одного котла со-

ставляет 2,9 т/ч, при принятой плотности шлака 0,8 т/м³ бункер шлака обеспечивает хранение шлака в течение трех суток. Бункер шлака имеет коническую форму днища. Цилиндрическая часть опирается на металлоконструкцию. Под бункером размещается камерный питатель для пневмотранспортирования в силос шлака, размещаемый на промплощадке ГРЭС в непосредственной близости к силосному складу золы.

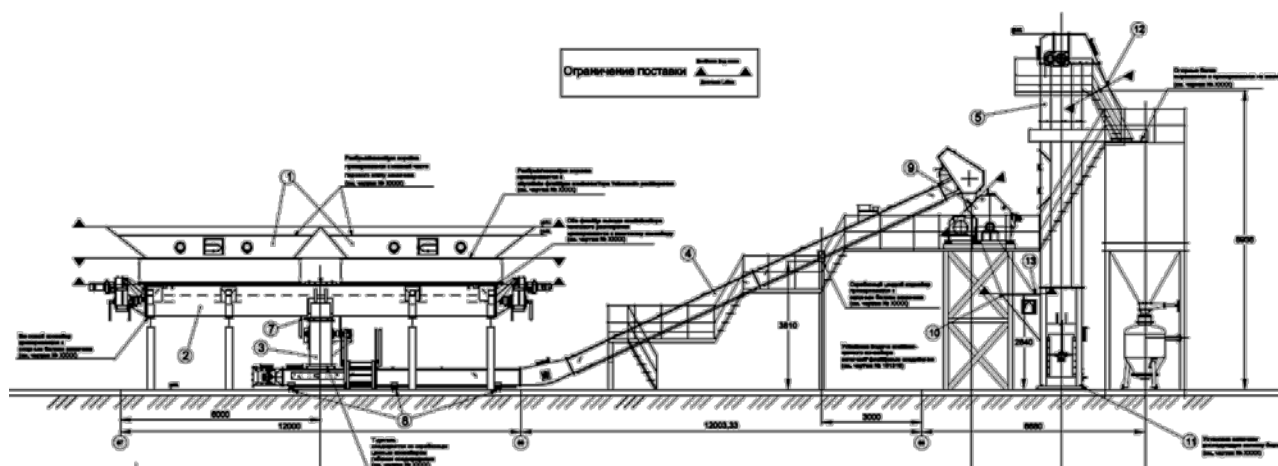


Рисунок 2.13 - Проектная система шлакоудаления.

Система пневмоудаления и склад шлака предназначены для подачи шлака из промбункеров котлоагрегатов энергоблоков в главный корпус ГРЭС в силос склада шлака, хранения шлака, смешения шлака с водой и загрузки автосамосвалов для вывоза смоченного шлака в золоотвал.

Склад шлака размещается вблизи склада золы с разрывом 6 м. Под силосом склада предусмотрен автопроезд для выезда автоцементовозов, загружаемых на складе золы.

Были произведены расчеты эксплуатационных издержек на обращение с золошлаками при существующей и перспективной системе ЗШУ при условии 100% продажи золошлаков и 100% их складировании, результаты которых приведены в таблицах 2.8 – 2.10.

Таблица 2.8 - Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками при существующей системе ГЗУ в 2013 г.

№ п/п	Показатели	Величина
1.	Издержки на оплату труда с учетом ЕСН, тыс.руб/год	14257,18
2.	Затраты на содержание ГЗУ, всего, тыс. руб/год	2036,28
2.1.	Затраты на ремонт ГЗУ и содержание дамб тыс.руб./год	1430,00
2.2.	Мониторинг воды на золоотвале тыс.руб./год	473,86
2.3.	Мониторинг почвы на золоотвале тыс.руб./год	132,42
3.	Плата за использование природных ресурсов, всего, тыс. руб/год	3227,87
3.1.	Земельный налог тыс.руб.	1486,00
3.2.	Экологические платежи, всего, тыс. руб/год	1741,87
3.2.1.	Плата за размещение золошлаков, тыс.руб./год	1696
3.2.2.	Плата за загрязнение водного бассейна, тыс.руб./год	45,87
4.	Инвестиции (в том числе наращивание дамб) тыс.руб.	14810,00
5.	Плата за аренду земли, тыс.руб./год	23,82
6.	Налог на имущество тыс.руб./год	728,00
7.	Издержки на амортизацию тыс.руб./год	3483,004
8.	Издержки на электроэнергию, тыс.руб./год	41673,37
9.	Суммарные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, тыс. руб/год	80239,52
10	Количество образовавшихся ЗШО т./год	247628,4
11	Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, руб/ т	324,03

Таблица 2.9 - Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками при проектной схеме ЗШУ блоков 225 МВт при условии 100% продажи

Нагрузка, %	60	80	100
Установленное число часов работы оборудования	7500	7500	7500
Расход топлива т/ч	100,65	155,55	183
Выход золы т/ч	25,44	39,31	46,25
Выход шлака т/ч	3,19	4,93	5,8
Объем золошлаков, т /год	214 706,25	331 818,75	390 375,00
Объем охлаждающей воды м³/ч	80,06	80,06	80,06
Издержки на охлаждающую воду тыс. руб/год	172,94	172,94	172,94
Издержки на электроэнергию тыс. руб/год	10236,11	13648,14	17060,18
Издержки на оплату труда тыс.руб/год	14 521,21	14 521,21	14 521,21
Суммарные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, тыс. рублей	24 930,25	28 342,29	31 754,33
Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками руб/т	116,11	85,41	81,34
Стоимость реализации золы, руб/т	260,00	260,00	260,00
Стоимость реализации шлака, руб/т	520,00	520,00	520,00
Прибыль от реализации золошлаков до налогообложения тыс. руб.	105 426,75	162 932,25	191 685,00
Чистая прибыль от обращения с золошлаками, тыс. руб.	59 411,15	102 003,51	121 593,67

Таблица 2.10 - Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками при проектной схеме ЗШУ блоков 225 МВт при условии 100% складирования на штабельном складе

Нагрузка, %	60	80	100
Установленное число часов работы оборудования	7500	7500	7500
Расход топлива т/ч	100,65	155,55	183
Выход золы т/ч	25,44	39,31	46,25
Выход шлака т/ч	3,19	4,93	5,8
	214		
Объем ЗШО т /год	706,25	331 818,75	390 375,00
Объем охлаждающей воды м ³ /ч	80,06	80,06	80,06
Издержки на охлаждающую воду тыс. руб/год	172,94	172,94	172,94
Издержки на электроэнергию тыс. руб/год	10 236,11	13 648,14	17 060,18
Издержки на оплату труда тыс.руб/год	24 026,00	24 026,00	24 026,00
Затраты на топливо для техники тыс руб/год	3 052,60	4 717,66	5 550,19
Суммарные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, тыс. руб	37 487,65	42 564,74	46 809,30
Плата за размещение тыс.руб/год	1558,25	2408,21	2833,19
Земельный налог тыс.руб./год	2707,70	2707,70	2707,70
Налог на имущество тыс.руб./год	27,30	27,30	27,30
Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, руб/т	194,60	143,78	134,17

Как видно из расчетов удельные эксплуатационные издержки на обращение с золошлаками при проектной схеме ЗШУ, более чем в 2 раза ниже, чем при существующей.

Однако, проанализировав проектную схему и оборудование предлагаемой системы шлакоудаления можно выявить следующие недостатки:

- охлаждение шлака водяной завесой в разбрызгивающей воронке;
- применение охлаждения внутренних поверхностей шнеков шнекового транспортера;
- наличие большого количества вращающихся механизмов;
- наличие трения шлака о шнек;
- возможность повреждения шнеков большими кусками шлака.

В связи с этим выполнены расчеты с учетом внедрения системы пневмомеханического шлакоудаления МАС компании «Магалди», которая лишена указанных недостатков. Результаты расчетов эксплуатационных издержек приведены в таблицах 2.11 - 2.12.

Таблица 2.11 - Удельные эксплуатационные издержки обращение с ЗШО перспективная схема 100% продажа

Нагрузка, %	60	80	100
Установленное число часов работы оборудования	7500	7500	7500
Расход топлива, т/ч	100,65	155,55	183,00
Выход золы, т/ч	25,44	39,31	46,25
Выход шлака, т/ч	3,19	4,93	5,80
Объем золошлаков, т /год	214 706,25	331 818,75	390 375,00
Издержки на электроэнергию тыс. руб/год	9 479,12	12 638,83	15 798,54
Издержки на оплату труда тыс.руб/год	14 521,21	14 521,21	14 521,21
Суммарные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, тыс. рублей	24 000,33	27 160,04	30 319,75
Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, руб/т	111,78	81,85	77,67
Стоимость реализации золы руб/т	260,00	260,00	260,00
Стоимость реализации шлака руб/т	790,010	790,00	790,00
Стоимость реализации сухих золошлаков, тыс руб в год	156 937,68	242 540,06	285 341,25
Ожидаемое увеличение КПД котла %	1,00	1,00	1,00
Снижение расхода топлива т/год	7 946,05	12 280,26	14 447,37
Экономия топлива тыс. руб/год	27 811,18	42 980,92	50 565,79
Чистая прибыль от обращения с ЗШО тыс. руб.	129 361,00	209 852,93	248 519,04

Внедрение систем шлакоудаления МАС и системы пневмотранспорта сухой золы на электростанциях позволяет:

- повысить надежность работы не только системы золошлакоудаления, но и ТЭС в целом;
- снизить себестоимость производства энергии;
- значительно улучшить экологические показатели ТЭС;
- снизить выбросы CO₂ за счет уменьшения удельных расходов топлива при производстве энергии;

- использовать шлаки в качестве ценного материала техногенного происхождения при производстве продукции различного назначения предприятиями других отраслей экономики;
- значительно снизить удельные эксплуатационные издержки обращение с золошлаками по сравнению с системой гидрозолошлакоудаления.

Таблица 2.12 - Удельные эксплуатационные издержки обращение с золошлаками при применении перспективной схеме и 100%-ном складировании.

Нагрузка%	60	80	100
Установленное число часов работы оборудования	7500	7500	7500
Расход топлива т/ч	100,65	155,55	183,00
Выход золы т/ч	25,44	39,31	46,25
Выход шлака т/ч	3,19	4,93	5,80
Объем ЗШО т /год	214706,25	331818,75	390375,00
Издержки на электроэнергию тыс. руб/год	9479,12	12638,83	15798,54
Издержки на оплату труда тыс.руб/год	24026,00	24026,00	24026,00
Затраты на топливо для техники тыс руб/год	3052,60	4717,66	5550,19
Суммарные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, тыс. руб	36557,73	41382,49	45374,72
Плата за размещение тыс.руб/год	1558,25	2408,21	2833,19
Земельный налог тыс.руб./год	2707,70	2707,70	2707,70
Налог на имущество тыс.руб./год	27,30	27,30	27,30
Удельные эксплуатационные издержки обращения с золошлаками, руб/т	190,26	140,21	130,50
Увеличение КПД котла %	1	1	1
Снижение расхода топлива т/год	7946,05	12280,26	14447,37
Экономия топлива тыс. руб/год	27811,18	42980,92	50565,79

По данным, предоставленным фирмой «Магалди», ориентировочные капиталовложения, необходимые для реконструкции системы шлакоудаления двух блоков 225 МВт по состоянию на 2014 г. составят 379,2 млн.руб.

Таким образом, совокупный эффект от внедрения пневмомеханического шлакоудаления составит 61,4 млн руб/год.

Реконструкция системы ЗШУ на примере Рефтинской ГРЭС. Угольной

ТЭС, на которой реализована полностью сухая система ЗШУ, включающая систему отбора, транспортирования и складирования золы, является Рефтинская ГРЭС мощностью 3800 МВт, расположенная в Свердловской обл. [21, 103]. Основной вид топлива - экибастузский уголь с проектной зольностью 42 %. Ежегодный выход золошлаков составлял около 4 млн т/год.

Существующая система представляла собой обратную систему ГЗУ с транспортированием золы и шлака по пульпопроводам на золоотвал. В 2015 г. система ЗШУ была реконструирована и заменена на «сухую». В такой системе зола из бункеров электрофильтров пневмокамерными насосами по пневмозолопроводам транспортируется на силосный склад объемом 20000 м³. Часть золы из силосов отгружается потребителям и транспортируется автоцистернами и железнодорожными вагонами. Невостребованная часть золы с помощью трубного ленточного конвейера протяженностью 4,5 км транспортируется на сухое золошлакохранилище. После трубного ленточного конвейера отвалообразователь укладывает золу ровными слоями, которые утрамбовываются бульдозерами и катками. Во избежание пыления золы отвал орошается. После заполнения отвала на его поверхность наносится суглинистая почва и высевается трава с автоматизацией процессов посева и полива. Таким образом, имеет место постоянная рекультивация заполненных карт золошлакохранилища.

Блок-схема безводной системы золошлакоудаления ТЭС представлена на рисунке 2.14.

На рисунке 2.15 показан силосный склад системы ЗШУ Рефтинской ГРЭС, а на рисунке 2.16 – трубный ленточный конвейер, по которому зола транспортируется на «сухой» золоотвал [103].

Существовавшая система золошлакоудаления Рефтинской ГРЭС - традиционная, гидравлическая, совместная, обратная.

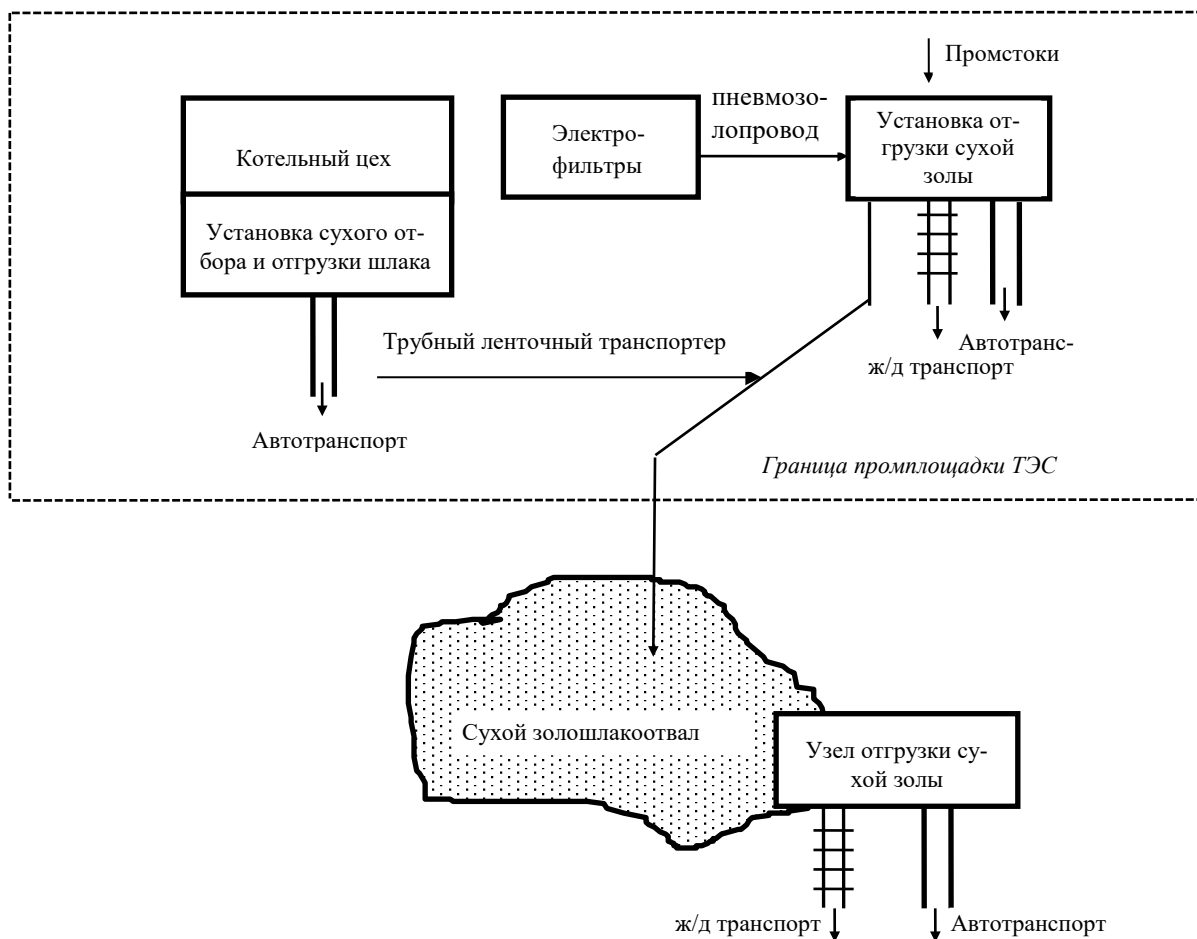


Рисунок 2.14 — Блок-схема безводной системы ЗШУ Рефтинской ГРЭС



Рисунок 2.15 — Силосный склад системы ЗШУ Рефтинской ГРЭС



Рисунок 2.16 — Трубный ленточный конвейер для транспорта золы до золоотвала

На момент 2010 г. ситуация была следующей: гидрозолошлакоотвал №1 (ГЗО) площадью около 370 га, расположенный в 2 км от ГРЭС, заполнялся с наращиванием второго и третьего ярусов. Емкость ГЗО была исчерпана и на нем была выполнена рекультивация. Усилиями ГРЭС, Сухоложского лесхоза, на территории которого находятся золоотвалы, и ученых Ботанического сада УрО РАН (тогда Института леса) впервые в мире удалось провести рекультивацию отработанного золоотвала №1 значительной площади с посадкой лесных насаждений. Экспериментальные посадки начались в 1992 г., в 2005 г. молодые деревья были высажены на последних 47 га рекультивированного ГЗО.

ГЗО № 2 площадью 995 га, расположенный в 4,5 км от ГРЭС, введен в эксплуатацию в 1974 г. Первоначальная емкость была исчерпана в 1985 г. и последующее заполнение ГЗО №2 производилось при его поярусном наращивании дополнительными тремя ярусами.

Дальнейшая эксплуатация ГЗО №2, после заполнения емкости третьего яруса наращивания, в гидравлическом режиме запрещена по условиям устойчивости дамб обвалования.

В результате проведения экспертной оценки было рассмотрено два основных варианта организации ЗШУ после 2010 г.:

1. Остается и расширяется действующая система ГЗУ.
2. Создается система с удалением и отгрузкой золы и шлака в сухом виде и размещением невостребованной их части на сухом золошлакохранилище экологически приемлемыми технологиями.

При оценке технико-экономических и экологических показателей второго варианта рассматривались «сухие» технологии удаления и складирования золошлаков. Под «сухими» технологиями обращения с золошлаками понимаются такие технологии, при использовании которых вода не применяется в качестве транспортирующей среды.

В таблице 2.13 представлены основные показатели ГЗУ и «сухой» системы ЗШУ.

Таблица 2.13 - Основные показатели гидравлической и сухой систем ЗШУ

Показатели	ГЗУ	Сухое ЗШУ
Площадь для расширения золоотвала, га	456,0	—*
Общая вместимость золоотвала, млн м ³	137,2	185,3
Срок заполнения золоотвала, лет	20,6	36,0
Длина ограждающих дамб, км	49,4	—
Объем камня для строительства дамб, тыс. м ³	4660,0	—
Стоимость дамбы (без НДС), млн долл. США	269,0	—
Оценка стоимости вариантов системы ЗШУ (без НДС), млн долл. США	448,0	241,0
Срок окупаемости инвестиционного проекта	Никогда!	В зависимости от объема реализации золошлаков

* — для строительства сухого золоотвала используются заполненные карты ГЗО.

Проектные последствия внедрения сухой системы золошлакоудаления:

- улучшение экологической обстановки в районе размещения электростанции;
- отсутствие необходимости расширения золоотвала и сохранение 465 га леса;
- снижение водопотребления электростанцией в целом;

- увеличение срока заполнения золоотвала в 1,8 раза;
- снижение себестоимости производства электроэнергии;
- увеличение объема реализации золошлаков.

Основные результаты реконструкции системы ЗШУ Рефтинской ГРЭС:

- существующая система гидравлического удаления золы и шлака сохраняется в качестве резервной и работает параллельно с системой сухого золоудаления;
- частично создана система сухого золоудаления от бункеров электрофильтров энергоблоков, пневмотранспорта ее до силосного склада, частичная отгрузка сухой золы потребителям и складирование неостребованной части сухой золы на сухом ЗШХ;
- удорожание стоимости обращения с золошлаками в целом по ГРЭС;
- удорожание себестоимости производства электроэнергии;
- повышенное электро- и водопотребление электростанцией в целом по сравнению с полностью «сухими» технологиями обращения с золошлаками, но с уменьшением расхода воды и электроэнергии на систему ЗШУ по сравнению с ГЗУ.

В результате реконструкции системы ЗШУ Рефтинской ГРЭС с переходом на сухую технологию удаления золы был получен следующий эффект:

- расход технической воды уменьшился примерно в 3 раза;
- осветленная вода подается только на каналы в котельном отделении для удаления шлака;
- расход электроэнергии в системе золоудаления уменьшился также примерно в 3 раза.

2.4 Рекомендации по эксплуатации систем ЗШУ ТЭС

В настоящее время общее количество крупных твердотопливных ТЭС составляет 148. Из них около 2/3 гидрозолошлакоотвалов переполнены, многие из них находятся в предаварийном состоянии, у оставшихся - емкостей хватит не

более, чем на 10 лет. Таким образом, при существующем положении дел в ближайшее время может наблюдаться лавинообразный характер переполнения золошлакоотвалов, что, в свою очередь, может привести к снижению мощности твердотопливных ТЭС и резкому ухудшению экологической обстановки в зоне расположения станций за счет постоянного загрязнения водного и воздушного бассейнов, а также изменения химико-минералогического состава почв. В связи с этим, необходимо срочно решать проблему переполнения емкостей золошлакоотвалов и увеличения срока их заполнения даже при невозможности перехода к безводным системам золошлакоудаления на ТЭС.

При определении технологий транспортирования золошлаков предпочтение следует отдавать безводным технологиям, т.к. системы ГЗУ наносят существенный вред окружающей среде по сравнению с «сухими» системами (загрязнение водного и воздушного бассейнов, деградация почв в зоне размещения золошлакоотвала); системы ГЗУ являются неэкономичными из-за высоких энергозатрат и большого удельного расхода воды на гидротранспорт золошлаков. Кроме того, потребительские свойства золошлаков существенно ухудшаются при контакте с водой, что сужает спектр направлений применения и ценность гидратированной золы. Для повышения уровня утилизации золы и шлака с учетом их разных характеристик, а также для увеличения емкости золо- и шлакоотвалов удаление, складирование и отгрузка золы и шлака должна быть отдельной в зависимости от требуемых потребителями свойств. При отдельном удалении золы и шлака также существенно упрощаются технологии их глубокой переработки с целью получения продуктов в виде недожога, магнитного концентрата, алюмосиликатов. Учитывая, что электрофилтры являются сепарационными устройствами, улавливающими золу по группам фракций, в случае наличия потребителей следует отгружать сухую электрофилтровую золу с разных полей электрофилтров в зависимости от требований к их фракционному составу. Для минимизации негативного воздействия действующих секций золошлакоотвалов на окружающую среду следует орошать поверхность пляжа золошлакоотвала

для исключения пыления частиц с его поверхности, экранировать ложа с помощью противофильтрационных экранов с целью недопущения попадания фильтратов в водоносный горизонт. В случае применений систем ГЗУ наиболее экономичным является транспортирование пульпы высокой концентрации, что позволяет снизить эксплуатационные расходы в системе ЗШУ. Проблема абразивного износа фасонных и прямолинейных участков трубопроводов является актуальной как в системах ГЗУ, так и в системах пневмотранспортирования, однако, в последних она является наиболее часто встречающейся, что обусловлено состоянием транспортируемого материала, и режимами транспортирования.

С целью достижения максимального продления межремонтного срока эксплуатации трубопроводов систем ЗШУ очень важным является выбор оптимальных режимов транспортирования золошлаков. В случае выполнения трубопроводов без учета оптимальных скоростей и концентрации твердых частиц в несущей среде величина абразивного износа отдельных его участков может существенно возрастать. Таким образом, для обеспечения максимальной долговечности трубопроводов необходимо выбирать минимально допустимые скорости транспортирования потока и оптимальные концентрации на наиболее изношенных участках. Если скорость движения среды будет меньше критической, то более крупные частицы золы станут осаждаться на дно, и трубопровод будет заиливаться. Образование "пробок" наиболее вероятно в фасонных участках трубопроводов, а также в местах фланцевых соединений. Следовательно, для нормальной работы напорного транспортного трубопровода мелкодисперсных материалов необходимо, чтобы скорость движения транспортируемой среды была равна или несколько превышала критическую. В случае гидротранспорта минимально допустимая скорость движения пульпы, обеспечивающая показатели надежности системы, зависит от массовой концентрации золы (шлака) в пульпе, составляющей обычно от 5 до 20 %, для золовой пульпы рекомендуется скорость 1,2...1,4 м/с, для шлаковой – 1,7...2,3 м/с.

При пневмотранспорте согласно [113] предлагается определять скорость

транспортирования через скорость витания частиц, т.е. скорость, при которой частица находится во взвешенном состоянии:

$$U_{\text{вт}} = \sqrt{\frac{4gd_{\text{max}}(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{в}})}{3C\rho_{\text{в}}}}, \quad (2.2)$$

где d_{max} – максимальный диаметр частиц, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{м}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность золы и воздуха соответственно, кг/м³; C – коэффициент сопротивления частиц, определяется экспериментально.

В формуле (2.2) не учитывается влияние диаметра труб, формы и полидисперсности частиц. Зависимость предназначена для расчета высоконапорных систем, поэтому в дальнейшем считается нецелесообразным ее сравнение с разработанной формулой для расчета критической скорости.

В источниках [114, 115] приводится формула для определения критической скорости воздуха:

$$U_{\text{кр}} = k \sqrt{\frac{(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{в}})}{\rho_{\text{в}}}} g D m, \quad (2.3)$$

где k – опытная константа; для легко аэрируемой золы рекомендуется принимать $k=0,1$; D – внутренний диаметр трубопровода, м; m – относительная массовая концентрация золы в потоке воздуха, кг/кг.

ВНИИГ [116] разработал формулу для определения скорости транспортирования частиц крупностью 0,01...0,2 мм для пневмосистем с $m \leq 6$.

$$U_{\text{в}} = U_{\text{кр}} = 1,15(\Phi \sqrt{gD} - \psi U_{\text{вт}} m^{-0.5}) + \beta L_{\text{пр}}^2, \quad (2.4)$$

где Φ и ψ – опытные функции, которые определяются исходя из внутреннего диаметра пневмозолопровода [115]; $\beta = (2...5) \cdot 10^{-5}$ – опытный коэффициент (при этом, меньшее значение используют для сухой золы); $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина транспортирования. Граничным условием работы формулы (2.4) является невысокая относительная концентрация золы в транспортирующем воздухе (не более 6 кг/кг), что ограничивает ее использование при более высоких величинах m . По этой причине в дальнейшем формула (2.4) рассмотрена не будет.

Критическая скорость пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах без

учета факторов формы и полидисперсности материала определяется по выражению (2.5) из [117]:

$$U_{кр} = 0,481 \left(\frac{\rho_m}{\rho_g} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \quad (2.5)$$

Изначально это выражение применялось для расчета критических скоростей при выполнении условий:

$$m \geq 2; D \geq 0,08 \text{ м}; d_{ср \text{ в}3} \geq 20 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где m – массовая расходная концентрация потока смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха; D – внутренний диаметр трубопровода, м; $d_{ср \text{ в}3}$ – средневзвешенный эквивалентный диаметр частиц материала (средневзвешенная крупность), м.

При проведении исследований проб №№1 - 6, результаты которых приведены в таблице 2.14, выяснилась, что для расчета критической скорости при перемещении абразивных материалов различной крупности для различных условий пневмотранспортирования необходимо усовершенствовать зависимость (2.5), учитывая форму и полидисперсность транспортируемого материала.

При исследовании влияния формы частиц на критические скорости пылегазовых потоков была разработана зависимость с учетом коэффициента формы частиц:

$$U_{кр} = 0,381 \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \cdot k_f \quad (2.6)$$

Коэффициент формы k_f определяется по зависимости:

$$k_f = \frac{k_{f1} \cdot m_1 + k_{f2} \cdot m_2 + \dots + k_{fi} \cdot m_i}{100\%} \quad (2.7)$$

В результате проведения экспериментальных исследований, протокол которых находится в Приложении П, а также аналитических исследований автором разработана зависимость для расчета критических скоростей пылегазовых потоков для различных условий пневмотранспортирования с учетом фактора формы и полидисперсности частиц [118]:

$$U_{\kappa p} = 0,317 \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \cdot \frac{k_f}{k_d}, \quad (2.8)$$

где ρ_m – агрегатная плотность материала, кг/м³, ρ_w – плотность воздушного потока, кг/м³, D_{200} – внутренний диаметр трубопровода, равный 0,2 м, D – внутренний диаметр трубопровода, м, m – массовая расходная концентрация потока смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха; D – внутренний диаметр трубопровода, м; d_0 – средневзвешенный эквивалентный диаметр частиц материала (средневзвешенная крупность), м, k_f – коэффициент формы, k_d – коэффициент полидисперсности материала.

Средневзвешенный диаметр определяется по формуле:

$$d_{cp.вз} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot m_i}{100}, \quad (2.9)$$

где d_i – средний размер частиц i -й фракции ситового анализа, определяемый как полусумма размеров отверстий двух соседних сит, m_i – %-ное содержание i -й фракции по массе (остатки на ситах).

Коэффициент полидисперсности k_d определяется по формуле:

$$k_d = \frac{d_{cp.вз}}{d_{med}} \quad (2.10)$$

В табл. 2.14 приведены величины коэффициентов полидисперсности и формы частиц для проб №№1-6, рассчитанные по разработанным зависимостям (2.7) и (2.10). Средневзвешенная крупность определена по формуле (2.9) на основании измерений фракционного состава материалов. Величины медианных диаметров частиц получены при выполнении экспериментов с помощью анализатора Kamika.

Для оценки качества разработанной зависимости проведены сравнение формулы (2.8) с разработанной ранее формулой (2.3), а также с результатами экспериментальных исследований.

Таблица 2.14 - Коэффициенты формы и полидисперсности проб №№1-6.

№ пробы	Материал	d_{cp} вз, мкм	d_{med} , мкм	k_d	k_f
1	Циклонная зола эстонских сланцев «Zolest-oil»	76,83	64,4	1,19	1,188
2	Циклонная зола эстонских сланцев «Zolest-oil»	75,33	64,3	1,17	1,117
3	Неклассифицированная зола PozzFill®	73,44	60,0	1,22	1,283
4	Классифицированная зола DuraPozz®	42,99	31,4	1,37	1,470
5	Дважды классифицированная зола SuperPozz®	15,59	12,6	1,24	1,929
6	Полые алюмосиликатные микросферы золы Беловской ГРЭС	48,89	48,3	1,01	1,134

Коэффициенты формы и полидисперсности частиц приняты по результатам известных данных экспериментальных исследований. В результате анализа и обработки данных по коэффициентам формы частиц мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов была разработана расчетная зависимость по определению коэффициента формы частиц, представленная на рисунке 2.17, которой рекомендуется пользоваться в случае отсутствия характеристик размеров частиц в пробах.

В результате анализа данных по расчету критических скоростей, полученных по формулам (2.3) и (2.8), приведенным в таблице 2.15, и их сравнения с данными экспериментальных исследований следует, что разработанная формула (2.8) имеет существенно лучшую сходимость с экспериментальными данными, чем формула (2.3). Таким образом, в дальнейшем рекомендуется пользоваться формулой (2.8) для определения критических скоростей пылегазовых потоков.

Усредненная скорость частиц транспортируемого материала в потоке аэро-смеси зависит от коэффициента надежности пневмотранспортирования, численно равного отношению транспортной U и критической скоростей воздуха $U_{кр}$. В общем случае усредненная скорость частиц в потоке аэро-смеси в случае напорного пневмотранспорта золы $1,0 \leq U \leq 1,7 \cdot U_{кр}$ согласно [119], а оптимальная скорость воздушного потока $U_{опт} = (1,15 \dots 1,2) \cdot U_{кр}$. Оптимальную скорость транс-

портирования золовоздушной смеси предлагается определять через критическую скорость воздуха, рассчитанную по зависимости (2.8), умножив на коэффициент надежности пневмотранспортирования.

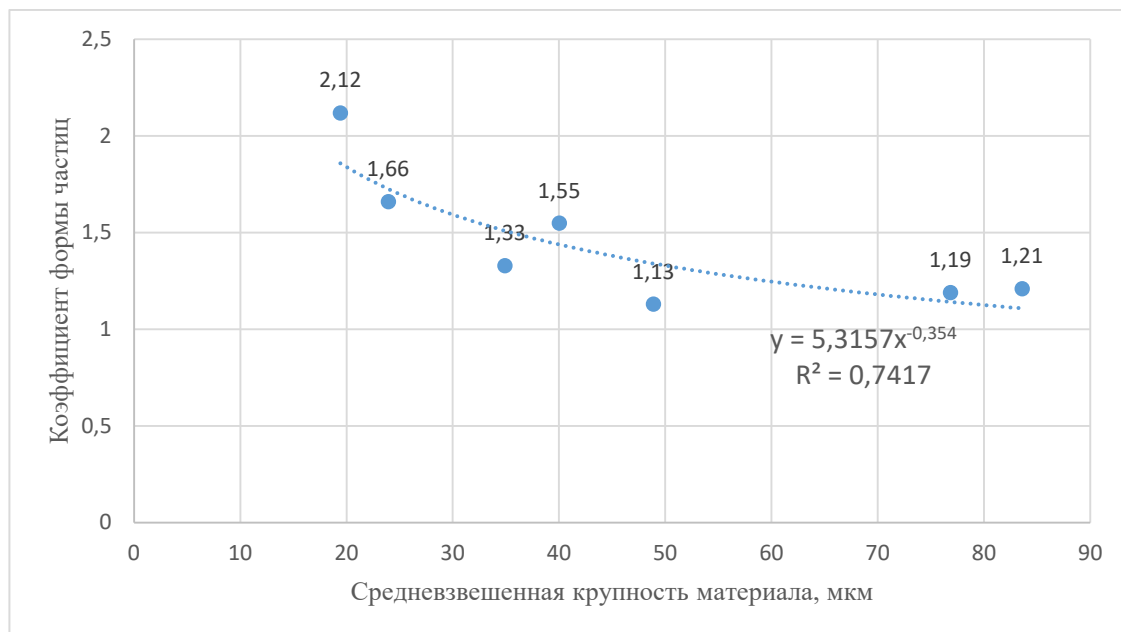


Рисунок 2.17. Зависимость коэффициента формы от средневзвешенного диаметра частиц

На основании вышеизложенного подхода и результатов расчета по предложенной модели, а также в результате анализа источников научно-технической информации можно сделать следующие выводы:

- в случае напорного пневмотранспорта при транспортировании низкоконтентрированных пылевоздушных потоков оптимальные скорости могут варьироваться от 11,0 до 31 м/с;
- в случае напорного пневмотранспорта при транспортировании высококонтентрированных пылевоздушных потоков оптимальные скорости могут варьироваться от 1,0 до 11,0 м/с.

Таблица 2.15 - Исходные данные и результаты расчета критических скоростей по формулам 2.3 и 2.8.

№ п/ п	Транспортиру- емый материал	Примечания	$m, \text{ кг/кг}$	$U_{кр}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$D, \text{ м}$	$d_0 \bullet 10^{-6}, \text{ м}$	$\rho_m, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_b, ^\circ\text{C}$	k_f/k_d	Результаты расчета $U_{кр}, \text{ м/с}$	
											по фор- муле (2.3)	по фор- муле (2.8)
1.	Угольная пыль (березовский уголь)	Красноярская ТЭЦ-2 (пневмотранспорт с подстила- ющим слоем)	70	8,1	0,15	142	2100	100	100	0,92/ 1,2	47,8	5,1
2.	Угольная пыль (экибастузский уголь)	Ермаковская ГРЭС (пневмотранспорт с подстила- ющим слоем)	10	5,8	0,4	143	1904	50	50	0,91/ 1,2	24,9	6,2
3.	Угольная пыль (назаровский уголь)	Назаровская ГРЭС	20	9,4	0,25	142	2100	100	100	0,92/ 1,2	33,0	5,0
4.	Зола эстон- ского сланца	Котел 26, Прибалтийская ГРЭС	9,8	12,4	0,161	62,6	3130	66	66	1,19/ 1,19	21,6	13,1
5.	Зола березов- ского угля	Красноярская ТЭЦ-2 (пневмотранспорт с подстила- ющим слоем)	28,5	11,2	0,148	113	2985	50	50	0,99 /0,98	33,4	11,1
6.	Зола ирша-бо- родинского угля	Молотая, Красноярская ТЭЦ-1	22,6	7,8	0,2	22,8	2940	20	20	1,78/ 1,5	32,9	7,6
7.	Зола экиба- стужского угля	Ермаковская ГРЭС	13,7	5,0	0,249	66	2060	76	76	1,2/ 1,0	26,1	7,2
8.	Среднеарифметическая погрешность расчета, %										31,4	7,9

2.4.1 Рекомендации по эксплуатации существующих систем ГЗУ ТЭС

С целью недопущения переполнения емкостей золошлакоотвалов и повышения срока их заполнения автор предлагает выполнение следующих рекомендаций:

- раздельное удаление, складирование и отгрузка золы и шлака с целью их соответствия требованиям потребителей (рисунок 2.18);
- создание узлов отгрузки шлака потребителям вблизи или на оперативных шлакохранилищах, которые располагаются в пределах промплощадки ТЭС или вне ее, как это представлено на блок-схеме (рисунок 2.18);
- складирование неостребованной части шлака на шлакохранилищах экологически приемлемыми методами;
- размещение установок по обезвоживанию шлака и насосной станции возврата осветленной воды на оперативных шлакохранилищах;
- создание узлов отгрузки гидратированной золы на оперативных золохранилищах, которые располагаются в пределах промплощадки ТЭС или вне ее;
- создание узлов отгрузки сухой золы, в которую зола, отвечающая потребительским свойствам, по пневмопроводам транспортируется из-под бункеров электрофильтров; далее сухая зола отгружается в автомобильный или железнодорожный транспорт (рисунок 2.4);
- в случае невозможности раздельного складирования золы и шлака на золо- и шлакоотвале организовать размещение неостребованной части гидратированной золошлаковой смеси экологически приемлемыми методами;
- создание узлов отгрузки гидратированной золошлаковой смеси на золошлакохранилищах, которые располагаются в пределах промплощадки ТЭС или вне ее;
- создание установок сгущения золовой пульпы с целью снижения водопотребления в системе ЗШУ и затрат электроэнергии на транспортирование пульпы;
- максимальная механизация процессов перемещения и укладки золошлаков в отвал;

- защита пульпопроводов систем гидрозолошлакоудаления ТЭС от абразивного и коррозионного износа;
- недопущение транспортирования золошлаковой пульпы низкой концентрации с целью снижения затрат на собственные нужды ТЭС;
- определение оптимальных параметров скорости транспортирования и концентрации водозоловой пульпы с учетом режимов транспортирования, диаметра трубопроводов систем ЗШУ, характеристик золы, дальности транспортирования и трассы систем ЗШУ.

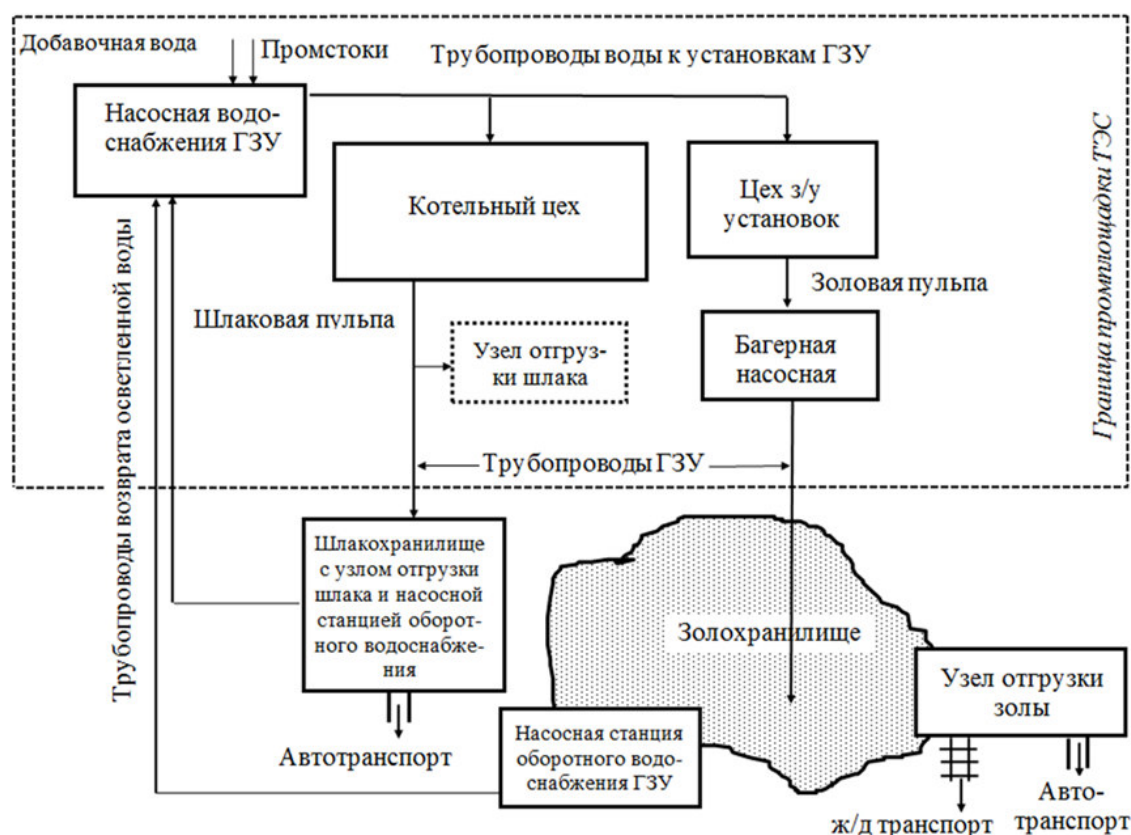


Рисунок 2.18 — Блок-схема системы ГЗУ с разделением удалением, складированием и отгрузкой золы и шлака

2.4.2 Рекомендации по созданию надежных, экономичных и экологических систем обращения с золошлаками ТЭС

Для создания надежных, экономичных и экологических систем обращения с золошлаками ТЭС целесообразно руководствоваться основными методическими

положениями, представленными ниже.

1. Твердотопливные ТЭС производят не только тепловую и электрическую энергию, но и ценное минеральное сырье техногенного происхождения – золу и шлак, которые являются вторичным сырьем.

2. Современные системы ЗШУ должны выполнять следующие задачи:

- транспортировать золу и шлак с помощью «сухих» способов удаления до мест их отгрузки, временного или постоянного хранения;
- надежно удалять золу и шлак во всем диапазоне нагрузок котлов при сжигании углей как проектного, так и ухудшенного качества;
- обеспечивать максимальную отгрузку золошлаков с исходными и измененными свойствами для использования их в качестве заменителей природного сырья при производстве товарной продукции на предприятиях различных отраслей экономики;
- максимальную часть невостробованной золы на золошлакоотвалах следует размещать в виде продукции сезонного или отложенного спроса;
- невостробованную часть золы, которая не имеет характера сезонного или отложенного спроса, необходимо складировать только экологически приемлемыми способами, предпочтительно в виде продукции неглубокой переработки (гравий, щебень и т.п.) с минимальной стоимостью производства;

3. Решения о видах, способах и технологиях размещения невостробованной части золы на золошлакоотвалах необходимо принимать на основе анализа технико-экономических показателей систем ЗШУ в целом в соответствии с [92].

4. Необходимо обеспечить раздельное удаление золы и шлака за исключением тех случаев, когда имеется гарантированный и долгосрочный рынок сбыта всего объема образующейся золошлаковой смеси.

5. Предусмотреть установку устройств для отгрузки разнофракционной золы из бункеров или силосов с целью расширения возможности отгрузки сухой золы существующим и потенциальным потребителям при отличающихся требованиях к качеству поставляемых материалов.

6. Предусмотреть создание производств как по кондиционированию (неглубокой переработке) золы с исходными свойствами, так и по существенному изменению ее свойств (извлечение отдельных фракций, производство промежуточного продукта и т.п.) с целью удовлетворения специальных требований потребителей на поставку золы.
7. С целью повышения надежности систем внутреннего золоудаления внедрять пневмотранспортные установки, обладающие гораздо большей технологической гибкостью по сравнению с системами ГЗУ, имеющие более широкий диапазон регулирования нагрузок по расходу транспортируемой золы и являющиеся существенно более простыми в эксплуатации при изменении режимов работы системы ЗШУ.
8. С целью повышения экономических показателей систем золошлакоудаления постоянно исследовать существующий и потенциальный рынки сбыта золошлаков, а также заниматься их формированием за счет проведения комплекса мероприятий, таких, как:
 - кондиционирование свойств золы;
 - создание производств по выпуску промежуточной или конечной продукции;
 - установление льготных тарифов на все виды используемой энергии потребителям на период освоения технологий производства товарной продукции с применением золошлаков и т.п.
9. Для достижения наилучших эксплуатационных показателей надежности, экономичности и экологичности предпочтение следует отдавать автоматизированным технологическим узлам системы ЗШУ при прочих равных параметрах.
10. Для наилучшего адаптирования систем ЗШУ ТЭС к изменению потребностей рынка сбыта по объемам и качеству золошлаков, ужесточению природоохранного законодательства и условий экономической деятельности в схемах технологических узлов (внутреннего и внешнего транспорта, устройств и установок отгрузки золы и шлака, производств по переработке золошлаков и ЗШХ) должна быть заложена возможность их изменения с минимальными затратами.

Пример перспективной схемы системы ЗШУ ТЭС с возможностью максимальной отгрузки золошлаков представлена на рисунке 2.19.

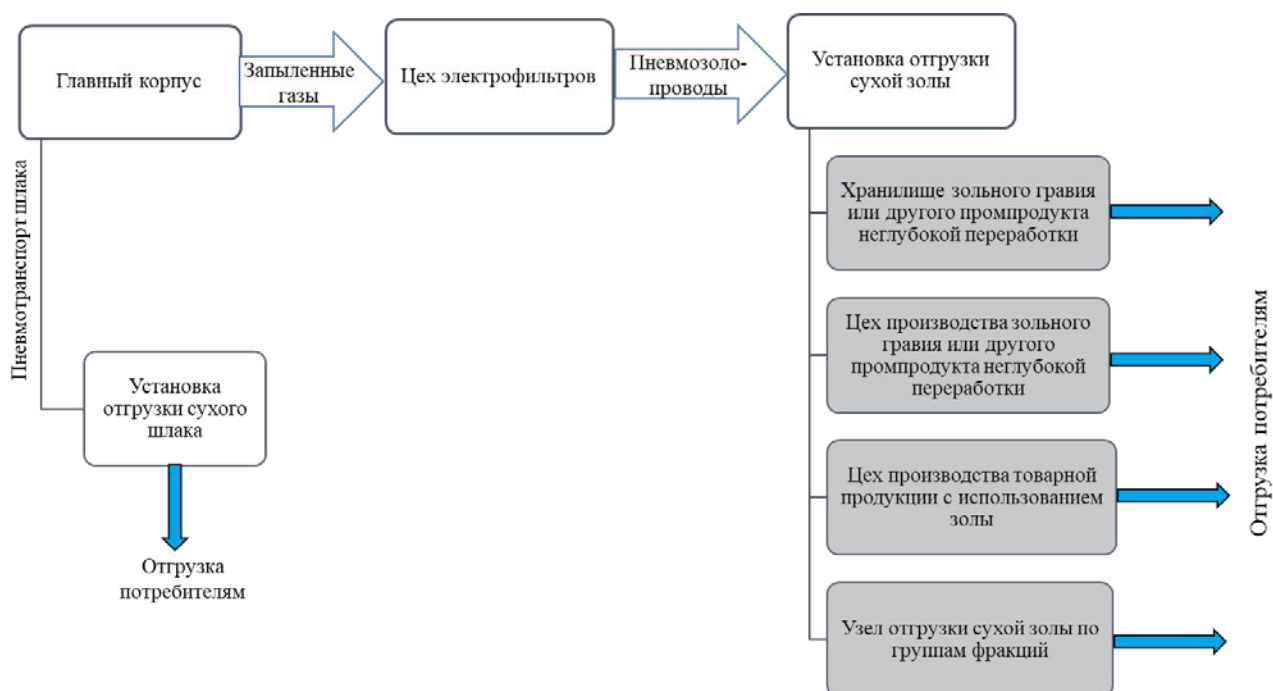


Рисунок 2.19 — Блок-схема перспективной «безводной» системы ЗШУ ТЭС со 100%-ной отгрузкой золы и шлака

Потребителями продукции из золошлаков будут, прежде всего, предприятия строительного комплекса, которые в соответствии с требованиями нормативных документов ГОСТ 25818-2017, ГОСТ 379-2015, ГОСТ 31108-2020, ГОСТ 28013-98, ГОСТ Р 56592-2015, ГОСТ 33928-2016 будут использовать сухую золу для следующих целей:

- активные минеральные добавки для производства портландцементов;
- активные минеральные добавки и наполнители для производства тяжелых,
- легких, ячеистых, жаростойких бетонов и строительных растворов;
- активные минеральные добавки и наполнители для сухих строительных смесей на цементной основе;
- активные минеральные добавки для производства силикатного кирпича;
- отощающие добавки для керамических изделий.

Таким образом, для успешного решения проблемы утилизации золошлаков и

нанесения минимального экологического ущерба окружающей среде необходимо при создании, модернизации и реконструкции систем ЗШУ ТЭС, прежде всего, соблюдать следующие основные принципы:

- применение наилучших доступных технологий в области обращения с золошлаками ТЭС;
- внедрение безводных технологий удаления золы и шлака;
- использование котлов с твердым шлакоудалением;
- раздельная эвакуация шлака из-под котлов и золы из-под бункеров золоуловителей;
- технологическая возможность 100 %-ного сбора и отгрузки потребителям сухой золы текущего выхода;
- отбор и отгрузка потребителям сухой золы по группам фракции;
- экологически приемлемые способы размещения не востребованной части сухой золы и шлака в виде продукции неглубокой переработки или продуктов отложенного спроса (безобжиговый зольный гравий, аглопоритовый гравий и др.):
- минимальные издержки или максимальная прибыль по системе ЗШУ в целом;
- возможность дальнейшего технического совершенствования оборудования и схемных решений отдельных узлов, установок и системы ЗШУ в целом;
- максимальная механизация и автоматизация технологических процессов, исключение неоправданного применения ручного труда.

Выводы по главе 2

Разработаны рекомендации по эксплуатации существующих систем гидрозолоудаления ТЭС, созданию новых безводных систем ЗШУ.

Показано, что применение систем пневмотранспорта, способствующих увеличению объемов использования золошлаков в экономике России, позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию золошлакоотвалов, и обеспечивает экономические преимущества безводных систем по сравнению с традиционными

системами гидрозолоудаления. Так, затраты на сооружение систем гидрозолоудаления, включая гидрозолошлакоотвалы, достигают 12...17 % стоимости ТЭС, а затраты на их эксплуатацию — 7...10% общих эксплуатационных затрат ТЭС. При этом, стоимость сооружения непосредственно гидрозолошлакоотвала составляет 60...70% общей стоимости системы ГЗУ. Эксплуатационные расходы систем ГЗУ, как минимум, в 2 раза больше, чем систем ПЗУ.

В результате оценки технических и финансовых показателей существующей системы ЗШУ ТЭЦ-22 выявлено, что концентрация пульпы в системе составляла 1:2 – 1:50, что подтвердило неэкономичность систем ГЗУ и привело к повышению эксплуатационных расходов. В результате оценки эксплуатационных издержек на обращение с 1 тонной золошлаков в системе ЗШУ ТЭЦ-22 определено, что при реконструкции системы ЗШУ ТЭЦ-22 с переходом на «сухие» технологии удаления золы и шлака эксплуатационные издержки снизятся в 2,8 раза по сравнению с существующей системой гидрозолоудаления. При анализе показателей существовавшей системы ГЗУ Черепетской ГРЭС выявлено, что удельные эксплуатационные издержки на обращение с золошлаками при ГЗУ в 4,2 раза больше, чем при внедрении перспективной безводной системы ЗШУ со 100 % продаж побочных продуктов. При 100 % складировании золошлаков на отвале при реализации перспективной схемы ЗШУ удельные эксплуатационные издержки в 2,4 раза ниже, чем при эксплуатации системы ГЗУ Черепетской ГРЭС. В результате расчета показателей системы ЗШУ Рефтинской ГРЭС установлено, что инвестиции при расширении существовавшей системы ГЗУ – в 2 раза больше, чем при реконструкции системы с внедрением безводных технологий ЗШУ. Срок заполнения золошлакоотвала составил в 1,8 больше в случае перехода на технологию «сухой» отвал, чем при расширении системы ГЗУ.

Общей проблемой при транспортировании абразивных видов золы является образование свищей в трубопроводах систем ЗШУ ТЭС. Предлагается транспортировать золошлаки при оптимальных режимах (оптимальной скорости потока и концентрации транспортируемого материала в несущей среде). В случае гидротранспорта рекомендуется транспортировать пульпу при массовых концентрациях 5...20

% при скоростях 1,2...1,4 м/с для золы и 1,7...2,3 м/с для шлаковой пыли.

При эксплуатации систем пневмотранспорта низкоконтрированных пылевоздушных потоков транспортные скорости варьируются от 16,3 до 40,6 м/с, и являются завышенными по сравнению с оптимальными, что приводит к повышенному абразивному износу трубопроводов систем ЗШУ ТЭС.

В пневмотранспортных системах предложено оптимальную скорость транспортирования золовоздушной смеси определять через критическую скорость воздуха с учетом коэффициента надежности. С этой целью автором разработана зависимость для расчета критических скоростей пылегазовых потоков для различных условий пневмотранспортирования, учитывающая критерий аэродинамической легкости, коэффициенты формы и полидисперсности частиц, на основании которой можно рассчитывать оптимальную скорость транспортирования абразивных материалов. Разработанная зависимость имеет удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований (7,9 %). При этом, на основании известных данных экспериментальных исследований характеристик пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов автором разработана зависимость формы частиц от средневзвешенной крупности материала, которой также рекомендуется пользоваться для определения коэффициента формы абразивных материалов в случае, если не известны размеры частиц в пробе.

В результате расчета по предложенной модели, а также в результате анализа источников научно-технической информации сделан вывод о том, что:

- в случае напорного пневмотранспорта при транспортировании низкоконтрированных пылевоздушных потоков оптимальные скорости могут варьироваться от 11,0 до 31 м/с;
- в случае напорного пневмотранспорта при транспортировании высококонтрированных пылевоздушных потоков оптимальные скорости могут варьироваться от 1,0 до 11,0 м/с.

Глава 3 Экспериментальные исследования надежности пневмотранспортных систем и разработка математического аппарата для расчета абразивного износа трубопроводов систем ЗШУ ТЭС

Существенным недостатком систем пневмо- и гидротранспорта золошлаков является повышенный абразивный износ золошлакопроводов, от которого, в значительной степени, зависит период их надёжной эксплуатации.

Абразивный износ трубопроводов является следствием взаимодействия частиц транспортируемого материала со стенкой трубы, в результате которого срезаются микроскопические стружки металла трубопровода. В общем виде, абразивный износ трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС зависит от свойств золы, материала труб и условий/режимов транспортирования. На абразивные свойства транспортируемой золы влияют: форма частиц, плотность и крупность материала, полидисперсность (фракционный состав) потока, а также химико-минералогический состав. Наиболее важными факторами, характеризующими условия и режимы транспортирования, являются скорость движения пылевоздушной смеси или золошлаковой пульпы, концентрация транспортируемого материала в потоке воздуха или воды, угол атаки (угол между направлением движения частиц материала и стенкой трубопровода), поэтому для снижения интенсивности износа трубопроводов и продления срока их службы необходимо выбирать оптимальные режимы транспортирования с точки зрения скорости перемещения материала и концентрации транспортируемого материала в несущем потоке.

В диссертационной работе рассмотрены режимы транспортирования золошлаков под напором воздуха, поскольку в этом случае трубопроводы изнашиваются значительно быстрее чем при гидротранспорте, при этом, выбор оптимальных режимов является очень важным с точки зрения обеспечения надежности транспортирования с целью недопущения образования свищей, связанных с риском выбросов золы в атмосферу.

Существенное влияние на абразивный износ золошлакопроводов систем

ЗШУ оказывают прочностные характеристики материалов и внутренний диаметр трубопровода.

В рассматриваемой главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований различных проб абразивных материалов с точки зрения формы частиц, фракционного состава, полидисперсности, которые учтены при уточнении зависимости для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС, разработанной при участии автора ранее. Разработана формула для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с учетом формы частиц, полидисперсности материала, угла атаки, радиуса поворота потока, диаметра трубы. Произведена оценка соответствия обеих зависимостей данным натурных экспериментов и выполнено сравнение качества предложенных зависимостей с формулами, разработанными ранее. Выполнена оценка погрешности основных факторов, влияющих на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов.

Повышенный абразивный износ по сравнению с другими элементами установок систем ЗШУ ТЭС наблюдается в криволинейных участках трубопроводов, а именно в тех местах, где ось транспортируемого потока направлена под углом к поверхности трубопроводов. К таким элементам относятся: запорно-регулирующая арматура, колена поворотов трубопроводов, тройники, переходы, переключатели потоков. Прямолинейные участки трубопроводов подвержены абразивному износу существенно меньше [120].

В результате исследований установлено, что наиболее интенсивно процесс износа происходит в зоне внешней образующей колена поворота трубопровода при угле атаки потока к поверхности колена $\alpha = 10 \dots 45^\circ$. При этом максимальный износ наблюдается в зоне внешней образующей колена поворота трубопровода при $\alpha = 25 \dots 28^\circ$, а градусная мера дуги области интенсивного абразивного износа в поперечном сечении колена составляет примерно $70 \dots 80^\circ$ (рисунок 3.1).

В области внутренней образующей колена абразивный износ существенно меньше. Примерно такая же картина абразивного износа наблюдается и на наклонных участках транспортных трубопроводов. Эта особенность абразивного

износа горизонтальных и наклонных участков трубопроводов учитывается в практической деятельности при разработке мероприятий для продления срока их эксплуатации – проворот прямолинейных участков пульпопроводов вокруг своей оси.

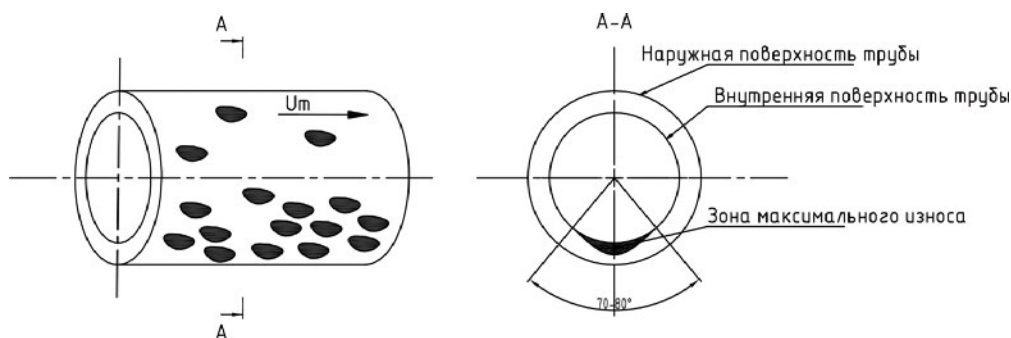


Рисунок 3.1 - Зона максимального износа трубопровода

Наиболее существенный износ криволинейных участков, особенно колен поворотов трубопроводов, по сравнению с прямолинейными обусловлено тем, что частицы транспортируемого материала, приближаясь к колену трубопровода со скоростью, близкой к скорости воздуха, сталкиваются с наружной стенкой трубы вследствие инерции движения. Траектория их движения параллельна оси трубопровода. Крупные и средние частицы выпадают из потока воздуха, а мелкие размером в несколько микрон далее движутся в воздушном потоке в место их столкновения со стенкой трубопровода. На рисунке 3.2 изображена схема движения частиц в колене трубопровода без учета их взаимодействия.

Из-за износа труб снижается надёжность, возникает необходимость вынужденных простоев, вызванных свищами в трубопроводах, в результате чего происходит выброс или сброс транспортируемого материала в окружающую среду, что приводит к ухудшению экологической обстановки в зоне образования свища; также ухудшается экономическая эффективность транспортирования материалов, связанная с увеличением диаметра труб вследствие утонения толщины стенок трубопроводов [10]. Поскольку на большинстве угольных ТЭС системы

ГЗУ эксплуатируются не менее 45-50 лет, нанося значительный ущерб окружающей природной среде, то изношенное оборудование, включая золошлакопроводы, требует замены и применения специальных защитных противоабразивных мероприятий.

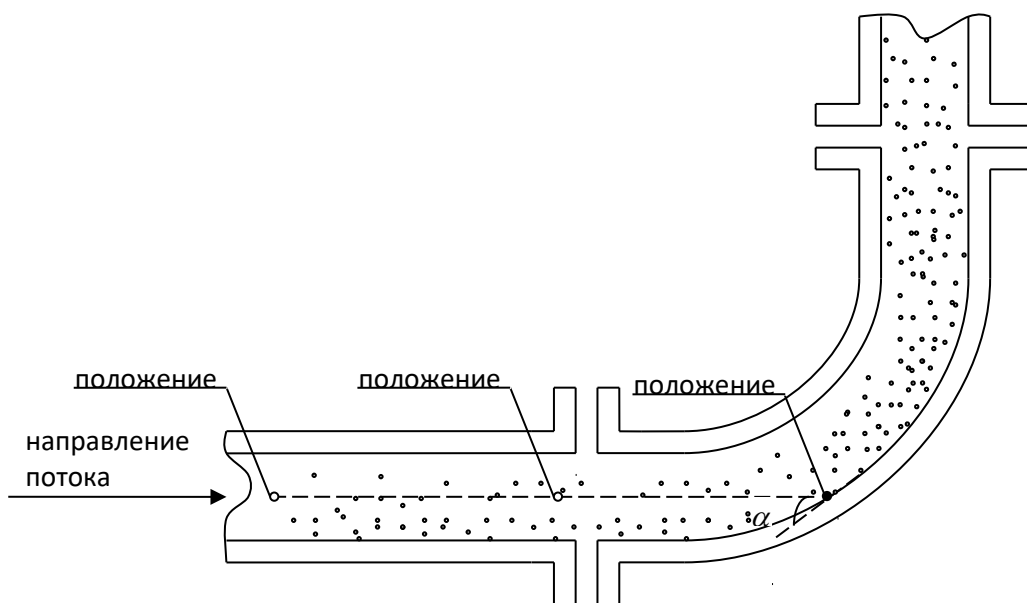


Рисунок 3.2 - Схема движения частиц в колене трубопровода

Для планирования противоабразивных мероприятий и своевременной замены труб необходимо рассчитать срок их службы, который оценивается по основному критерию – абразивному износу горизонтальных, вертикальных, наклонных и фасонных участков трубопроводов пневмотранспортных установок. Существующие зависимости для расчета абразивного износа трубопроводов разработаны на основе экспериментальных исследований параметров пневмотранспортных установок для частных случаев: или в их состав входит большое количество эмпирических коэффициентов, или они не учитывают все значимые факторы, влияющие на абразивный износ, что не позволяет их применять для расчета абразивного износа трубопроводов во всем диапазоне изменения основных факторов. В связи с изложенным, необходима разработка адекватных зависимостей для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных

участков трубопроводов, учитывающих влияние всех основных значимых факторов.

3.1 Характеристики режимов пневмотранспортирования золошлаков ТЭС

Согласно процессам, происходящим в трубопроводах пневмотранспортных установок, можно выделить две основных группы режимов пневмотранспорта: режимы летучей транспортировки и режимы транспортирования в псевдоожиженном слое. В псевдоожиженном слое транспорт сыпучих материалов осуществляется с использованием аэрожелобов, поэтому такой режим здесь не рассматривается. Основная группа исследуемых режимов - режимы летучей транспортировки золошлаков. В таблице 3.1 представлена информация об основных исследуемых режимах и их характеристиках согласно [121].

Таблица 3.1 – Характеристики режимов пневмотранспорта

Режим транспортирования	Характеристики режима	Недостатки
Пневмотранспорт низкоконцентрированных пылевоздушных потоков	- высокие транспортные скорости – от 16,3 до 40,6 м/с - избыточное рабочее давление - от 34,5 до 82,7 кПа и разрежение - от 13,55 кПа до 40,64 кПа. - низкая массовая концентрация ($>0,5$)	- рост энергозатрат, - повышенный абразивный износ трубопроводов, - деградация транспортируемых хрупких материалов, - относительно малая дальность транспортирования
Пневмотранспорт высококонцентрированных пылевоздушных потоков	- низкие транспортные скорости – от 1,0 до 10,0 м/с	- подходит для хрупких материалов - отсутствует повышенный абразивный износ материала трубы

В таблице 3.2 приведены основные факторы, оказывающие влияние на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов, и диапазоны изменения их количественных показателей.

Таблица 3.2 - Основные факторы, влияющие на абразивный износ, и диапазоны изменения их количественных показателей

№	Наименование фактора	Обозначение фактора	Исследованный диапазон изменения фактора	Вид зависимости абразивного износа от фактора	Количественные показатели зависимости абразивного износа от фактора
1.	Скорость частиц транспортируемого материала	U_m	0,25...120 м/с	U_m^n	$n = 1,4...6$
2.	Массовая расходная концентрация	m	0,02...1500 кг/кг	m^n	$n = -0,6...1,0$
3.	Коэффициент абразивности материала	f_a	Численные данные отсутствуют	f_a	$n=1,0$
4.	Диаметр частиц материала	d	23...1000 мкм	d^n	$n = 1,0...3,0$
5.	Внутренний диаметр трубопровода	D	13...500 мм	D^n	$n = -2,0$
6.	Угол атаки частиц	α	0...90°	$\alpha, \sin \alpha, \cos \alpha$	$\alpha_{max} = 10...45^\circ, \alpha_0 < 15^\circ$
7.	Коэффициент формы частиц	k_f	Численные данные отсутствуют	k_f	$n=1,0$
8.	Коэффициент полидисперсности частиц	k_d	0,8...1,4, отсутствуют данные по его определению	k_d	$n=-1,0$
9.	Твердость материала трубы по Виккерсу	HV	30...500	HV^n	$n = -0,4$
10.	Коэффициент относительной износостойкости материала трубопровода	$k_{изн}$	3,1	$k_{изн}$	$n = -1,0$
11.	Температура	T	Для пневмотранспорта угольной пыли и золы в условиях ТЭС на изменение абразивности не влияет, так как температура транспортируемого материала и оборудования меняется в незначительных пределах, а влияние величины температуры на абразивные свойства материала учитываются в коэффициенте абразивности		

3.2 Исследование характеристик различных видов золы, влияющих на их абразивные свойства

Наиболее выраженными абразивными свойствами обладают кремниевые (кислые) золы, имеющие в своем составе высокое содержание кислотных оксидов. В них, как правило, отмечается менее 10% оксидов кальция при наличии

кислотных оксидов более 70...80%. В случаях с экибастузской золой и золой подмосковных углей содержание кислотных оксидов может достигать 85...95%. К абразивным золам относятся также зола кузнецкого угля, зола антрацитов, донецких, карагандинских углей. Зола углей Канско-Ачинского бассейна является основной; по составу резко отличается от золы рассмотренных видов топлива. Содержание оксидов кальция в ней колеблется от 20 до 45%, а в золе березовского угля достигает 60%. Также к основным золам относятся золы назаровского, ирша-бородинского углей, эстонского сланца. Такие виды золы являются менее абразивными по своим свойствам [122].

Содержание SiO_2 для некоторых видов золы представлено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Содержание SiO_2 в золе сланца и углей.

№п/п	Название материала	% SiO_2
1	Зола эстонского сланца	23,6...28,0
2	Зола березовского угля	26,1
3	Зола ирша-бородинского угля	45,0
4	Зола экибастузского угля	62,0

Кроме содержания оксидов кремния в транспортируемом материале на их абразивные свойства существенное влияние оказывает полидисперсность материалов. Для определения относительного содержания оксидов кремния необходимо определить отношение процентного содержания SiO_2 в транспортируемом материале к содержанию SiO_2 в кварцевом песке. Что касается коэффициента полидисперсности материала, то в научно-технических источниках отсутствуют формулы для его определения, есть лишь некоторые результаты экспериментальных исследований [123].

Относительно формы частиц мелкодисперсных сыпучих кремнийсодержащих материалов: в научно-технических источниках отсутствуют как формулы,

так и методика определения коэффициента формы в пробе. Разные авторы представляют различные величины коэффициентов формы сыпучих абразивных материалов, которые не коррелируются между собой.

Необходимо отметить, что вышеперечисленные параметры оказывают влияние на абразивный износ трубопроводов систем ЗШУ, и их необходимо учитывать для разработки адекватной зависимости для расчета абразивного износа трубопроводов систем ЗШУ ТЭС. Кроме того, однородность состава мелкодисперсных сыпучих материалов и форма частиц влияют на направления применения побочных продуктов сжигания угля, что особенно касается высокотехнологичных проектов.

В связи с изложенным, автором были разработаны формулы для определения коэффициентов формы и полидисперсности материалов на основании проведенных экспериментальных исследований крупности, фракционного состава, формы, удельной поверхности частиц следующих проб:

1. Зола ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»;
2. Зола эстонского сланца электрофильтровая;
3. Зола эстонского сланца циклонная;
4. Зола Хабаровской ТЭЦ-3;
5. Зола Приморской ГРЭС;
6. Чистый кремний;
7. Микросфера алюмосиликатная.

Кроме того, были проведены микрофотографические исследования проб золы и кремния для оценки структуры и формы частиц. Фотографии внешнего вида проб и их некоторые характеристики представлены в таблице 3.4.

Микрофотографии проб золы были выполнены с использованием электронного микроскопа высокого разрешения Tescan Mira LMU+ энергодисперсионный рентгеновский детектор Osfor inst. INCA X-MAX 50. Измерения проб №№1-7 проводились с помощью анализатора IPS фирмы Kamika Instruments, который является оптико-электронным измерительным устройством и работает по методу „Elsieve”. Анализатор позволяет проводить исследования фракционного

состава мелкодисперсных сыпучих материалов размерами от 0,5 мкм до 2 мм с определением коэффициента формы частиц.

Внешний вид двухмерного анализатора фракционного состава частиц представлен на рисунке 3.3.

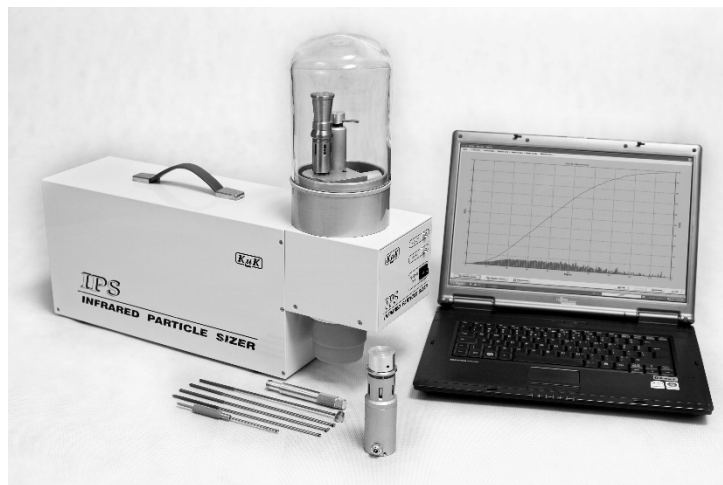


Рисунок 3.3 — Анализатор IPS UA

Более подробная информация об анализаторе и методе измерения представлена в [124, 125].

Анализатор, использовавшийся в исследованиях, позволяет проводить измерения двух размеров частиц - максимального и минимального, что позволяет определять не только диаметр частиц, но и коэффициент формы частиц как по группам фракций, так и усредненную величину коэффициента формы частиц всей пробы.

Вид исследуемых проб и некоторые их характеристики представлены в таблице 3.4. Основные результаты исследований диаметров и формы частиц проб №№1 - 7 приведены в таблицах 3.4 - 3.10 и на рисунках 3.4 - 3.27. При этом агрегатная плотность материала была взята по результатам исследований химического состава проб. Исследования фракционного состава материала производились с использованием ситового анализа при сферической калибровке сит.

Таблица 3.4 - Вид исследуемых проб и их некоторые характеристики

№ пробы	Материал	Вид пробы	Характеристики пробы	Примечание
1.	Зола ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»		Зола кузнецкого тощего угля. Место отбора пробы: 3 карта гидрозолошлакоотвала ТЭЦ-22, край намыва. Истинная плотность материала – 2300 кг/м ³	Внешний вид: сухая зола светло-серого цвета, с включением небольшого количества крупных зерен.
2.	Зола эстонского сланца АО «Ээсти Энергия Нарвские Электростанции» электрофильтровая		Сланцевая зола из-под электрофильтра торговой марки «Zolest-bet» Истинная плотность материала – 3000 кг/м ³	Внешний вид: сухая зола светло-желтого цвета, однородной структуры
3.	Зола эстонского сланца АО «Ээсти Энергия Нарвские Электростанции» циклонная		Циклонная сланцевая зола торговой марки «Zolest-oil»	
4.	Зола Хабаровской ТЭЦ-3		Место отбора пробы: гидрозолошлакоотвал Хабаровской ТЭЦ-3. Истинная плотность материала – 1820 кг/м ³	Внешний вид: сухая зола серого цвета, с включением некоторого количества недожога

Продолжение таблицы 3.4

5.	Зола Приморской ГРЭС		Зола из гидрозолоотвала Приморской ГРЭС. Истинная плотность материала – 2500 кг/м^3	Внешний вид: сухая зола светло-серого цвета
6.	Чистый кремний		Истинная плотность материала – 2330 кг/м^3	Внешний вид: порошок темно-серого цвета, с включением крупных зерен.
7.	Микросфера алюмосиликатная		Алюмосиликатная зольная микросфера – продукт получен из золы Беловской ГРЭС. Истинная плотность материала - 650 кг/м^3	Внешний вид: порошок се- рого цвета, содержит не- большое количество недо- жога

1. Зола кузнецкого тощего угля

Микрофотографии пробы золы кузнецкого тощего угля приведена на рисунках 3.4 и 3.5 при разном увеличении микроскопа.

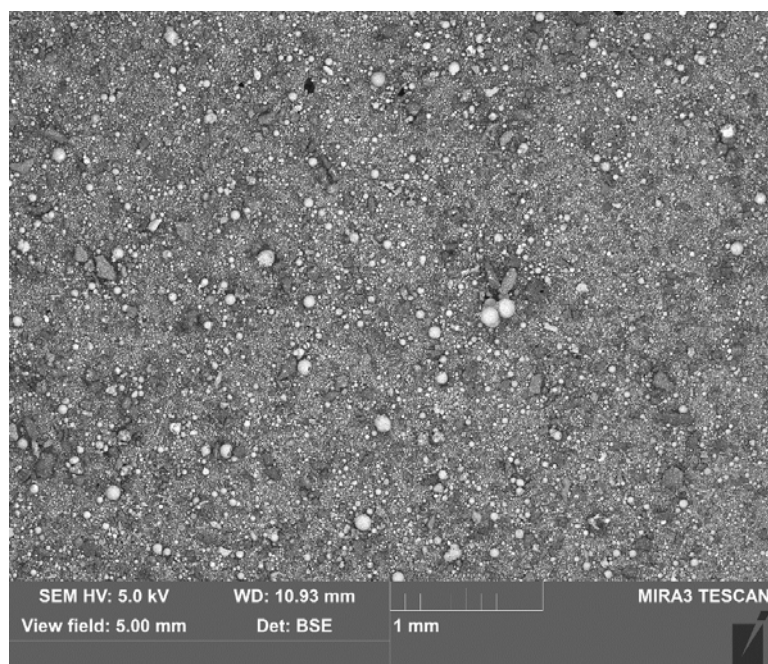


Рисунок 3.4 — Микрофотография пробы золы ТЭЦ-22 в диапазоне 5 мм

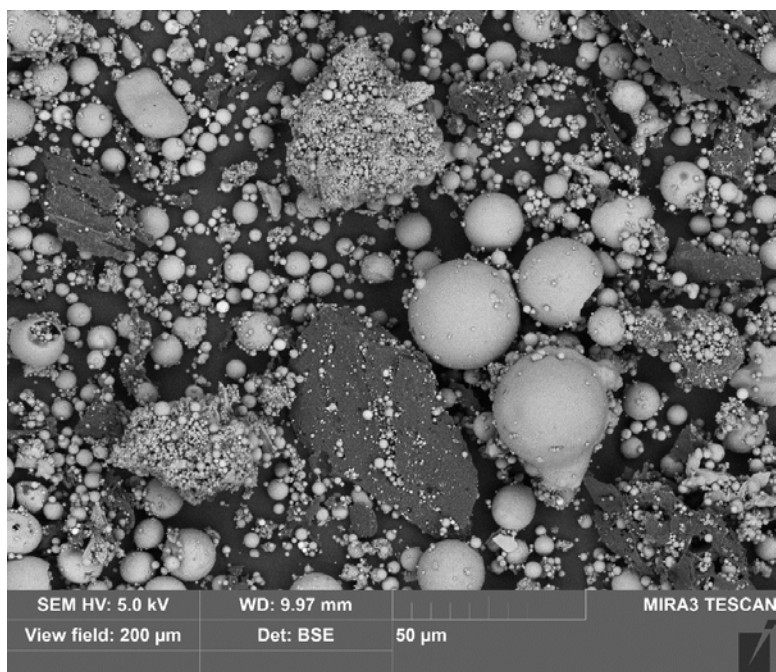


Рисунок 3.5 — Микрофотография пробы золы ТЭЦ-22 в диапазоне 200 мкм

Время исследований: 600 сек.

Число исследованных частиц: 1129087.

Минимальный размер частиц: 1,1 мкм.

Максимальный размер частиц: 93,0 мкм.

Медианный диаметр: 40,9 мкм.

Удельная поверхность: 1894 см²/г.

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом B_v от размера частиц D_i представлена на рисунке 3.6. Фракционный состав золы представлен в таблице 3.5.

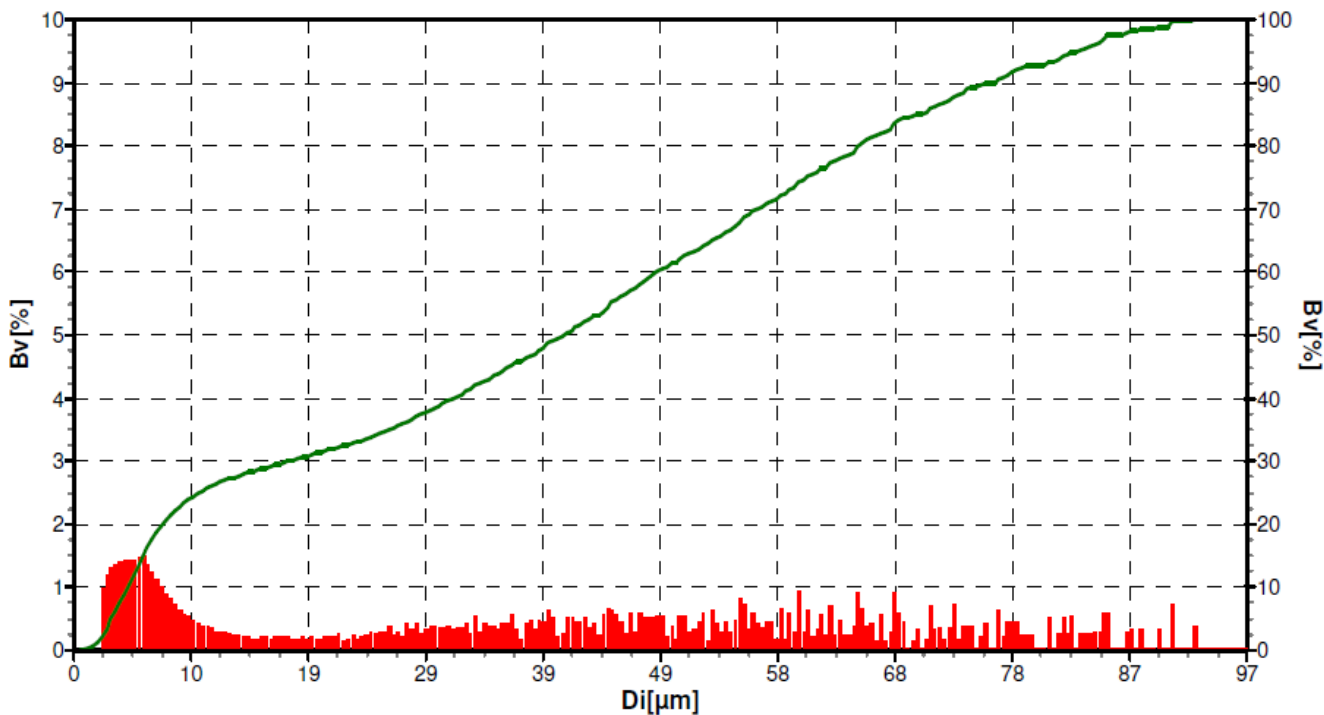


Рисунок 3.6 — Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от размера частиц в пробе золы ТЭЦ-22

Таблица 3.5 - Фракционный состав пробы № 1 золы ТЭЦ-22

Номер сита	1	2	3	4	5	6
Размер ячейки сита, мкм	120,00	90,00	60,00	30,00	10,00	Дно
B_v , %	0,00	1,14	26,38	61,65	75,69	100,00
Коэффициент формы	-	-	1,185	1,284	1,761	2,262

На основании результатов ситового анализа определяется средневзвешенный диаметр частиц в пробе №1, который составляет $d_{\text{ср.вз}} = 40,022$ мкм.

Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц приведена на рисунке 3.7.

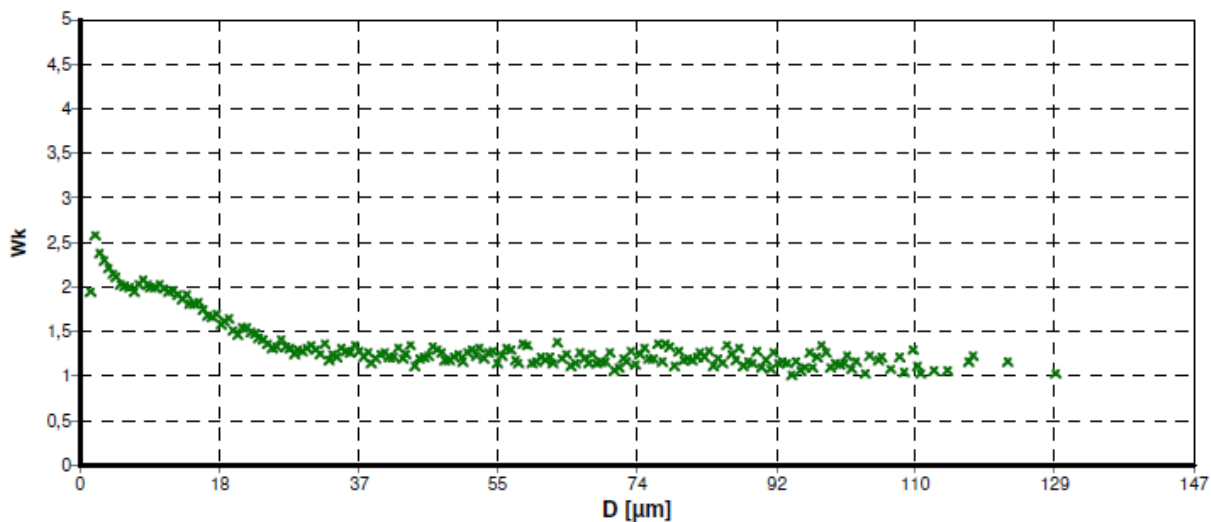


Рисунок 3.7 - Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц в пробе 1

2. Зола эстонского сланца электрофильтровая

Микрофотографии пробы эстонского сланца приведена на рисунках 3.8 и 3.9 при разном увеличении микроскопа.

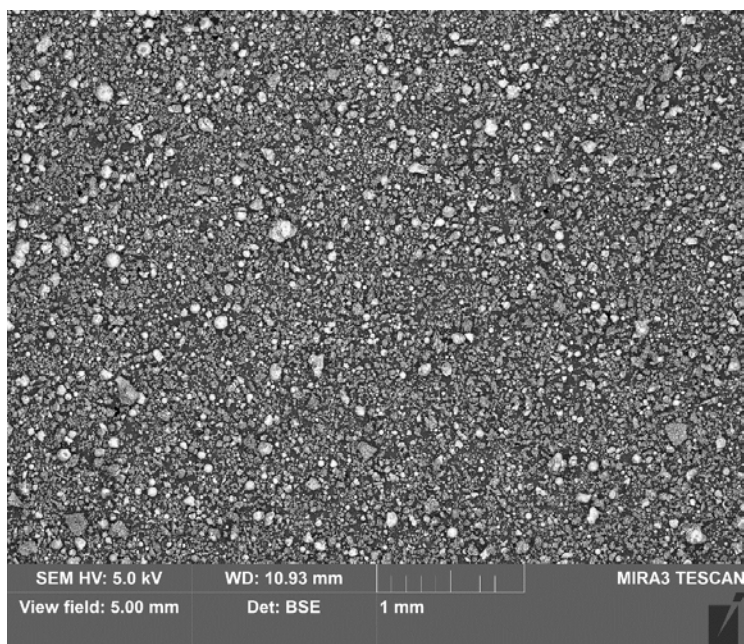


Рисунок 3.8 — Микрофотография пробы эстонского сланца в диапазоне 5 мм

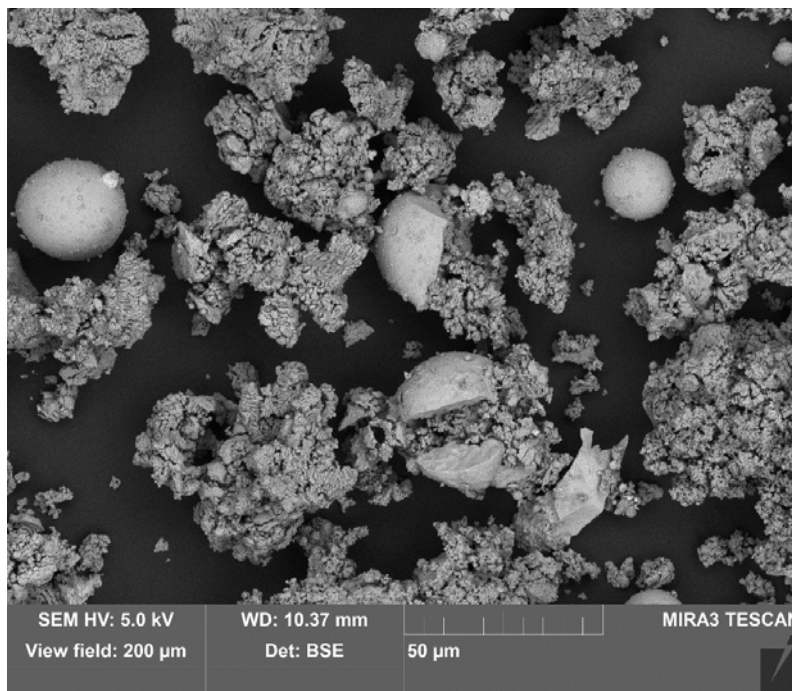


Рисунок 3.9 — Микрофотография пробы эстонского сланца в диапазоне 200 мкм

Время исследований: 300 сек.

Число исследованных частиц: 788306.

Минимальный размер частиц: 1,7 мкм.

Максимальный размер частиц: 121,7 мкм.

Медианный диаметр: 5,7 мкм.

Удельная поверхность: 2926 см²/г.

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом V_v от размера частиц D_i представлена на рисунке 3.10. Фракционный состав золы представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Фракционный состав пробы № 2 золы эстонского сланца

Номер сита	1	2	3	4	5	6	7
Размер ячейки сита, мкм	150,00	120,00	90,00	60,00	30,00	10,00	Дно
V_v , %	0	1,55	9,28	17,90	23,26	29,89	100,00
Коэффициент формы	-	-	-	1,205	1,377	2,041	1,923

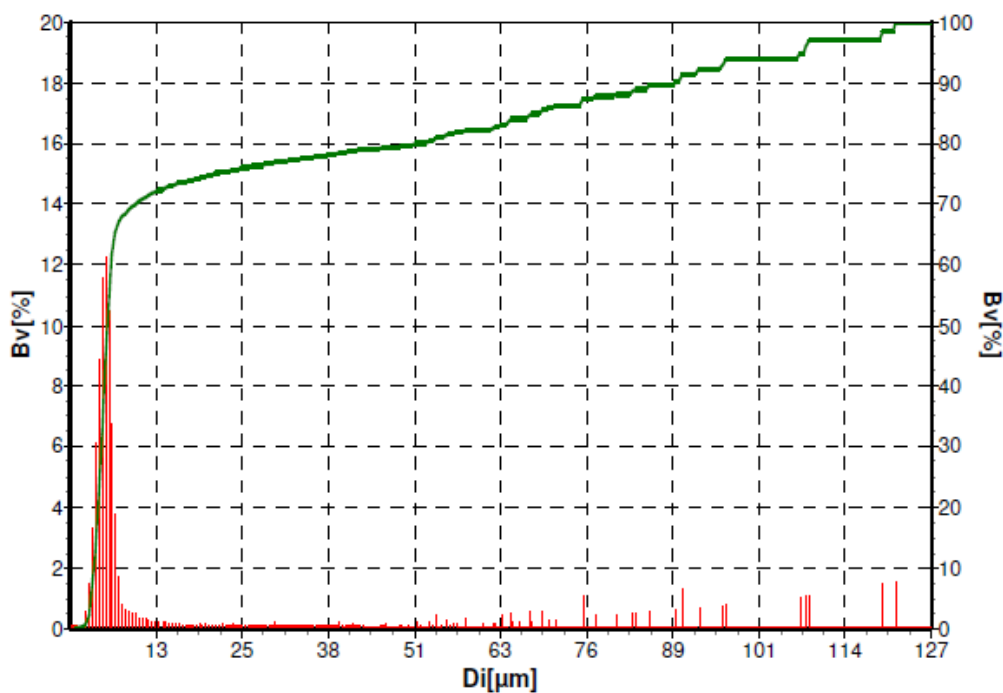


Рисунок 3.10 — Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от их размера в пробе №2

На основании результатов ситового анализа определяется средневзвешенный диаметр частиц в пробе №2, который составляет $d_{\text{ср.вз}} = 23,918$ мкм. Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц приведена на рисунке 3.11.

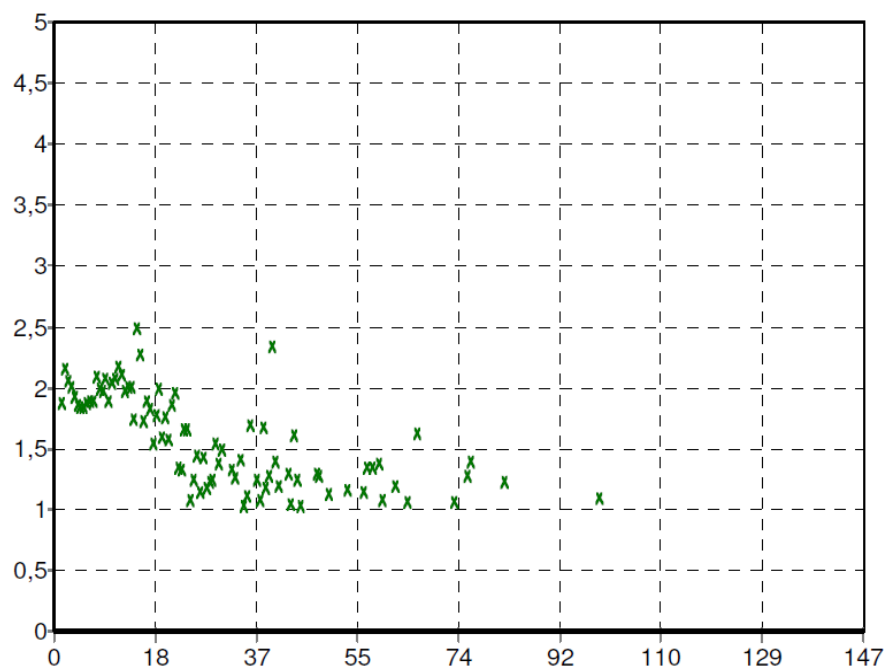


Рисунок 3.11 — Зависимость коэффициента формы частиц от их диаметра

3. Зола эстонского сланца циклонная

Основные результаты исследований диаметров и формы частиц пробы сланцевой золы циклонной приведены ниже. При этом агрегатная плотность материала составила 2,55 кг/м³.

Время исследований: 267 сек.

Число исследованных частиц: 222689.

Минимальный размер частиц: 5,6 мкм.

Максимальный размер частиц: 242,2 мкм.

Удельная поверхность: 973 см²/г.

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом B_v от размера частиц D_i представлена на рисунке 3.12. Фракционный состав золы представлен в таблице 3.7. Зависимость формы частиц от их диаметра приведена на рисунке 3.13.

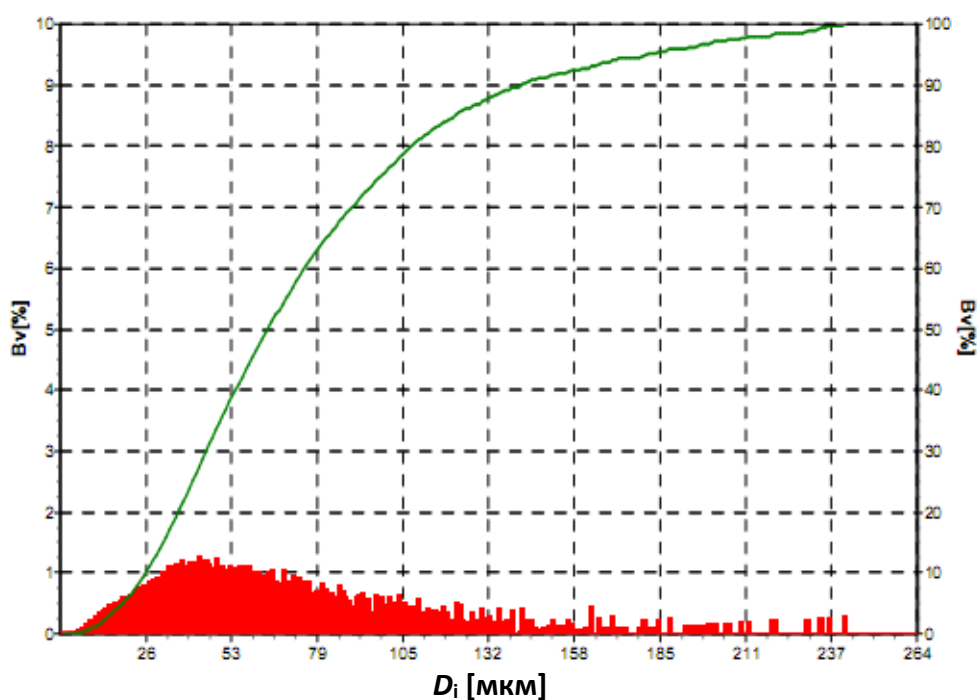


Рисунок 3.12 - Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от их размера

Таблица 3.7 - Фракционный состав пробы сланцевой золы циклонной.

Номер сита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Размер ячейки, мкм	200,0	160,0	120,0	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	Дно
B_v , %	3,21	7,50	15,63	36,72	44,87	54,27	64,77	76,31	87,06	94,70	99,14	100,00
коэф.формы	1,321	1,250	1,151	1,096	1,092	1,098	1,131	1,172	1,230	1,297	1,488	2,755

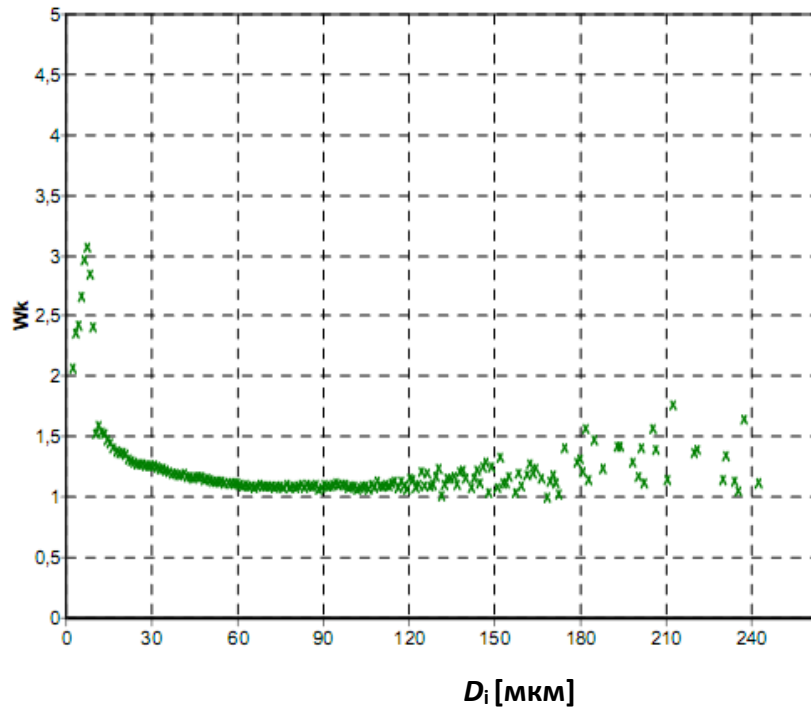


Рисунок 3.13 - Зависимость коэффициента формы частиц от их диаметра

4. Зола Хабаровской ТЭЦ-3

Микрофотографии пробы золы Хабаровской ТЭЦ-3 в разных диапазонах исследования приведены на рисунках 3.14 и 3.15.

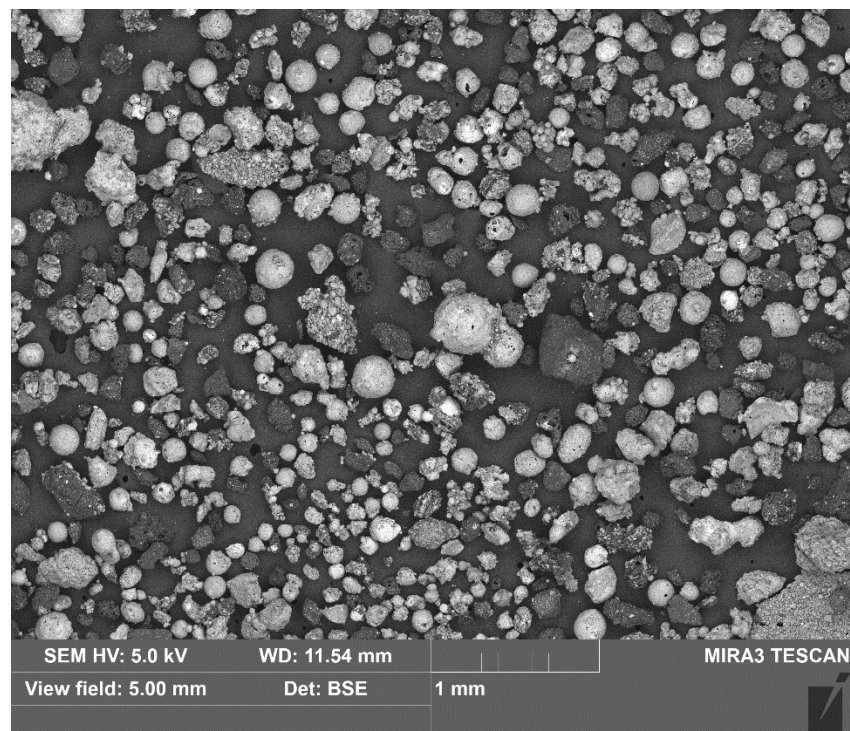


Рисунок 3.14 - Фотография пробы золы Хабаровской ТЭЦ-3 в диапазоне 5 мм

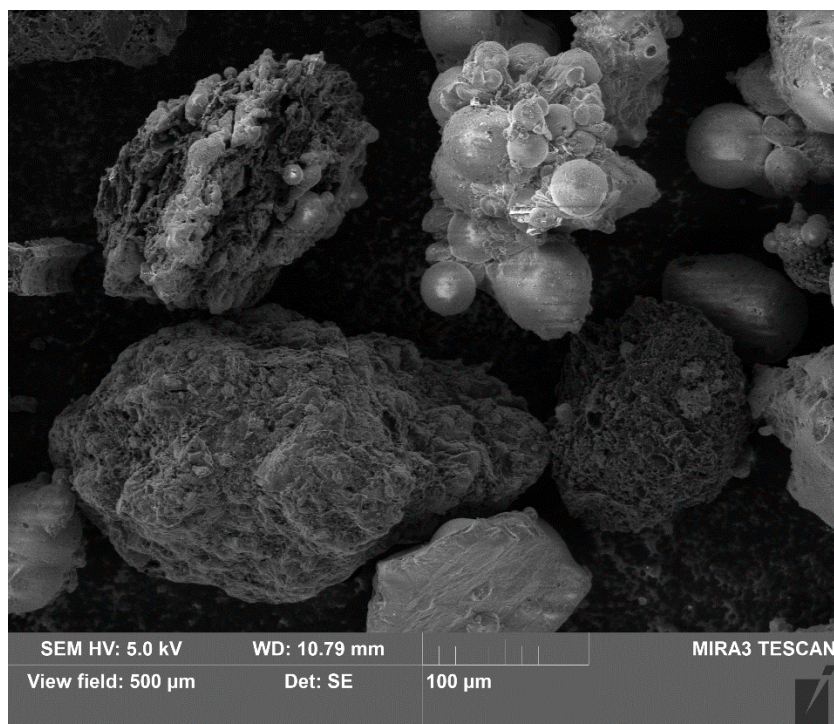


Рисунок 3.15 - Фотография пробы золы Хабаровской ТЭС-3 в диапазоне 500 мкм

Время исследований: 300 сек.

Число исследованных частиц: 322664.

Минимальный размер частиц: 2,1 мкм.

Максимальный размер частиц: 170,2 мкм.

Медианный диаметр: 79,6 мкм.

Удельная поверхность: 808 см²/г.

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом V_v от размера частиц D_i представлена на рисунке 3.16. Фракционный состав золы представлен в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Фракционный состав пробы золы Хабаровской ТЭС-3

Номер сита	1	2	3	4	5	6	7	8
Размер ячейки сита, мкм	200,00	150,00	120,00	90,00	60,00	30,00	10,00	Дно
V_v , %	0	3,21	20,33	39,46	71,56	93,92	95,99	100,00
Коэффициент формы	-	--	1,247	1,267	1,248	1,209	1,475	1,370

На основании результатов ситового анализа определяется средневзвешенный диаметр частиц в пробе №4, который составляет $d_{cp} = 83,568$ мкм.

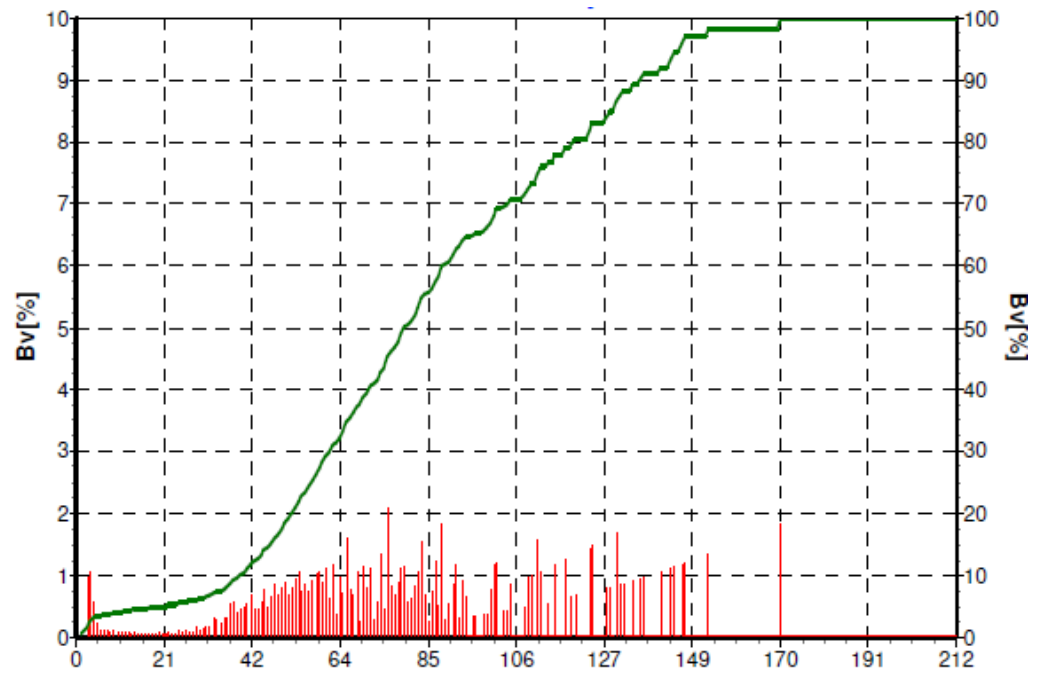


Рисунок 3.16 - Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от их размера в пробе золы Хабаровской ТЭЦ-3

Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц приведена на рисунке 3.17.

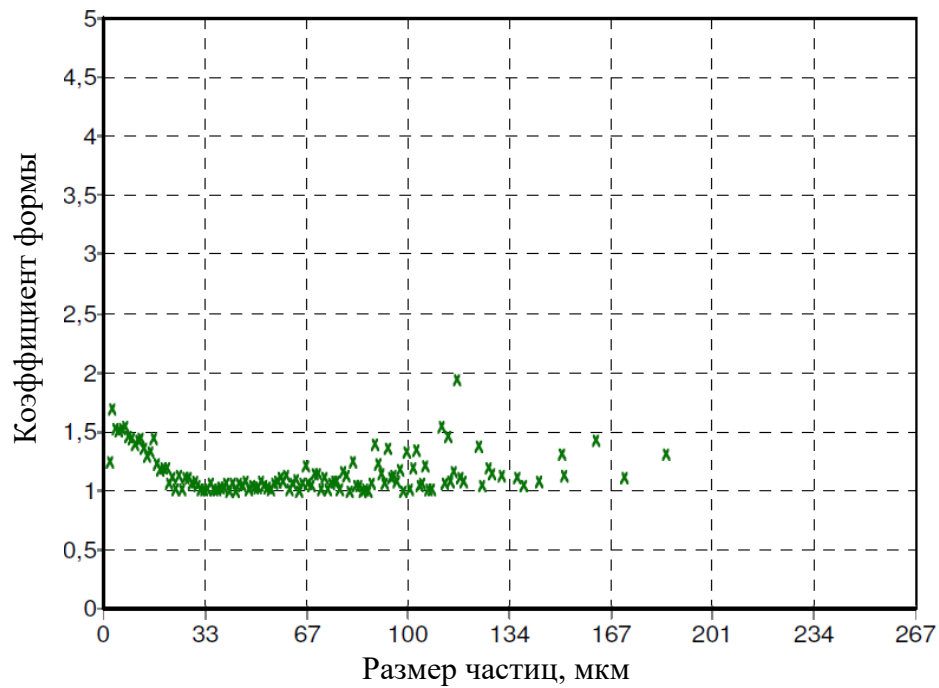


Рисунок 3.17 - Зависимость коэффициента формы частиц от их диаметра

5. Зола Приморской ГРЭС

Микрофотографии пробы золы Приморской ГРЭС при разном увеличении микроскопа приведены на рисунках 3.18 и 3.19.

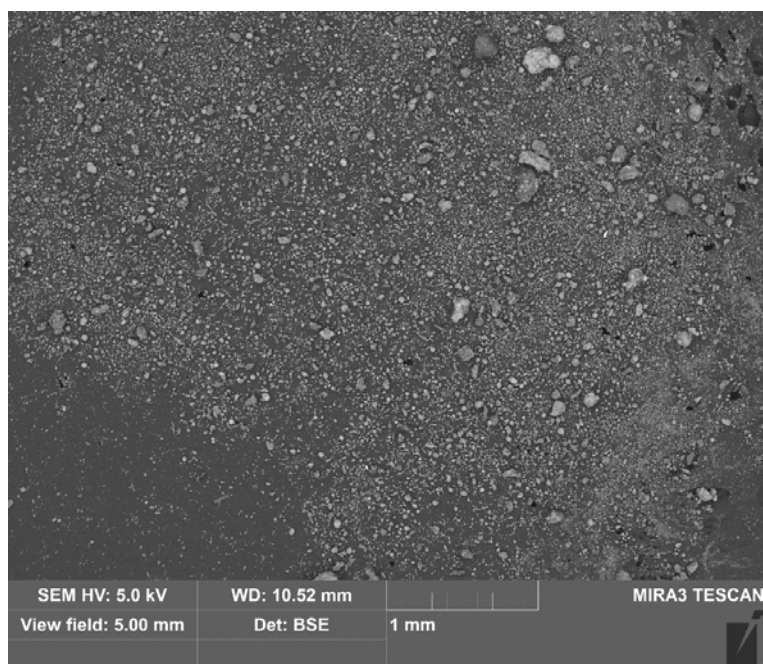


Рисунок 3.18- Микрофотография пробы золы Приморской ГРЭС в диапазоне 5
мм

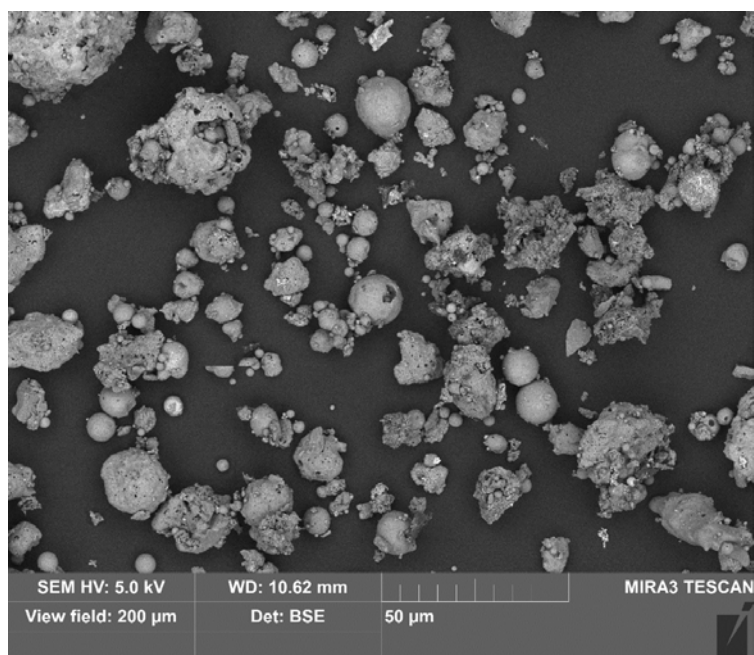


Рисунок 3.19 - Микрофотография той же пробы золы в диапазоне 200 мкм

Время исследований: 300 сек. Число исследованных частиц: 1037269. Минимальный размер частиц: 2,2 мкм. Максимальный размер частиц: 121,7 мкм. Удельная поверхность: 1975 см²/г.

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом V_v от размера частиц D_i представлена на рисунке 3.20. Фракционный состав золы представлен в таблице 3.9. Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц приведена на рисунке 3.21.

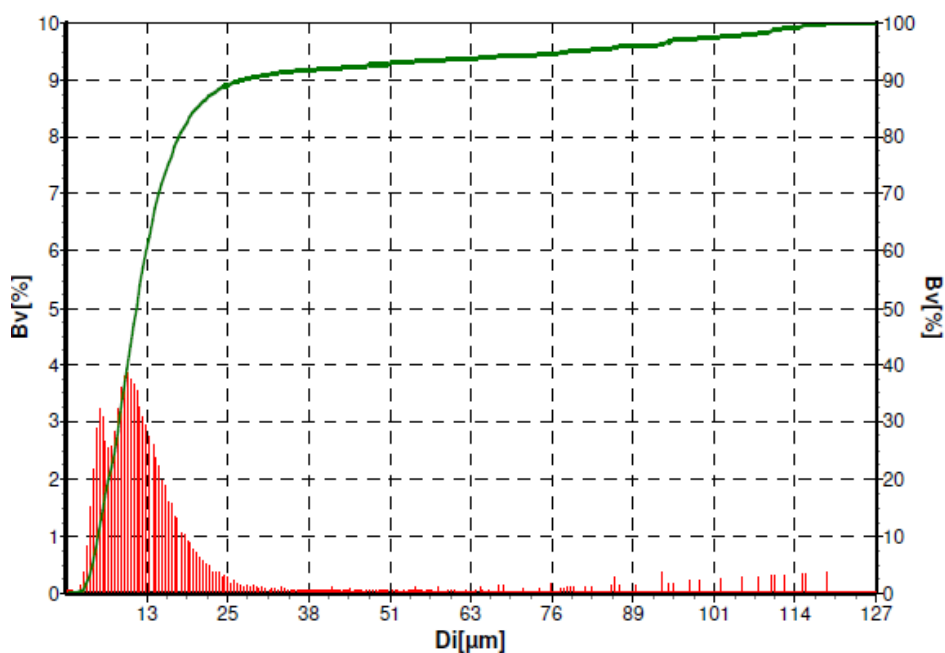


Рисунок 3.20 - Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от размера частиц в пробе золы Приморской ГРЭС

Таблица 3.9 - Фракционный состав пробы № 5 золы Приморской ГРЭС

Номер сита	1	2	3	4	5	6
Размер ячейки сита, мкм	120	90,00	60,00	30,00	10,00	Дно
V_v , %	0	3,94	6,56	9,52	59,24	100,00
Коэффициент формы	-	1,135	1,239	1,357	2,392	1,996

На основании результатов ситового анализа определяется средневзвешенный диаметр частиц в пробе №5, который составляет $d_{cp} = 19,416$ мкм.

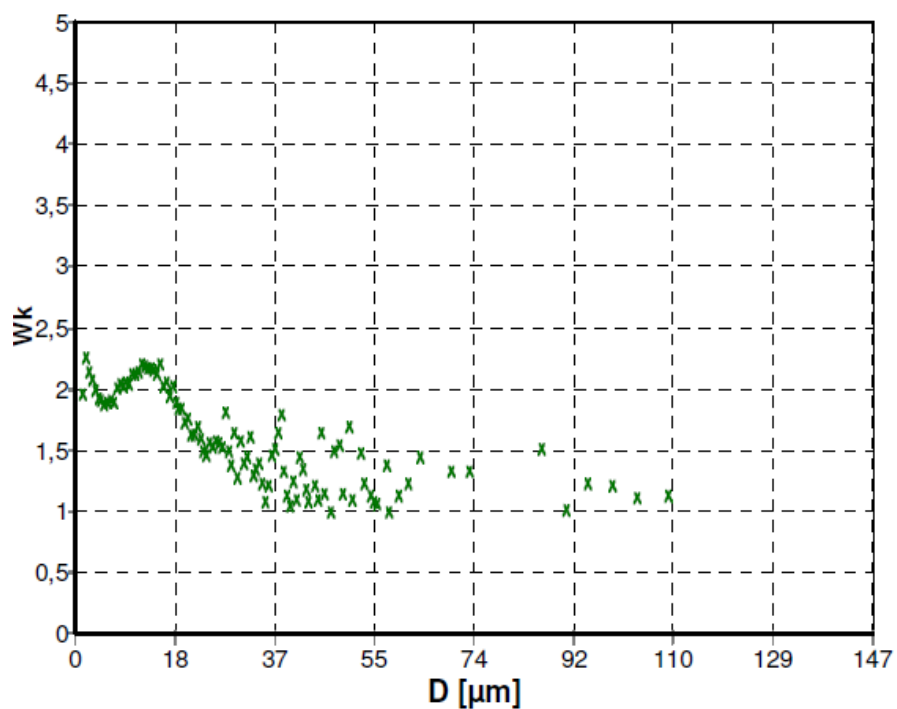


Рисунок 3.21 - Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц в пробе 6

6. Чистый кремний

Микрофотографии пробы кремния приведена на рисунке 3.22.

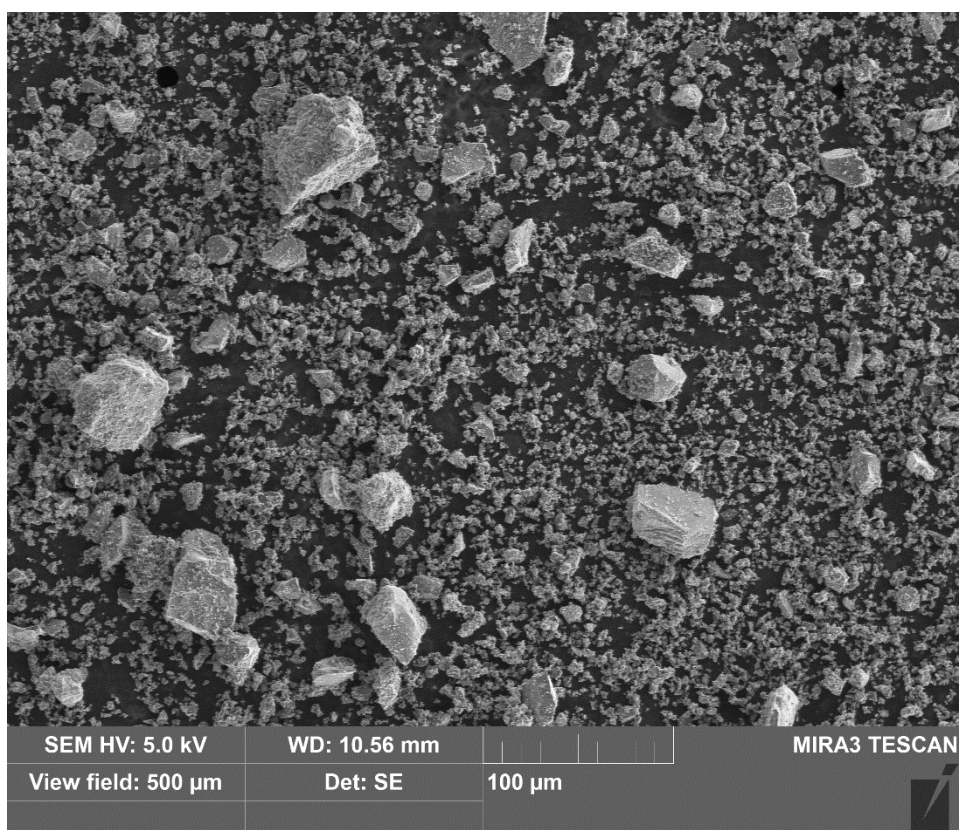


Рисунок 3.22 - Микрофотография пробы кремния

Время исследований: 302 сек.

Число исследованных частиц: 75199

Минимальный размер частиц: 3,0 мкм

Максимальный размер частиц: 143,7 мкм

Удельная поверхность: 1749 см²/г

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом B_v от их размера D_i в пробе №6 представлена на рисунке 3.23. Фракционный состав кремния представлен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Фракционный состав пробы № 7 кремния

Номер сита	1	2	3	4	5	6	7
Размер ячейки сита, мкм	150,00	120,00	90,00	60,00	30,00	10,00	Дно
B_v , %	0	4,77	9,07	19,54	34,96	74,32	100,00
Коэффициент формы	-	-	-	1,203	1,431	1,490	1,567

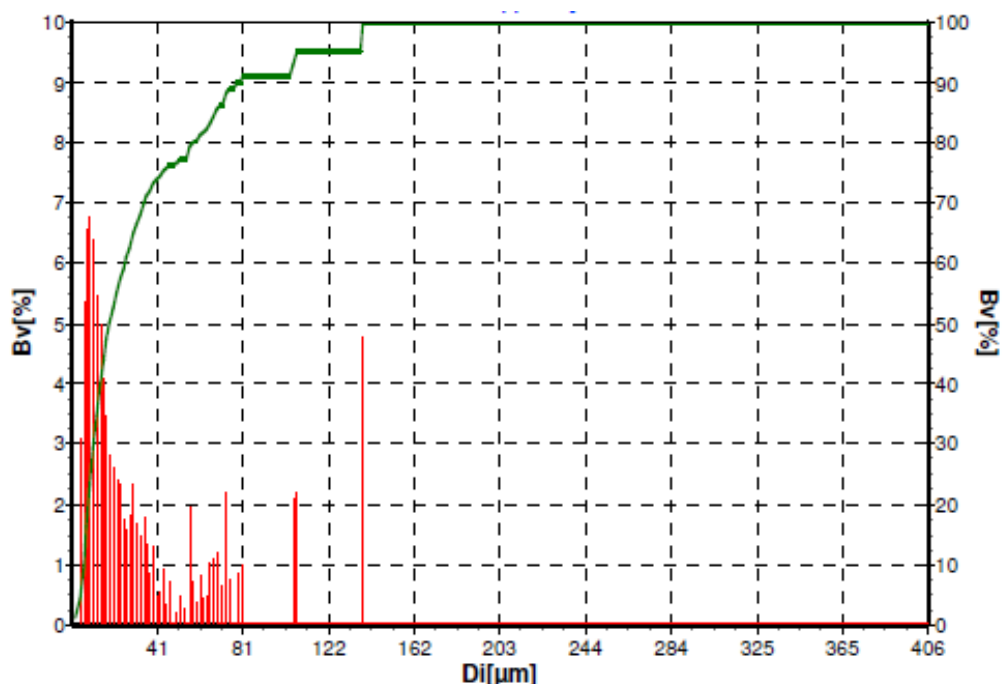


Рисунок 3.23 - Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от их размера в пробе кремния

На основании результатов ситового анализа определяется средневзвешенный диаметр частиц в пробе №6, который составляет $d_{cp} = 34,902$ мкм.

Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц приведена на рисунке 3.24.

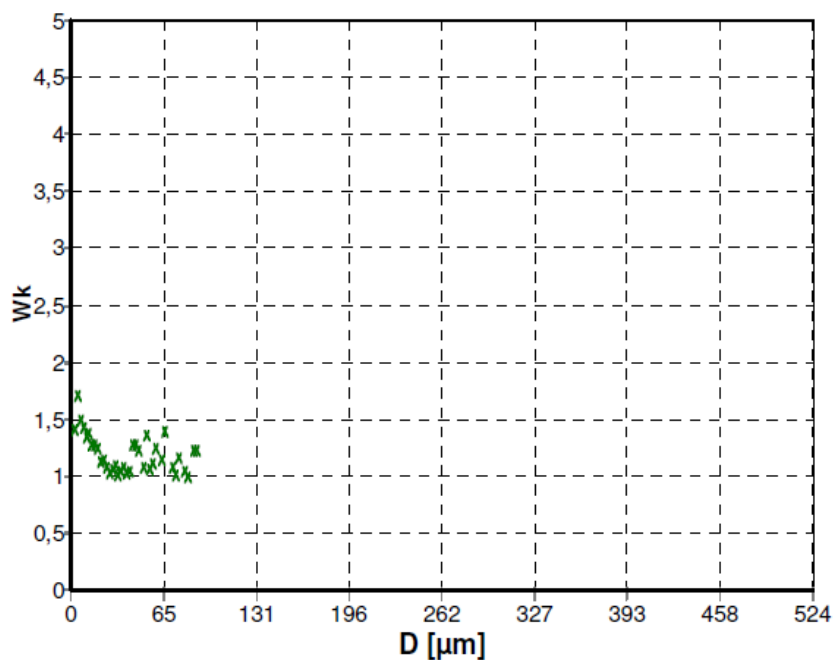


Рисунок 3.24 - Зависимость коэффициента формы от диаметра частиц в пробе 6

7. Микросфера алюмосиликатная

Микрофотография пробы алюмосиликатной микросферы приведена на рисунке 3.25 [126].

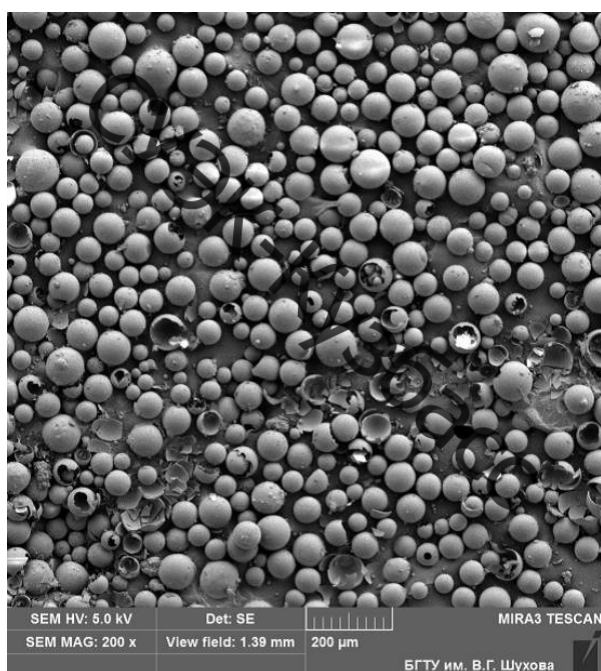


Рисунок 3.25 - Микрофотография пробы микросферы

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом B_v от размера частиц D_i представлена на рисунке 3.26.

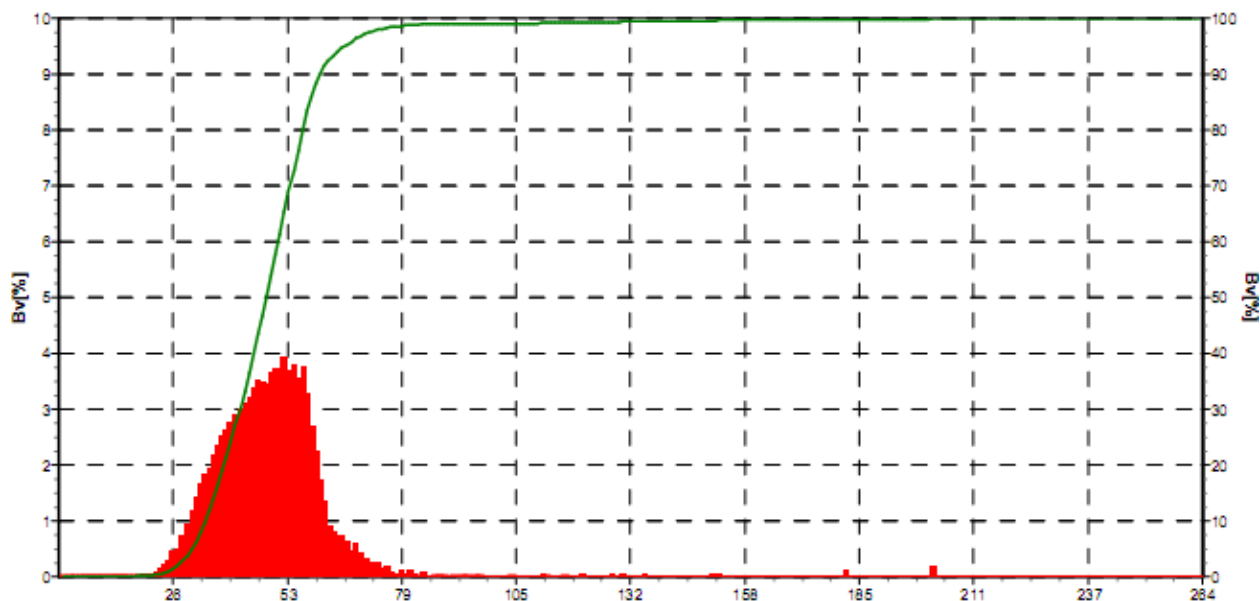


Рисунок 3.26 - Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от их размера

Фракционный состав пробы №7 представлен в таблице 3.11. Исследования фракционного состава материала производились с использованием ситового анализа при сферической калибровке сит. Зависимость формы частиц от их диаметра приведена на рисунке 3.27.

Таблица 3.11 - Фракционный состав пробы №7 полых микросфер.

Номер сита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Размер ячейки сита, мкм	200,00	160,00	120,00	80,00	70,00	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	Дно
B_v , %	0,18	0,32	0,75	1,36	3,12	11,11	43,96	76,28	96,22	99,80	99,98	100,00
Коэффициент формы	1,020	1,188	1,157	1,112	1,100	1,111	1,110	1,135	1,172	1,185	1,471	2,667

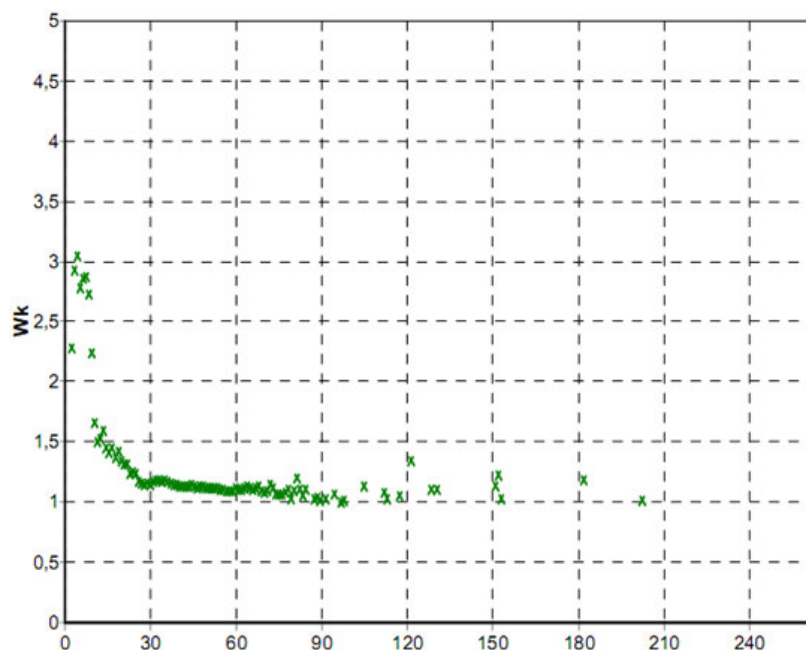


Рисунок 3.27 - Зависимость коэффициента формы частиц от их диаметра

Было исследовано 58360 частиц. Крупность частиц полых алюмосиликатных микросфер летучей золы Беловской ГРЭС меняется от 16,6 до 202,2 мкм, однако, основная масса частиц имеет размеры от 30 до 70 мкм. Средний показатель коэффициента формы составил 1,22. При проведении эксперимента с алюмосиликатными полыми микросферами было сделано допущение, что поверхность стенок частиц – достаточно гладкая, следовательно, показатель микропористости поверхности стенок равен 1,0. При этом величина удельной поверхности частиц составляет $1998\text{ м}^2/\text{г}$ при агрегатной плотности материала $0,65\text{ г/см}^3$. Частицы размерами от 30 до 80 мкм имеют форму близкую к сферической, коэффициент формы этих частиц составляет $1,1 \dots 1,15$. В составе пробы около 33% частиц имеют размер от 50 до 60 мкм, около 32% - от 40 до 50 мкм, около 20% - от 30 до 40 мкм. Содержание остальных групп фракций составляет менее 8%.

3.3 Разработка коэффициента формы частиц мелкофракционных полидисперсных материалов

Коэффициент формы одной частицы определяется, как отношение максимального размера частицы $d_{\max}$ к минимальному $d_{\min}$ в случае ее двухмерного измерения, т.е.:

$$k_{f1} = \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \quad (3.1)$$

В нашем случае выбираем формулу (3.1), т.к. при проведении экспериментов использовался двухмерных анализатор фракционного состава частиц.

Таким образом, $k_f \geq 1$. Для сферических частиц коэффициент формы равен 1, а для несферических частиц он более 1.

Для определения коэффициента формы представительной пробы частиц необходимо иметь фракционный состав исследуемой пробы с коэффициентами формы частиц по группам фракций $k_{f1} \dots k_{fn}$. Предлагается средний коэффициент формы пробы k_f рассчитывать по формуле:

$$k_f = \frac{k_{f1} \cdot m_1 + k_{f2} \cdot m_2 + \dots + k_{fi} \cdot m_i}{100\%}, \quad (3.2)$$

где $m_1 \dots m_i$ – содержание 1...i фракций частиц, % по массе.

На основании данных исследований фракционного состава проб №№1-7 выполнен расчет усредненных коэффициентов формы материалов с использованием зависимости (3.2), результаты которого приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 - Величины коэффициентов формы для проб №№1-7.

№ пробы	Материал	$d_{\text{ср}}$ вз, МКМ	k_f
1.	Зола ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»	40,02	1,55
2.	Зола эстонского сланца электрофилтровая	23,92	1,66
3.	Зола эстонского сланца циклонная	76,83	1,19
4.	Зола Хабаровской ТЭЦ-3	83,57	1,21
5.	Зола Приморской ГРЭС	19,42	2,12
6.	Чистый кремний	34,90	1,33
7.	Микросфера алюмосиликатная	48,89	1,13

Из проведенных расчетов, выполненных по результатам экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы. По форме микросферы наиболее близки к сферическим частицам, хотя в пробе присутствует небольшое количество битых сфер. В пробах циклонной золы эстонских сланцев и золы Хабаровской ТЭЦ-3, которые являются более крупными по сравнению с другими пробами золы, также большое количество частиц имеют форму, близкую к сферической. Большая часть частиц золы Приморской ГРЭС отличается от сферических и имеет неправильную форму, что подтверждается как расчетом, так и экспериментальными исследованиями, выполненными с помощью анализатора фракционного состава, а также микрофотографиями.

На основании проведенных исследований предлагается формула для определения коэффициента формы частиц транспортируемых материалов:

$$k_f = 5,3157 \cdot d_{cp}^{-0,354} \quad (3.3)$$

3.4 Разработка коэффициента полидисперсности мелкофракционных материалов

Полидисперсность материала – характеристика его неоднородности по размеру частиц. Полидисперсность материала характеризуется гранулометрическим составом, который показывает, какую долю или процент по массе, объему или числу частиц составляют определенные частицы или группы частиц во всей анализируемой пробе.

Разные авторы предлагают различные величины коэффициента полидисперсности k_d для сыпучих материалов. Так, например, в обзоре [127], выполненном с участием автора, k_d меняются в диапазоне от 0,6 до 1,4 для мелкодисперсных сыпучих материалов. Коэффициент полидисперсности угольной пыли экибастузского угля, размолотого с использованием валковых среднеходных мельниц, равен 0,85; k_d при размоле бурого угля в шаровых барабанных мельницах составляет 0,85, а при размоле в молотковых мельницах – 1,2...1,3.

Гранулометрический состав мелкофракционных полидисперсных сыпучих материалов характеризуется интегральным показателем крупности частиц этого материала, иногда называемым в научно-технических источниках средним или эквивалентным диаметром частиц. Существуют различные способы определения интегрального показателя крупности частиц материала, приводимые разными авторами. Автор считает, что косвенным образом полидисперсность учитывается при определении средневзвешенного диаметра частиц:

$$d_{cp.63} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot m_i}{100}, \quad (3.4)$$

где d_i – средний размер частиц i -й фракции ситового анализа, определяемый как полусумма размеров отверстий двух соседних сит, m_i – %-ное содержание i -й фракции по массе (остатки на ситах).

Однако, этого показателя недостаточно для учета влияния полидисперсности разнофракционных сыпучих материалов на величины критических скоростей пылегазовых потоков при их перемещении в пневмотранспортных трубопроводах, и соответственно величину абразивному износа трубопроводов систем ЗШУ.

Полидисперсность материала также зависит от медианного диаметра частиц в распределении. Таким образом, при определении коэффициента полидисперсности материала предлагается учитывать средневзвешенную крупность частиц, а также медианный диаметр частиц:

$$k_d = \frac{d_{cp.63}}{d_{med}} \quad (3.5)$$

Определение медианного диаметра частиц. Медианный диаметр получают на кумулятивной кривой, построенной на графике, где по оси абсцисс отложен диаметр фракций, а по оси ординат – их нарастающее суммарное содержание (рисунк 3.28). Точка на кривой, где содержание составляет 50%, называется медианой, а соответствующий ей диаметр – медианным диаметром.

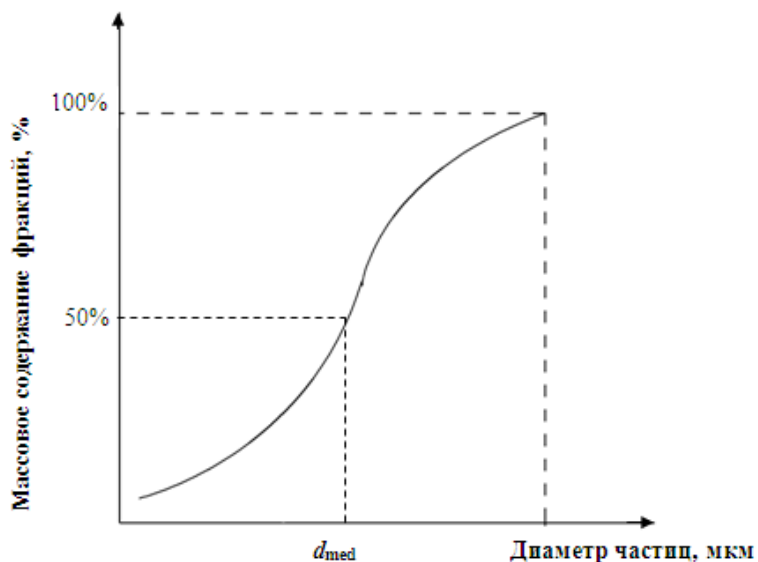


Рисунок 3.28 - Интегральное распределение частиц по фракциям с определением медианного диаметра

Автор полагает, что $k_d > 1$. Для монодисперсных сред $k_d = 1$, для полидисперсных сред $k_d > 1$.

В таблице 3.13 приведены величины коэффициентов полидисперсности для проб №№1 - 7, рассчитанные по разработанной зависимости (3.5). Средневзвешенная крупность определена по формуле (3.4) на основании измерений фракционного состава материалов. Величины медианных диаметров частиц получены при выполнении экспериментов с помощью анализатора Kamika.

Таблица 3.13 - Коэффициент полидисперсности для проб №№1-7

№ пробы	Материал	$d_{\text{ср вз, мкм}}$	$d_{\text{med, мкм}}$	k_d
1	Зола ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»	40,02	40,9	0,98
2	Зола эстонского сланца электрофилтровая	23,92	5,7	4,20
3	Зола эстонского сланца циклонная	76,83	64,4	1,19
4	Зола Хабаровской ТЭЦ-3	83,57	79,6	1,05
5	Зола Приморской ГРЭС	19,42	11,2	1,73
6	Чистый кремний	34,90	18,7	1,87
7	Микросфера алюмосиликатная	48,89	48,3	1,01

Таким образом, наиболее однородными материалами являются те, средне-взвешенная крупность которых близка к медианному диаметру. Наиболее однородным из всех исследуемых материалов являются микросферы Беловской ГРЭС, что и подтвердили результаты расчета коэффициента полидисперсности, а также зола кузнецкого тощего угля и зола Хабаровской ТЭЦ-3. Наименее однородным из всех материалов является электрофильтровая зола эстонского сланца, в пробе которой наблюдается очень существенный разброс частиц по крупности, что и подтверждается микрофотографиями, а также результатами проведенных исследований с помощью анализатора фракционного состава. В пробе чистого кремния присутствует некоторое количество крупных зерен, что существенным образом влияет на полидисперсность материала.

3.5 Разработка формулы для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС

Оценка величины абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов являлась достаточно сложным вопросом, поскольку ранее отсутствовали общепринятые зависимости для расчета абразивного износа, которые бы учитывали основные характеристики транспортирования. Так, авторы [128] считали, что количество кварцевого песка M , т/мм, пневмотранспорт которого вызывает абразивный износ стенки трубы на 1 мм при средней скорости воздуха в потоке аэросмеси 80 м/с, составляет:

$$M = 0,255 \cdot 10^4 \cdot m^{0.4} \cdot D^2 \quad (3.6)$$

Тогда величина удельного абразивного износа трубопроводов, мм/т, равна:

$$\delta_h = \frac{3,92 \cdot 10^{-4}}{m^{0.4} \cdot D^2}, \quad (3.7)$$

где D — внутренний диаметр трубы, м; m — массовая концентрация смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха

В работе [128] износ принят пропорциональным скорости воздуха в квадрате. При скоростях воздуха U , отличных от 80 м/с, необходимо ввести коэффициент поправки на скорость воздуха при пневмотранспорте сыпучего материала k_u , который определяется по формуле:

$$k_u = \left(\frac{80}{U}\right)^2, \quad (3.8)$$

где 80, U – средние по сечению скорости воздуха при пневмотранспортировании кварцевого песка согласно [128] и для рассматриваемых условий пневмотранспорта абразивных материалов в трубопроводе, м/с.

Тогда зависимость (3.6) будем иметь вид:

$$\delta_h = \frac{6,13 \cdot 10^{-8} \cdot U^2}{m^{0,4} \cdot D^2} \quad (3.9)$$

Зависимость (3.9) была использована при разработке отраслевого нормативного документа [93] и усовершенствована за счет учета влияния скорости воздуха при пневмотранспортировании материала, отличной от 80 м/с, критерия аэродинамической легкости частицы, коэффициентов абразивности транспортируемого материала и износостойкости материала трубы.

Так, при подготовке упомянутого нормативного документа [93] с участием автора была разработана зависимость для расчета удельного абразивного износа прямолинейных участков пневмотранспортных трубопроводов:

$$\delta_h = 5,55 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}}, \text{ мм/т}, \quad (3.10)$$

где U_M – средняя по сечению скорость потока частиц материала, м/с; K_{II} – критерий аэродинамической легкости частиц при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов², кг/м²; k_{SiO_2} – коэффициент относительного содержания SiO_2 в транспортируемых материалах; D – внутренний диаметр трубы, м; m – массовая концентрация смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха; $k_{изн}$ – коэффициент относительной износостойкости материала трубопровода.

Далее зависимость (3.10) была уточнена с учетом коэффициентов формы и полидисперсности материалов.

Для уточнения зависимости для расчета прямолинейных участков трубопроводов были использованы данные, полученные в результате экспериментальных исследований проб №№1 -7, проведенных автором, и описанных выше.

Уточненная зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа горизонтальных и наклонных участков трубопроводов пневмотранспортных установок с учетом коэффициентов формы и полидисперсности мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов имеет вид:

$$\delta_h = 5,55 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{\Pi} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн.} \cdot k_f^{0,25} \cdot k_d^{0,25}}, \text{ мм/т}, \quad (3.11)$$

где k_f — коэффициент формы частиц, k_d — коэффициент полидисперсности материала.

Согласно [129] критерий аэродинамической легкости частиц K_{Π} является одной из важнейших характеристик пневмотранспортируемых мелкодисперсных сыпучих материалов, численно равный отношению массы частицы к площади ее поверхности и определяется по выражению:

$$K_{\Pi} = \frac{d_{ср.вз} \rho_M}{6}, \quad (3.12)$$

где ρ_M — плотность транспортируемого материала, кг/м³; $d_{ср.вз}$ — средневзвешенный эквивалентный диаметр частиц материала, м.

Коэффициент относительного содержания SiO_2 в транспортируемом материале k_{SiO_2} определяется по выражению:

$$k_{SiO_2} = \frac{\% \text{ содержания } SiO_2 \text{ в транспортируемом материале}}{\% \text{ содержания } SiO_2 \text{ в кварцевом песке}}, \quad (3.13)$$

где массовое содержание SiO_2 в кварцевом песке составляет не менее 95 % согласно [130].

В результате анализа имеющихся данных по влиянию твердости по Виккерсу на износостойкость металла трубы с учетом [131] получена зависимость для определения $k_{изн.}$, представленная на рисунке 3.29, которую можно аппроксимировать выражением:

$$k_{изн} = 5,0 \times 10^{-5} \times HV^2 - 0,0088 \times HV + 1,32 \quad (3.14)$$

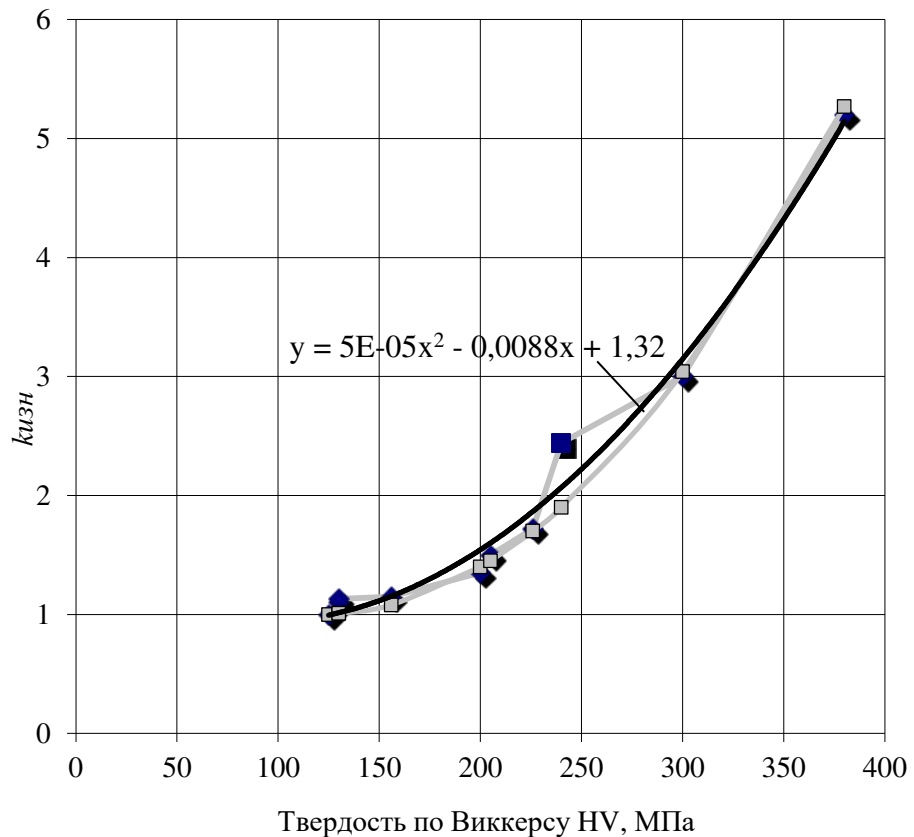


Рисунок 3.29 – Влияние твердости материала трубопровода на износостойкость трубы

Величины коэффициентов относительной износостойкости $k_{изн}$ для различных материалов трубопроводов, рассчитанных по формуле (3.14), приведены в таблице 3.14.

На вертикально расположенных участках трубопроводов абразивный износ происходит равномерно по всей поверхности. Таким образом, зависимость (3.11) пригодна для расчета удельного абразивного износа горизонтальных и наклонных трубопроводов, а для вертикальных трубопроводов следует применять зависимость (3.15), которая по существу отличается только уменьшенным в 4 раза числовым коэффициентом:

$$\delta_h = 1,39 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{\Pi} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн} \cdot k_f^{0,25} \cdot k_d^{0,25}}, \text{ мм/т} \quad (3.15)$$

Таблица 3.14. Коэффициенты относительной износостойкости $k_{изн}$ трубопроводов из различных материалов

Материал трубопровода	Твердость по Виккерсу, HV	$k_{изн}$
Медь	125	1,00
Сталь 5	130	1,02
Сталь 25Л	130	1,02
Сталь 3	135	1,04
Сталь 10	137	1,05
Сталь 4сп	140	1,07
Сталь 5сп	150	1,13
Сталь 20	156	1,16
Сталь 35Л	160	1,19
Сталь 35	187	1,42
Сталь 25Г2	200	1,56
Сталь 37 (St37)	210	1,68
Сталь 40, 40Х (отж.)	217	1,76
Серый чугун	223	1,84
Сч 28-48	205	1,62
Сч 36-56	226	1,89
Сталь 30ХГС, Сталь 30ХГСА (отж.)	229	1,93
Сталь 55Л (с термообработкой)	240	2,09
Сталь 45	241	2,10
Сталь 30Х13	270	2,59
Сталь 40Х13	300	3,18
Сталь 55Л	340	4,11
Сталь X5CrNi189	380	5,20
Трубы с алюмотермическим покрытием	2500	291,82

Для проверки качества разработанной и уточненной зависимостей (3.9) и (3.10) были произведены расчеты удельного линейного абразивного износа при пневмотранспорте золы эстонского сланца, золы березовского и ирша-бородинского угля по данным экспериментальных исследований (таблица 3.15), что позволило сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными по абразивному износу трубопроводов при пневмотранспорте золы (таблица 3.16).

Результаты расчета по зависимостям (3.10) и (3.11) имеют гораздо лучшую сходимость с результатами экспериментальных исследований по сравнению с зависимостью (3.9), отличающуюся в сотни раз.

Таблица 3.15 - Исходные данные для расчета абразивного износа трубопроводов

№ п/п	Транс- портируе- мый ма- териал	Материал трубопро- вода		G_m , кг/с	m , кг/кг	U , м/с	D , м	$d_0 \cdot 10^{-6}$, м	ρ_m , кг/м ³	$P \cdot 10^5$, Па	t_m , °C	t_{θ} , °C	% SiO ₂	k_f	k_d
		Марка	HV												
1.	Зола эстонского сланца циклонная	Ст.20	156	6,65	9,80	21,1	0,161	62,6	3130	1,58	66	66	23,6	1,19	1,19
2.	Зола березовского угля молотая	Ст.20	156	2,84	3,80	26,5	0,148	43,0	2870	1,64	50	50	26,1	1,4	1,1
3.	Зола ирша-бородинского угля циклонная	Ст.20	156	2,50	6,02	16,0	0,148	54,1	2880	1,51	20	20	45	1,29	1,4

Примечание: коэффициенты k_f и k_d для золы эстонского сланца были определены с учетом результатов экспериментальных исследований пробы эстонского сланца и разработанных зависимостей для их расчета; для золы березовских и ирша-бородинских углей эти показатели определены на основании анализа результатов экспериментальных исследований проб №№1-7 и данных, приведенных в научно-технических источниках информации.

Таблица 3.16 - Величины удельного износа при пневмотранспорте золы по разработанным зависимостям и по результатам натурных экспериментов

№ п/п	Транспортиру- емый материа- лов	Экспери- ментальные данные по износу тру- бопроводов, $\delta_h \cdot 10^6$, мм/т	Величина износа $\delta_h \cdot 10^6$, мм/т			Относительная погреш- ность расчета, %		
			По фор- муле (3.9)	По фор- муле (3.10)	По фор- муле (3.11)	По фор- муле (3.9)	По фор- муле (3.10)	По фор- муле (3.11)
1.	Зола эстонского сланца циклонная	15,80	422,21	16,52	15,14	2572,2	4,56	4,18
2.	Зола березовского угля молотая	32,10	1151,23	34,16	30,66	3486,4	6,42	4,48
3.	Зола ирша-бородинского угля циклонная	9,93	349,13	11,12	9,59	3415,9	11,98	3,42
4.	Среднеарифметическая погрешность, %					3158,2	7,65	4,03

Результаты расчета по уточненной зависимости (3.11) с учетом формы и полидисперсности частиц имеют лучшую сходимость с результатами натурных экспериментов по сравнению с результатами расчета по разработанной ранее зависимости (3.10). Поэтому в дальнейшем для расчета абразивного износа прямолинейных и наклонных участков трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов рекомендуется использовать формулу (3.11).

3.6 Разработка формулы для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов пневмотранспортных установок систем ЗШУ ТЭС

Существующие расчетные зависимости для определения абразивного износа криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов [132 - 135] основаны на использовании большого количества эмпирических коэффициентов. Следствием этого является невозможность их практического применения для расчета абразивного износа в связи с отсутствием величин или методик расчета коэффициентов, входящих в состав зависимостей. Существующие зависимости, предложенные авторами [136, 137], учитывают влияние неполного ряда основных независимых факторов и/или получены в узком диапазоне изменения параметров.

В таблице 3.17 представлены зависимости авторов [136, 137], приведенные к единому виду, результаты расчета по которым исследуются на сходимость с учетом предлагаемой зависимости с экспериментальными данными величины абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов.

Таблица 3.17 - Зависимости для разработки модели расчета величины абразивного износа криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов

Вид зависимости	Автор	№ формулы
$\delta_h = U^{2,8} \cdot d_0 \cdot m^{-0,6} \cdot HV^{-0,4}$	[136]	(3.16)
$\delta_h = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot U^{2,65}}{m^{0,26} \cdot D^2 \cdot \rho_m}$	[137]	(3.17)

Экспериментальные исследования абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок

Научные исследования по абразивному износу трубопроводов пневмотранспортных установок и определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов выполнялись автором в Центре промышленной трибологии, динамики машин и инженерного обеспечения технического обслуживания Индийского института технологий (далее Центр ИИТД) в соответствии с грантом РФФИ №08-08-91300-ИНД_а.

Основные цели экспериментальных исследований:

1. Определение факторов, влияющих на абразивный износ трубопроводов и колен поворотов в пневмотранспортных системах.
2. Корректировка модели расчета абразивного износа при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов.
3. Определение критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов.

Для достижения поставленных целей выполнено следующее:

- реконструирована экспериментальная установка;
- разработаны Программа и Методика проведения научных исследований по абразивному износу трубопроводов установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов;
- разработаны Программа и Методика проведения научных исследований по определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов.
- выполнен трехступенчатый трубопровод от смесительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер, имеющий три разных диаметра экспериментальных участков;
- на участках пылепровода одного диаметра смонтировано по одной стеклянной вставке для визуализации процессов движения пылевоздушных потоков;
- увеличено количество датчиков давления аэросмеси в пылепроводе до 10

штук и изменены места их врезки в пылепровод;

- проведены научные исследования по абразивному износу трубопроводов установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов в Центре ИИТД;
- проведены научные исследования по определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов в Центре ИИТД;
- обработаны и проанализированы результаты выполненных исследований;
- разработаны зависимости для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов.

Методика проведения экспериментальных исследований по абразивному износу трубопроводов пневмотранспортных установок и определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов разработана при участии автора и согласована в НИУ «МЭИ» и ИИТД (Приложение Р).

Описание экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов после модернизации

Установка состоит из бункера-накопителя, в котором хранится сыпучий материал, питателя для подачи материала в трубопровод при регулируемой концентрации материала, устройства подачи воздуха, экспериментального трубопровода и приемного бункера, соединенного с фильтром очистки запыленного воздуха. В статье [138] подробно рассмотрены технологии и оборудование обеспыливания воздуха, которое используется в пневмотранспортных установках. Пневмокамерный насос, ранее предназначавшийся для подачи материала в трубопровод, был заменен на роторный питатель (рисунок 3.30), в котором используется объемное регулирование подачи материала, т.к. в данной системе транспорт материала происходит при постоянной массовой концентрации в экспериментальном трубопроводе. Для измерения требуемых параметров: концентрации

воздуха и транспортируемого материала, потери давления в трубопроводе и износ колен установлены датчики.



Рисунок 3.30 - Роторный питатель, используемый в новой пилотной установке

Блок-схема модернизированной экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов представлена на рисунке 3.31. Схема установки роторного питателя, расходного и приемного бункеров представлена на рисунке 3.32. Схема пылепровода от смесительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер представлена на рисунке 3.33. На этой же схеме показаны места установки датчиков давления пылегазовых потоков на экспериментальной части пылепровода. Разработана схема узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку. Информационно-измерительная система (ИИС) также подверглась коренной модернизации с целью обеспечения измерения и протоколирования параметров, необходимых для исследования значимых факторов абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок при транспортировании мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов.

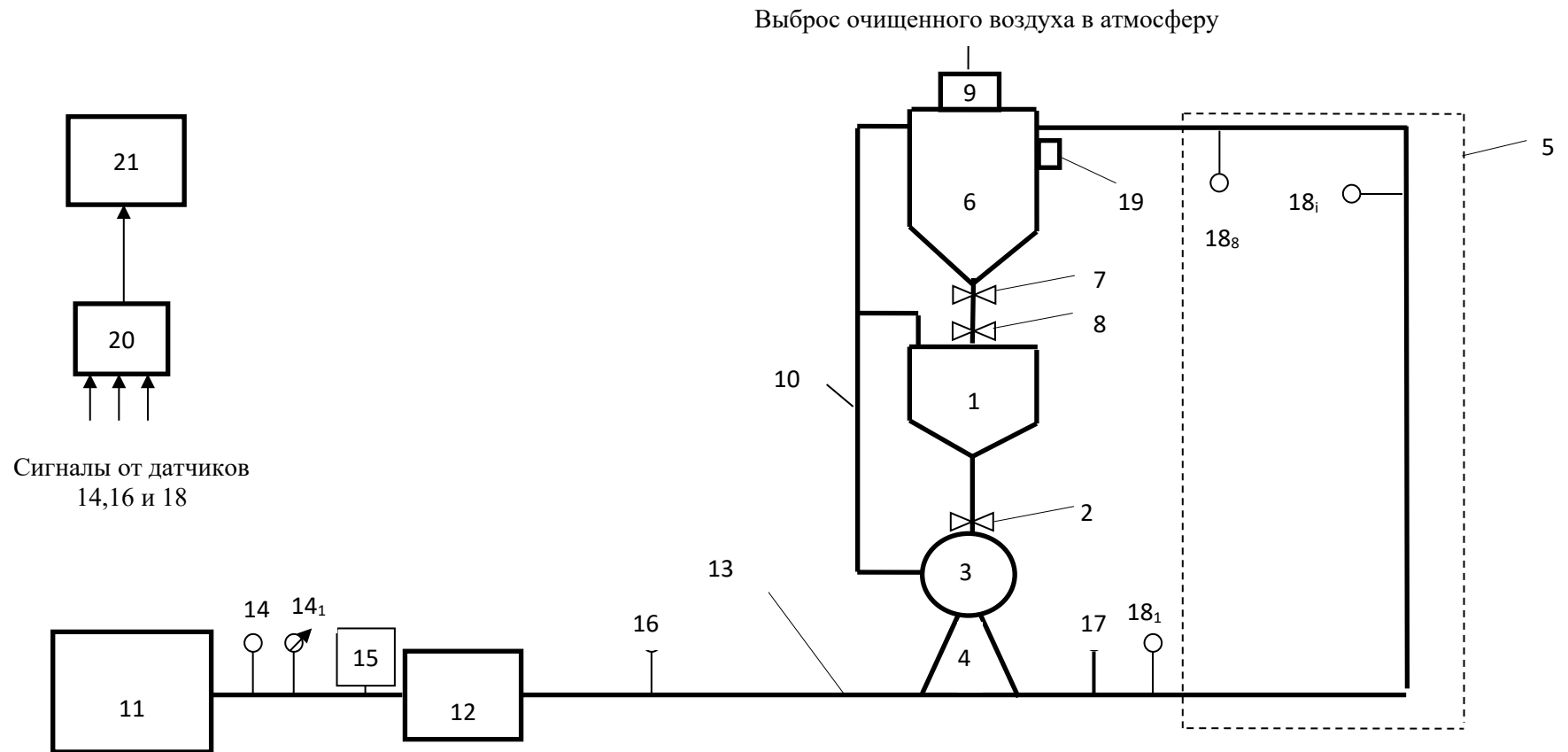


Рисунок 3.31 - Блок-схема экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов ИИТ Дели после первого этапа модернизации:

1 — расходный бункер; 2 — пластинчатая задвижка; 3 — роторный питатель; 4 — смесительная камера роторного питателя; 5 — экспериментальная часть пылепровода; 6 — приемный бункер; 7, 8 — поворотные шиберы; 9 — фильтр очистки запыленного воздуха; 10 — трубопровод сброса воздуха протечек через роторный питатель; 11 — компрессор; 12 — узел регулирования подачи сжатого воздуха; 13 — трубопровод сжатого воздуха к роторному питателю; 14 — датчик давления сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха; 14₁ — стрелочный манометр перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха; 15 — расходомер воздуха; 16 — прибор контроля давления сжатого воздуха после узла регулирования подачи сжатого воздуха; 17 — переносной лазерный датчик температуры потоков воздуха и аэросмеси в трубопроводах сжатого воздуха и в пылепроводе; 18 — датчики давления аэросмеси в пылепроводе (№№1-8); 19 — комплект тензометрических датчиков из 3 штук; 20 — аналогово-цифровой преобразователь сигналов от датчиков; 21 — компьютер

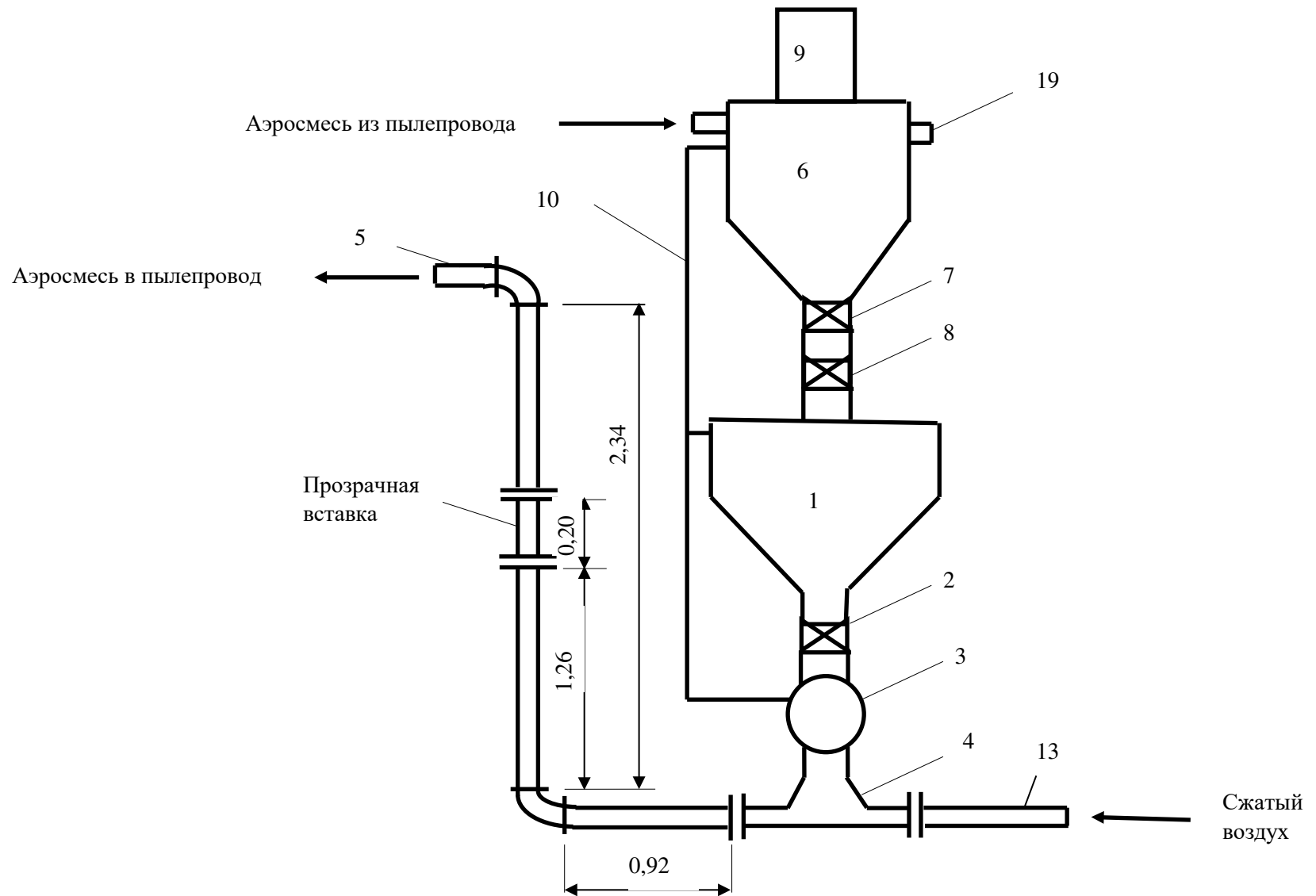


Рисунок 3.32 - Схема установки роторного питателя, расходного и приемного бункеров:

1 — расходный бункер; 2 — пластинчатая задвижка; 3 — роторный питатель; 4 — смешивательная камера роторного питателя; 5 — пылепровод; 6 — приемный бункер; 7, 8 — поворотные шиберы; 9 — фильтр очистки запыленного воздуха; 10 — трубопровод сброса протечек воздуха через роторный питатель; 13 — трубопровод сжатого воздуха к роторному питателю, 19 — комплект тензометрических датчиков из 3 штук

$$R/D=3,6; L_{\text{общ.}} = 133,67 \text{ м}; L_{\text{эксп.}} = 119,31 \text{ м}$$

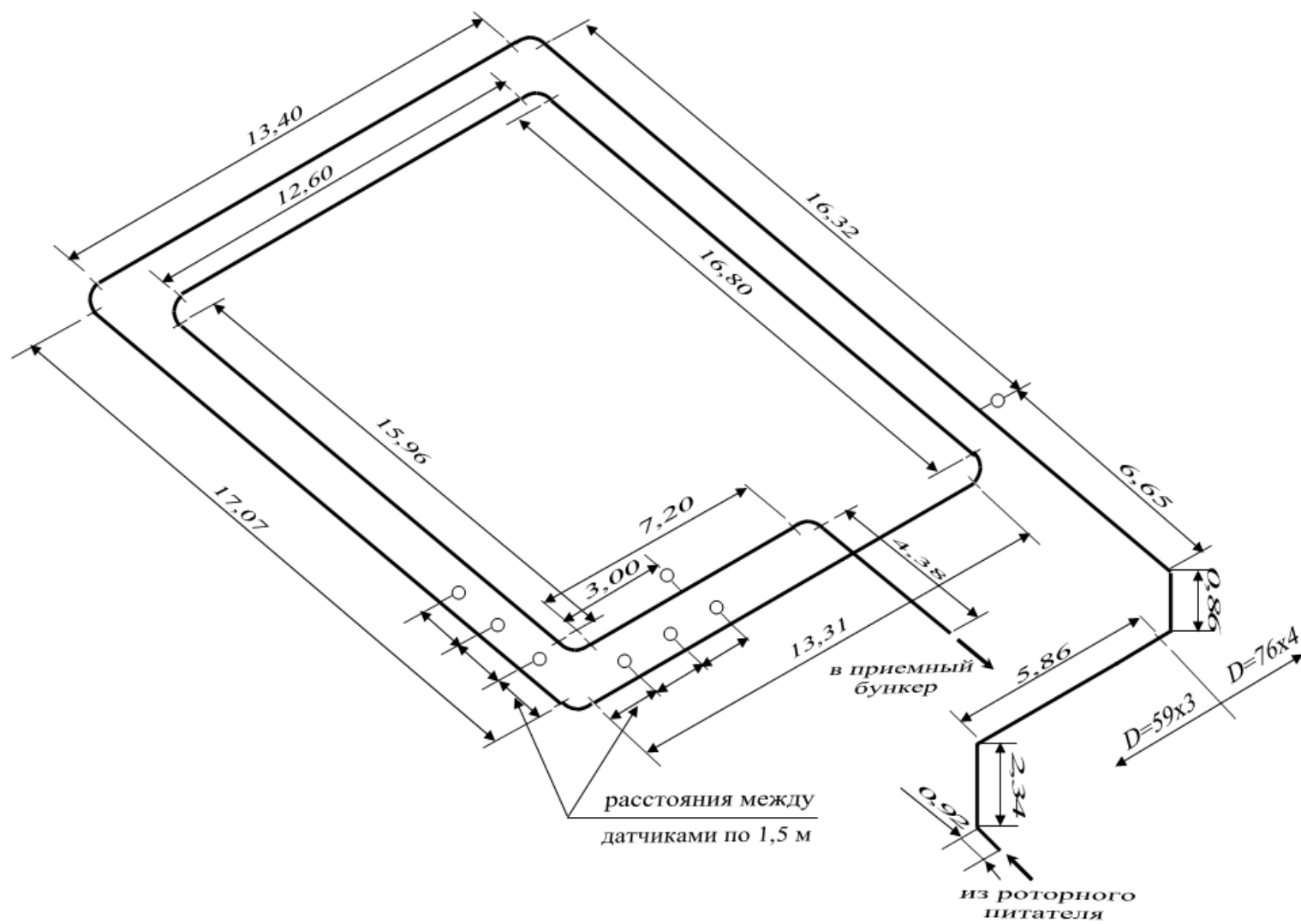


Рисунок 3.33 - Схема пылепровода от смесительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер

Разработка зависимости для расчета износа криволинейных участков трубопроводов и сопоставление с результатами экспериментов

В результате выполнения комплекса научных работ разработана формула для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов пневмотранспортных установок. За основу была взята формула для расчета прямолинейных участков пневмотранспортных трубопроводов (3.11), которая была доработана с учетом влияния угла атаки пылевоздушных потоков k_α и отношения радиуса поворота трубы к внутреннему ее диаметру k_{RD} . Предложены формулы для определения коэффициентов k_α и k_{RD} . Результаты расчета по предложенной зависимости были оценены на сходимость с результатами расчета по существующим зависимостям и выполнено их сравнение с данными экспериментальных исследований.

Под данным [139] срок службы гнутых стальных колен в 500...2000 раз меньше, чем прямолинейных участков трубопроводов. На рисунке 3.34 приведена зависимость величины износа стального колена с радиусом поворота 650 мм ($R/D=5,2$) от угла поворота потока α ($\alpha=0$ на входе потока в колено и $\alpha=90^\circ$ при выходе потока из колена).

Проанализировав имеющиеся экспериментальные данные, представленные на рисунке 3.34, и данные собственных исследований, были получены зависимости влияния угла атаки на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов. Характер полученных зависимостей представлен на рисунках 3.35 и 3.36.

С учетом коэффициента масштабирования, равного 5, получим:

$$k_\alpha = 0,0065\alpha^2 - 0,0385\alpha + 1,033 \text{ при } 0 < \alpha \leq 28,3^\circ \quad (3.18)$$

$$k_\alpha = 5e^{4,57} \cdot \alpha^{-1,39} \text{ при } \alpha > 28,3^\circ \quad (3.19)$$

Угол поворота пылевоздушных потоков более чем на 90° не рассматривался, так как такие углы не характерны для реальных пневмотранспортных установок золы и угольной пыли тепловых электростанций.

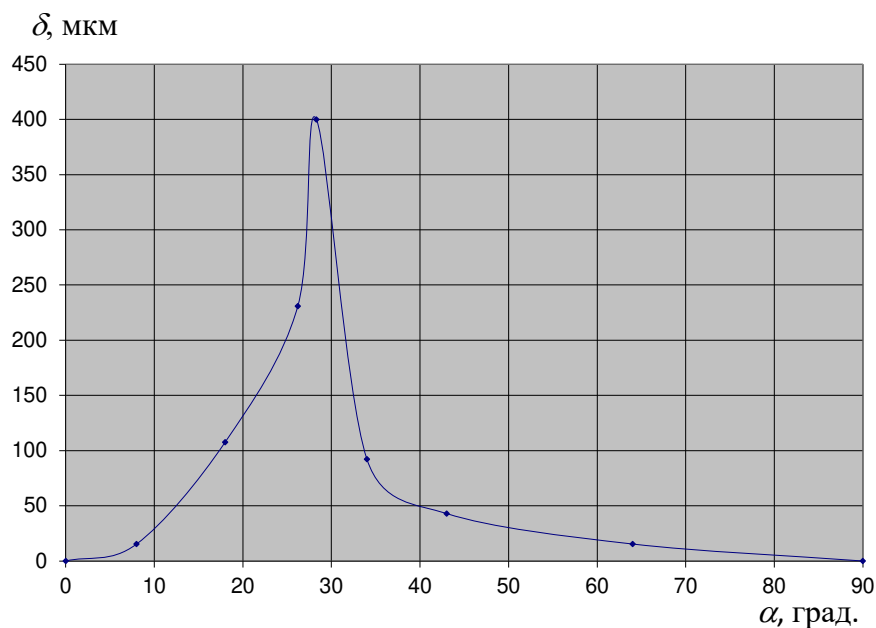


Рисунок 3.34 - Зависимость скорости износа стального колена от угла поворота потока α (скорость воздуха 35,3 м/с; концентрация пыли 2,3 кг/кг)

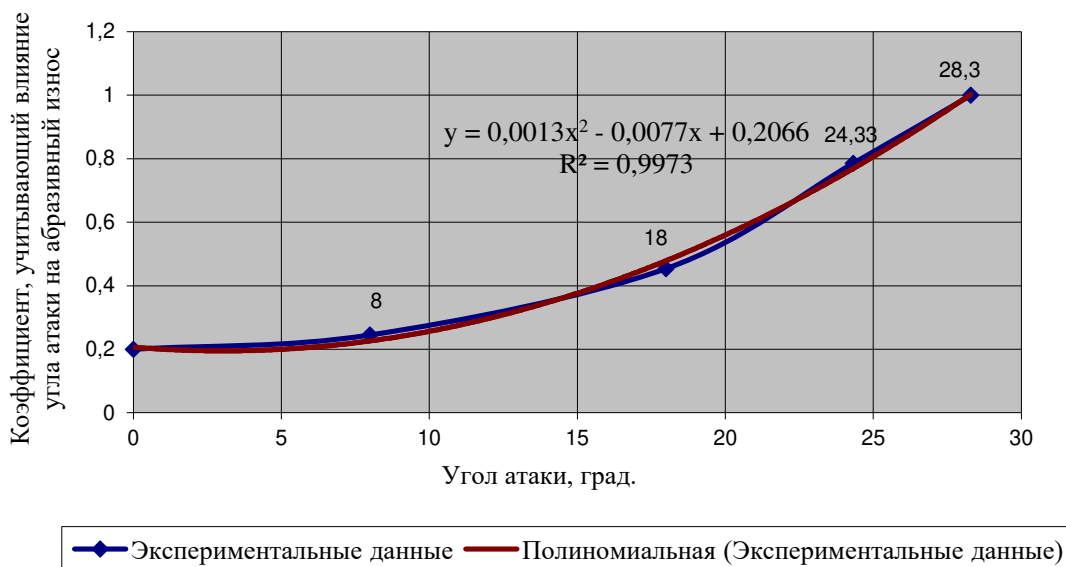


Рисунок 3.35 - Влияние угла атаки на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов при $0 < \alpha \leq 28,3^\circ$

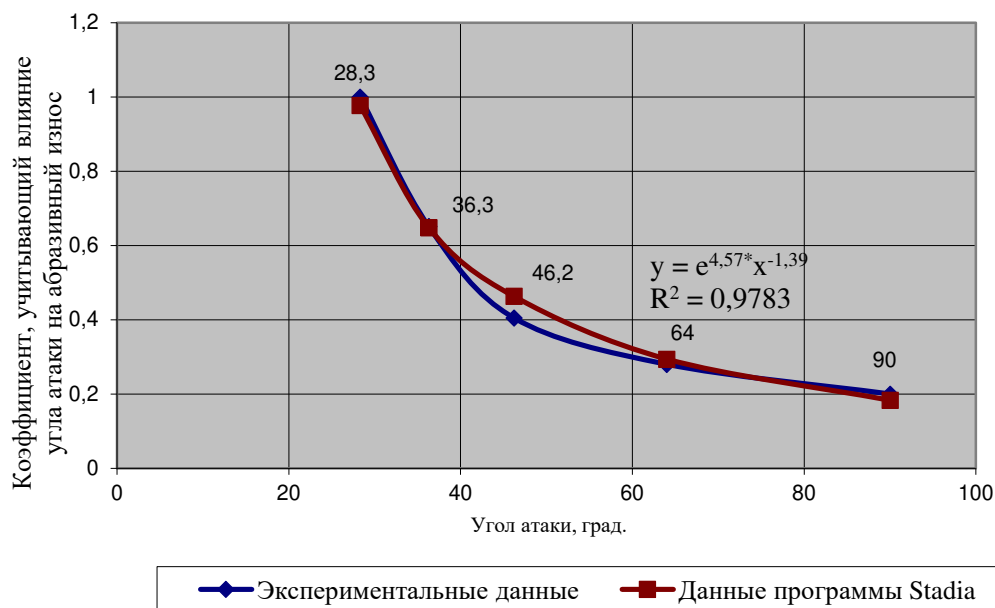


Рисунок 3.36 - Влияние угла атаки на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов при $\alpha > 28,3^\circ$

Существует определенная зависимость износа от радиуса поворота трубопровода, в общем случае сводящаяся к тому, что при более плавном повороте износ меньше. В практической деятельности при изготовлении колен трубопроводов отношение радиуса поворота R к внутреннему диаметру трубы D выбирается из диапазона 5...12 в случае пневмотранспортирования мелкодисперсных абразивных материалов.

В результате анализа данных, представленных на рисунке 3.37, разработано выражение для определения $k_{R/D}$ на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов.

Зависимость имеет вид:

$$k_{R/D} = 1,448 \cdot R/D^{-0,384} \quad (3.20)$$

В конечном итоге была разработана зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с учетом k_f , k_d , k_α и $k_{R/D}$, которая имеет следующий вид:

$$\delta_h = 5,55 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{SiO_2} \cdot k_\alpha \cdot k_{R/D}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн} \cdot k_f^{0,25} \cdot k_d^{0,25}}, \text{ мм/т} \quad (3.21)$$

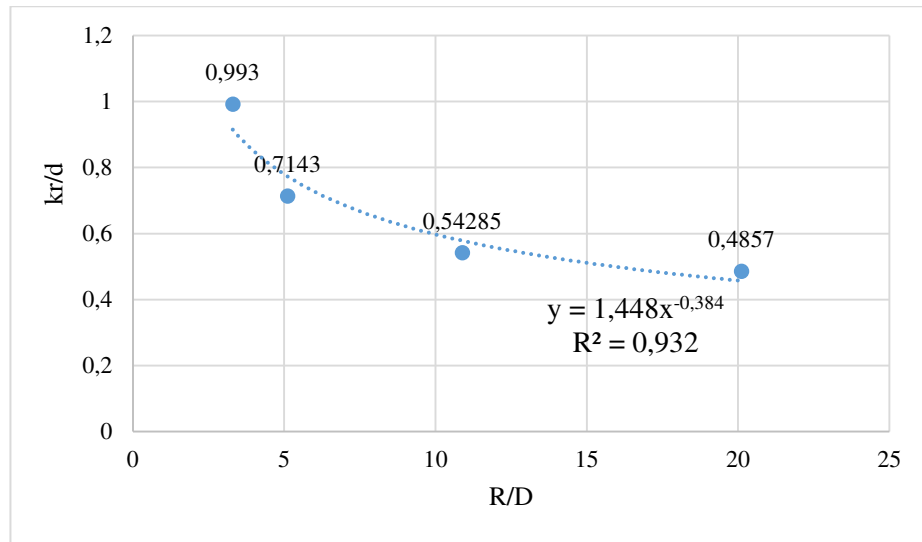


Рисунок 3.37 - Влияние конструктивных размеров (R/D) на износ стальных колес в зоне максимального разрушения

Межремонтный срок эксплуатации трубопроводов пневмотранспортных установок по условиям абразивного износа $T_{изн}$ определяется продолжительностью периода, в течение которого толщина стенки трубопровода $\delta_{ст}$ уменьшается до нормативной величины $\delta_{ост}$, устанавливаемой исходя из достаточной механической прочности трубопровода. В практической деятельности обычно принимают остаточную толщину трубопровода $\delta_{ост} = 4$ мм. Тогда, глубина эксплуатационного износа трубопровода $\delta_{изн}$ определяется по выражению:

$$\delta_{изн} = \delta_{ст} - \delta_{ост}, \text{ мм} \quad (3.22)$$

Срок эксплуатации трубопровода определяется из выражения:

$$T_{изн} = (\delta_{ст} - \delta_{ост}) / (3,6 \times \delta_h \times G_M), \text{ час} \quad (3.23)$$

Адекватность разработанной зависимости для расчета криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС оценивалась при сравнении результатов расчета с данными экспериментальных исследований, выполненных автором в Индийском институте технологий Дели. При исследовании параметров пневматического транспортирования и абразивного износа трубопроводов использовался кварцевый песок. Для исследования фракционного состава песка применялся метод расфевки на ситах. Масса пробы составила 199 грамм. Результаты расфевки песка приведены в таблице 3.18. При этом d_i – диаметр частиц песка i -

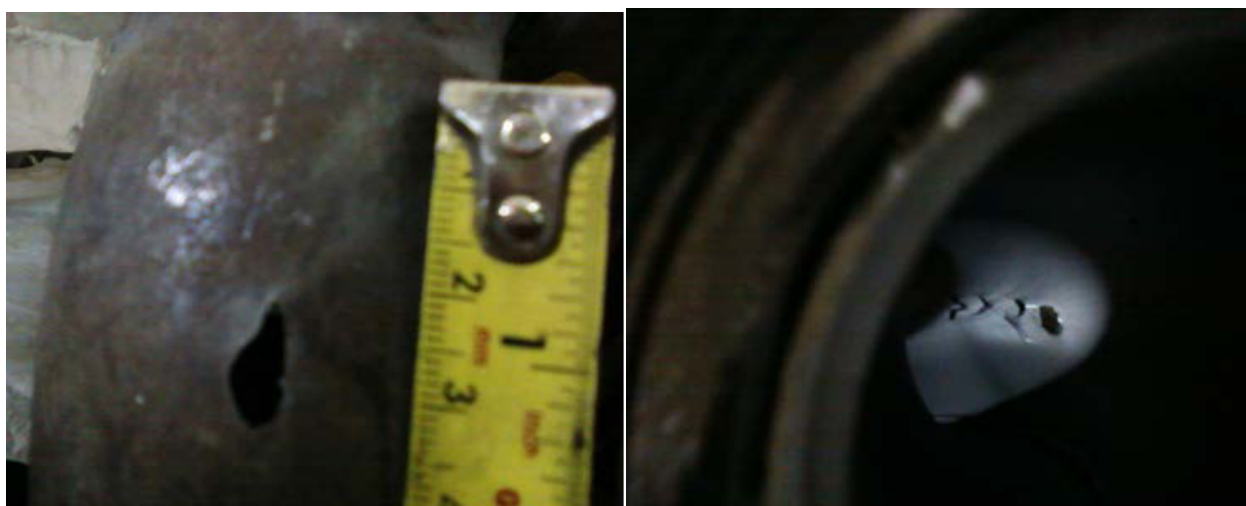
той фракции, мкм; m_i – содержание частиц песка i -той фракции, %. Средневзвешенный диаметр частиц песка $d_{ср.вз} = 144,09$ мкм.

Таблица 3.18 - Фракционный состав кварцевого песка

d_i , мкм	600- 500	500- 425	425- 355	355- 300	300- 212	212- 180	180- 150	150- 125	125- 106	106- 90	90-75	75-63	63-53	53-43	43-0
m_i , %	3,3	3,5	0,3	0,4	35,3	0,5	28,5	2,9	53,2	17,6	12,5	1,2	20,7	6,1	13

Результаты экспериментальных исследований абразивного износа колен поворотов пневмотранспортных трубопроводов

На рисунке 3.38 представлены фотографии эродированного колена №1 и колена №2. Продолжительность пневмотранспортирования до образования свища в колене №1 – 42 мин., в колене №2 – 49 мин. В первом случае потери массы металла составили 49 г, в втором – 72 г. Коэффициенты k_f , k_d , k_a и kR/D определены по зависимостям, описанным выше.



а) вид эродированного колена №1

б) вид эродированного колена №2 изнутри

Рисунок 3.38 - Фотографии эродированных колен

Исходные данные для расчета абразивного износа колена приведены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 - Исходные данные для расчета удельного абразивного износа колена поворота трубопровода пневмотранспортной установки

Транс- порти- руемый мате- риал	Материал трубопро- вода		G_m , кг/с	m , кг/кг	U , м/с	D , м	$d_{ср.вз}$, мм	ρ_m , кг/м ³	$P \cdot 10^5$, Па	t_m , °C	t_b , °C	% SiO ₂	k_f	k_d	k_a	$k_{R/D}$
	Марка	HV														
Кварце- вый пе- сок	Ст.37	210	1,09	21,8	23,6	0,068	144,09	1500	3,0	80	80	95	1,67	1,087	2,43	0,885

В результате расчета по формуле (3.21) была определена величина абразивного износа криволинейных участков трубопроводов, которая составила 0,81 мм/т. Согласно экспериментальным данным, выполненным автором при транспортировании кварцевого песка, было установлено, что износ составил 4 мм за 49 минут при расходе кварцевого песка 1,09 кг/с. Таким образом, колено было изношено после транспортирования 3 204,6 кг и величина удельного износа составила 0,80 мм/т. Таким образом, относительная погрешность расчетной зависимости составила 1,25%, что полностью удовлетворяет результатам экспериментального исследования.

Оценка сходимости результатов расчета по предложенной зависимости для определения величины абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с результатами расчетов по разработанным ранее формулам

Для проверки погрешности расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с учетом основных значимых факторов по предложенной зависимости (3.21) было произведено сравнение результатов расчета с разработанными ранее зависимостями (3.16) и (3.17). Исходные данные для расчета величины удельного линейного абразивного износа и срока эксплуатации криволинейных участков трубопроводов установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов приведены в таблице 3.20, а результаты расчета по зависимостям (3.16), (3.17) и (3.21) представлены в таблице 3.21.

Таблица 3.20 - Исходные данные для расчета величины удельного абразивного износа и срока эксплуатации криволинейных участков трубопроводов установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов

№ п/п	Транспортируемый материал	Примечания	α , град.	R/D	G_m , кг/с	m , кг/кг	$U_{экс}$, м/с	D , м	$d_0 \cdot 10^{-6}$, м	ρ_m , кг/м ³	ρ_v , кг/м ³	t_m , °C	t_v , °C	% SiO_2	k_f/k_d	Материал трубопровода	Источник данных
1.	песок	HV=160	30	8,0	30,56	5,0	30	0,15	220	2630	1,2	20	20	94	1,67/1,087	низкоуглеродистая сталь	[137]
2.	угольная пыль	HV=188	30	22,7	10,49	21,0	23	0,022	142	1200	0,995	100	100	6	0,92/0,98	керамический сплав С-8	[140]
6.	зола экибастузского угля	HV=135	30	7	5,52	4,1	18,2	0,197	66	2060	1,52	76	76	62	1,2/1,3	сталь 3	[129]

Расход золы или угольной пыли G_m , массовая концентрация пылевоздушного потока m , средняя по сечению скорость воздуха при движении пылевоздушной смеси в трубопроводе U , внутренний диаметр трубопровода D , средневзвешенная крупность d_0 и агрегатная плотность частиц транспортируемого материала ρ_m , плотность воздуха в трубопроводе ρ_v , температура транспортируемого материала t_m и воздуха t_v принимаются по фактическим данным или определяются в соответствии с [20]. Процентное содержание SiO_2 в транспортируемом материале принимается по результатам лабораторных исследований или по справочным данным.

Таблица 3.21 - Оценка погрешности-расчета величины абразивного износа криволинейных участков трубопроводов пневмотранспортных установок по формулам 3.16; 3.17; 3.21

№ п/п	Транспортируемый материал	$\delta_h \cdot 10^6$, мм/т, эксперимент	По формуле (3.16)		По формуле (3.17)		По формуле (3.21)	
			$\delta_h \cdot 10^6$, мм/т,	Погрешность расчета, %	$\delta_h \cdot 10^6$, мм/т	Погрешность расчета, %	$\delta_h \cdot 10^6$, мм/т	Погрешность расчета, %
1	Песок	0,00300	0,1500	4900,0	1,8260	60766,7	0,00274	8,7
3	Угольная пыль	0,00032	0,0183	5618,8	63,36	19799900,0	0,00044	37,5
4	Зола экибастузского угля	0,00012	0,0850	70733,3	0,3790	315733,3	0,00014	16,7
Среднеарифметическая погрешность, %			27084,0		6725466,7		21,0	

В таблице 3.22 приведены сведения о погрешностях определения параметров, влияющих на абразивный износ трубопроводов пневмотранспортных установок мелкодисперсных сыпучих абразивных полидисперсных материалов.

Таблица 3.22 - Погрешности определения основных факторов, влияющих на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов

№ п/п	Название параметра	Погрешность определения (класс точности) δ , %	Измерительный прибор (метод измерения)
1.	Расход транспортируемого материала G_m , кг/с	1,5	Динамометр ДОСМ-3-5
2.	Объемный расход воздуха Q_6 , м ³ /с	1,5	Дифманометр ДСП-786Н
3.	Диаметр трубопровода D , м	2,11*	—
4.	Твердость металла трубы по Виккерсу HV , МПа	3,0	Твердомер
5.	Средневзвешенный диаметр частиц материала d_0 , мкм	5,0	Рассеивание на ситах, пневмокласификация
6.	Содержание кремния, SiO_2 , %	1,0	Химический анализ
7.	Абсолютное давление в трубопроводе P , МПа	0,5	Датчик давления МЭД 2306
8.	Температура воздуха t_6 , °С	0,5	Лабораторный термометр
9.	Масса пробы M_n , кг	1,0	Аналитические весы
10.	Объем пробы V_n , м ³	1,0	Мерный сосуд
11.	Форма частиц	1,0	Анализатор фракционного состава Kamika
12.	Угол атаки α , град.	0,56	Угломер
13.	Радиус поворота трубы R	0,05	Математический расчет

* Примечание. В соответствии с [141] оценка погрешности диаметра трубопровода производится с учетом овальности и разностенности трубы. Относительная погрешность, связанная с овальностью трубы, составляет 1,25 % при $D > 219$ мм, разностенностью – 0,86 % при $D \geq 219$ мм и толщиной стенки трубы 15 мм.

В случае использования уточненных формул для расчета прямолинейных участков трубопроводов инструментальная погрешность при определении величины абразивного износа $\delta_h = f(U_m^2, K_{II}, k_{SiO_2}, k_f, m^{-0.4}, D^{-2}, k_{изн}^{-1})$.

Скорость несущего воздуха определяется по формуле:

$$U = \frac{Q_a}{\pi D^2 / 4} \quad (3.24)$$

Инструментальная погрешность определения U составляет:

$$\delta U = \delta U_{\text{м}} = \sqrt{\delta Q_a^2 + (2\delta D)^2} = 4,479 \%$$

Погрешность определения $\rho_{\text{м}}$:

$$\delta \rho_{\text{м}} = \sqrt{\delta M_n^2 + \delta V_n^2} = 1,414 \%$$

Погрешность определения K_{Π} :

$$\delta K_{\Pi} = \sqrt{\delta \rho_{\text{м}}^2 + \delta d_0^2} = 5,196 \%$$

Погрешность определения $\rho_{\text{в}}$:

$$\delta \rho_{\text{в}} = \sqrt{\delta P^2 + \delta t_a^2} = 0,707 \%$$

Погрешность определения $G_{\text{в}}$:

$$\delta G_{\text{в}} = \sqrt{\delta \rho_{\text{в}}^2 + \delta Q_{\text{в}}^2} = 1,658 \%$$

Погрешность определения m :

$$\delta m = \sqrt{\delta G_{\text{м}}^2 + \delta G_{\text{в}}^2} = 2,236 \%$$

Погрешность определения $k_{\text{изн}}$:

$$\delta k_{\text{изн}} = \sqrt{(2\delta HV)^2 + \delta HV^2} = 6,708 \%$$

Используя инструментальные погрешности, рассчитанные по вышеприведенным формулам, получаем окончательную инструментальную погрешность зависимости для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов δ_h :

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot \delta U_{\text{м}})^2 + \delta K_{\Pi}^2 + \delta k_{\text{SiO}_2}^2 + \delta k_f^2 + (0,4 \cdot \delta m)^2 + (2 \cdot \delta D)^2 + \delta k_{\text{изн}}^2}$$

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot 4,479)^2 + 5,196^2 + 1,0^2 + 1,0^2 + (0,4 \cdot 2,236)^2 + (2 \cdot 2,11)^2 + 6,708^2} = 13,15 \%$$

Инструментальная погрешность зависимости для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов δ_h рассчитывается следующим образом:

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot \delta U_{\text{м}})^2 + \delta K_{\Pi}^2 + \delta k_{\text{SiO}_2}^2 + (0,4 \cdot \delta m)^2 + (2 \cdot \delta D)^2 + \delta k_{\text{изн}}^2 + \delta k_{\alpha}^2 + \delta k_R^2 + \delta k_f^2}$$

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot 4,479)^2 + 5,196^2 + 1,0^2 + (0,4 \cdot 2,236)^2 + (2 \cdot 2,11)^2 + 6,708^2 + 0,56^2 + 0,05^2 + 1,0^2} = 13,16 \%$$

В результате проведенных исследований различных режимов пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих кремнийсодержащих материалов выявлены основные факторы, определяющие срок службы трубопроводов пневмотранспортных установок.

Разработаны формулы для определения коэффициентов, учитывающих содержание кремния, износостойкость трубы, коэффициенты формы и полидисперсности частиц.

Разработана формула для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов с учетом основных значимых факторов.

Разработана формула для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с учетом формы частиц, полидисперсности материала, угла атаки, радиуса поворота потока, диаметра трубы. Обе предложенных формулы сопоставлены с известными зависимостями по расчету абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков, на основании чего выявлено их качественное превосходство над существующими зависимостями.

Выполнена оценка определения инструментальной погрешности основных факторов, влияющих на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов, которая составила 13,16%.

Глава 4 Разработка мероприятий для защиты трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС от абразивного износа

4.1 Инновационные материалы и мероприятия для продления ресурса трубопроводов систем ЗШУ ТЭС, подверженных абразивному износу

Для снижения абразивного износа и продления срока эксплуатации трубопроводов систем ЗШУ ТЭС применяются следующие мероприятия, справедливые как для пневмо-, так и для гидротранспорта [142 - 144]:

- проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков трубопроводов вокруг своей оси;
- транспортирование золошлаков с оптимальными скоростями и концентрациями;
- оптимизация формы фасонных участков трубопроводов;
- выполнение участков гидродинамической стабилизации потока на входе и выходе из фасонных участков трубопроводов с учетом зоны максимального износа;
- применение антиабразивных вставок в колена поворотов трубопроводов;
- применение камнелитых изделий на фасонных участках трубопроводов;
- использование труб с алюмотермическим покрытием.

Проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков трубопроводов вокруг своей оси

Согласно [113, 144, 145] прямолинейные горизонтальные и наклонные участки трубопроводов внешнего золошлакоудаления, подверженные интенсивному абразивному износу, поворачивают вокруг своей оси на $90...120^\circ$, что позволяет продлить срок их эксплуатации в 3...4 раза по сравнению с исходным. На вертикально расположенных участках трубопроводов абразивный износ происходит равномерно по всей поверхности. Таким образом, осуществляя проворот

прямолинейных горизонтальных и наклонных участков трубопроводов вокруг своей оси в процессе их эксплуатации, можно увеличить объем транспортируемого материала не менее чем в 3 раза до их полной замены.

Выбор оптимальных режимов транспортирования потока с целью достижения максимального продления межремонтного срока эксплуатации трубопроводов

В случае эксплуатации трубопроводов без учета оптимальных скоростей и концентрации твердых частиц в несущей среде величина абразивного износа существенно возрастает. Так, например, согласно [147] абразивный износ трубопроводов прямо пропорционален скорости транспортирования золы в степени 2,5, а концентрации частиц золы в транспортирующей среде – в степени 0,65. Таким образом, для обеспечения максимальной долговечности трубопроводов необходимо выбирать минимально допустимые скорости транспортирования потока и оптимальные концентрации на наиболее изнашиваемых участках. Если скорость движения потока будет меньше критической, то более крупные частицы золы станут осаждаться на дно, и трубопровод будет зарастать. Образование "пробок" наиболее вероятно в компенсаторах, на поворотах, в люках и фланцевых соединениях. Следовательно, для нормальной работы напорного транспорта золошлаковых материалов необходимо, чтобы скорость движения потока была равна или несколько превышала критическую [147].

Согласно [146] оптимальные скорости пульпы представлены в таблице 4.1. Массовые концентрации золы (шлака) в пульпе обычно составляют от 5 до 20 %.

Таблица 4.1 - Значения оптимальных скоростей пульпы, м/с

Условный диаметр пульпопровода, м	Жидкий шлак с золой и без золы	Твердый шлак с золой и без золы	Золы
0,3	1,5...1,7	1,4...1,6	1,25...1,4
0,5	1,6...1,85	1,5...1,7	1,3...1,45
0,7	1,65...1,9	1,55...1,8	1,35...1,5

В России водозоловое соотношение в системах ГЗУ ТЭС составляет от 10

до 50 м³ воды на 1 т золошлаков [99]. Некоторые ученые считают, что при концентрациях твердых частиц в пульпе менее 60 % системы ГЗУ являются неэкономичными в связи с расходом большого количества воды и электроэнергии на перекачку пульпы. С другой стороны, транспортирование высококонцентрированной пульпы может привести к образованию пробок в пульпопроводах.

Участки аэро- и гидродинамической стабилизации потока

Участок гидродинамической стабилизации следует за разгонным участком, в пределах которого скорость частиц возрастает от минимального значения в точке ввода золы до постоянного значения. Для снижения абразивного износа трубопроводов рекомендуется местные сопротивления разделять прямолинейными участками и располагать их на расстоянии $l \geq (10...20) D$ друг от друга. При нарушении этого условия поток не успевает стабилизироваться, что приводит к росту гидродинамических потерь и повышению абразивного износа фасонных участков труб. Длина участка стабилизации потока равна:

$$L_{cm} = 40 \cdot D \quad (4.1)$$

Согласно [20] суммарная длина участка стабилизации потока в трубопроводе до и после местного сопротивления должна удовлетворять условию:

$$L_{stab} \geq 50 \cdot D \quad (4.2)$$

Интенсивному абразивному износу подвержены участки стабилизации потока не по всей длине, а только в частях, непосредственно прилегающих к возмущающим элементам трубопроводов. Поэтому, чтобы избежать частого ремонта или замены наиболее изнашиваемых участков трубопроводов, необходимо непосредственно на входе в фасонные участки и на выходе из них устанавливать патрубки с антиабразивным покрытием или с повышенной износостойкостью длиной $5...10 D$ каждый.

Оптимизация формы фасонных участков трубопроводов

Т.к. наиболее изнашиваемыми участками трубопроводов являются колена поворотов, тройники, переключатели и другая арматура, то при проектировании трубопроводов их число должно быть принято минимально возможным, а фасонные участки должны иметь оптимальные характеристики с точки зрения абразивного износа, аэро- и гидродинамики.

Форма диффузорного перехода с меньшего диаметра ступенчатого трубопровода на больший существенно влияет на величину потерь давления и абразивный износ как самого диффузорного перехода, так и прилегающих к нему участков. В соответствии с [93, 146] рекомендуемая форма перехода представлена на рисунке 4.1.

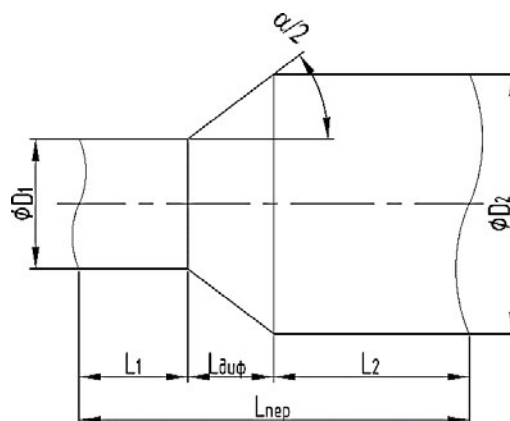


Рисунок 4.1 - Форма диффузорного перехода с меньшего диаметра труб на больший при ступенчатом выполнении трубопроводов: $L_{пер}$ – общая длина перехода с учетом длин участков гидродинамической стабилизации потока; $L_{диф}$ – длина диффузорного перехода; D_1 и D_2 – внутренние диаметры труб до и после диффузорного перехода; L_1 и L_2 – участки гидродинамической стабилизации потока до и после диффузорного перехода; α - угол диффузорного перехода.

Длина диффузорного перехода определяется из соотношения:

$$L_{диф} \geq \frac{D_2 - D_1}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{D_2 - D_1}{0,263} \quad (4.3)$$

где D_1 и D_2 – внутренние диаметры труб; α – угол диффузорного перехода.

Применение антиабразивных вставок в колена поворотов трубопроводов

При использовании антиабразивных вставок в фасонные участки трубопроводов скорость абразивного износа снижается. Снижение скорости износа зависит от материала вставок и на практике составляет не менее 20 % по сравнению с данными для таких же колен поворотов трубопроводов без вставок.

С развитием полимерных материалов активно стал применяться метод гуммирования, при котором создается защитный слой из пластика или полиуретана. Данный метод применяется в горнодобывающей промышленности. Стальная труба в данном случае играет роль опалубки. Такой метод позволяет увеличить срок службы пульпопровода в 4...6 раз [148].

Также для футеровки трубопроводов используется высокотехнологичный материал, в состав которого входит высокоглиноземистый цемент. Данные материалы имеют высокую прочность и низкую истираемость. Они могут эффективно противостоять гидроабразивному износу, что отмечено в [149].

Применение камнелитых изделий

Использование вставок из базальтового литья в фасонных участках и патрубках на участках гидродинамической стабилизации потока в пульпопроводах позволяет повысить их износо- и кислотостойкость.

Трубы и оборудование, футерованное каменным литьем, применяются как на российских, так и на зарубежных ТЭС, например, на Троицкой, Томь-Усинской, Сахалинской и Рефтинской ГРЭС.

При анализе результатов эксплуатации пневмотранспортных установок установлено, что межремонтный срок эксплуатации оборудования, защищенного каменным литьем, увеличивается в 4...6 раз. Использование каменного литья на металлургических предприятиях в количестве 30...36 тыс. т позволяет

экономить не менее 100 тыс. т металла в год. На каждой установленной тонне камнелитых изделий экономится 2...5 т металла и значительно сокращается объем ремонтных работ на трубопроводах. Однако, применение труб с камнелитыми изделиями в условиях резко континентального климата на большей части России имеет следующие основные недостатки [150]:

- растрескивание камнелитых вкладышей вследствие изменений геометрических размеров фасонных участков из-за высоких температурных перепадов в процессе эксплуатации и вылушивание отдельных фрагментов вкладышей в трубопровод, что зачастую приводит к его завалу;
- необходимость установки «мертвых опор» для жесткой фиксации фасонных участков трубопроводов во избежание негативных последствий;
- необходимость установки температурных компенсаторов на прямолинейных участках трубопроводов для компенсации изменения линейных размеров трубопроводов из-за температурных перепадов;
- очень жесткие требования к транспортировке и хранению камнелитых изделий, а также к качеству монтажных работ при строительстве и ремонте пневмотранспортных и гидротранспортных трубопроводов.

Использование труб с алюмотермическим покрытием

Алюминотермия представляет собой технологию получения металлов и сплавов восстановлением оксидов металлов алюминием, которое происходит согласно реакциям с выделением большого количества теплоты:



Шихта из порошкообразных материалов засыпается в плавильную шахту или тигель и поджигается с помощью запальной смеси. Если при восстановлении выделяется много теплоты, осуществляется внепечная алюминотермия, без подвода тепла извне, развивается высокая температура (1900...2400°C), процесс

протекает с большой скоростью, образующиеся металл и шлак хорошо разделяются. Если теплоты выделяется недостаточно, в шихту вводят подогревающую добавку или проводят плавку в дуговых печах (электropечная алюминотермия).

Нанесение алюмотермического покрытия на трубопроводы позволяет защитить их от абразивного износа, химической и высокотемпературной коррозии. Трубные изделия могут применяться для напорного гидро- и пневмотранспортирования различных абразивных материалов, в том числе в среде различных газов при температуре до 1000°C, а также химически агрессивных флюидов.

Толщина износостойкого покрытия составляет 8...20 мм и регулируется количеством шихты засыпаемой в полость трубы.

Из упрочненных труб изготавливаются различные трубные колена, блоки трубопроводов посредством плазменно-дуговой резки труб на сектора, мерные участки и последующей сварки.

Износостойкое покрытие обладает высокими показателями микротвердости (2000...3000 кгс/мм²) и коррозионной стойкостью.

Срок службы труб после упрочнения увеличивается не менее чем в 8...10 раз по сравнению с неупрочненными. Это подтверждается длительным опытом эксплуатации упрочненных труб на имеющемся на Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном комбинате при транспортировке железорудного концентрата.

Износостойкие трубы установлены на ТЭС Павлодарской энергосистемы. Освоено упрочнение внутренних поверхностей труб диаметрами 219, 273, 325, 420, 530 мм и изготовление из них трубных колен и блоков пневмо- и гидрозолошлакопроводов, работающих в условиях интенсивного абразивного износа при транспортировании угольной пыли и сырого угля, золы и золошлаковой пульпы. Отработан процесс упрочнения труб, находившихся в эксплуатации с остаточной толщиной стенки не менее 4 мм. Из упрочненных труб изготовлено и смонтировано более 50 пылепроводов от сепараторов ММТ до горелок котлов БКЗ 420-149 Павлодарской ТЭЦ-3, точки сырого угля; трубные колена и прямые участки на трубопроводы для транспортировки сухой золы Ермаковской ГРЭС,

блоки пылезолопроводов и гидрозолошлакопроводов для Павлодарских ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, Ермаковской ГРЭС (ныне Аксусская электростанция, Казахстан) и Рефтинской ГРЭС.

В таблице 4.2 приведены сравнительные свойства труб, изготовленных из серого чугуна, с использованием каменного литья и с алюмотермическими покрытиями согласно [151]. Сравнительные характеристики алюмотермического покрытия с другими материалами (износостойкое каменное литье, серый чугун) демонстрируют, что алюмотермическое покрытие имеет лучшие характеристики, определяющие сопротивление износу (износостойкость в 15 раз выше по сравнению с литым базальтом, более высокая твердость). Испытания на теплостойкость показали устойчивость керамического покрытия при температуре 1200°C, а также удовлетворительную термостойкость (выдерживает термоудар не менее 2-х раз при погружении трубы с покрытием, имеющей температуру 800 °C в воду с температурой 20°C). Цена за 1 п.м труб, защищенных каменным литьем, составляет в 1,8 раз больше цены за 1 п.м. труб с алюмотермическим покрытием.

Алюмотермическое покрытие в торцевой зоне устойчиво к воздействию электросварки (отсутствие сколов и разрушений), что позволяет производить соединение трубных элементов с покрытием не только посредством фланцев, но и электросварки.

Алюмотермическое покрытие по сравнению с камнелитым материалом также имеет лучшую кислотостойкость в соляной и серной кислотах.

Таким образом, по сравнению с каменным литьем, наиболее часто применяемым для защиты трубопроводов от абразивного износа в разных странах, серым чугуном, трубы, упрочненные алюмотермическим покрытием, являются оптимальными исходя из следующих факторов:

- износостойкость;
- теплостойкость (испытанная устойчивость до 1200 °C);
- термостойкость (не менее двух термоударов от 800 °C в воду при 20 °C);
- толщина покрытия регулируется от 2 до 8 мм;

- устойчивость к воздействию электросварки;
- высокие кислото- и коррозионная стойкость;
- стоимость.

Таблица 4.2 - Сравнительные параметры труб с антиабразивными покрытиями

Параметр	Алюмотермическое покрытие	Износостойкое каменное литье	Серый чугун СЧ 12-28
Толщина покрытия δ , мм	3...4	20	-
Плотность покрытия ρ , г/см ³	2,9	3,0	7,2
Водопоглощение W, %	0,09	0,13	не опред.
Предел прочности при сжатии $\sigma_{в.сж}$, МПа	300...340	250...500	500
Предел прочности при изгибе $\sigma_{в.изг}$, МПа	70...110	30...50	280
Ударная вязкость КС, кДж/м ²	1,50	1,25	3,00
Модуль упругости E, МПа	102000	100630	120000
Коэффициент Пуассона μ	0,25	0,25	не опр.
Износостойкость, г/см ²	0,02	0,30	0,79
Твердость по Моосу	8...9	7...8	не опр.
Микротвердость HV, ГПа	15...18	5...9	не опр.
Термостойкость, кол-во теплосмен от 800°C до 20°C на воздухе	не менее 10	1	не опр.
Термостойкость, количество теплосмен, закалка от 800°C до 20°C в воду	не менее 2	трескается	не опр.
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C), при 20° C	2,10	1,52	51,00
Удельная теплоемкость C, кДж/(кг·°C) при 20°C	1,06	0,77	0,46
Температурный коэффициент линейного расширения при 20°C, 10-6K-1	8,1	83	132
Кислотостойкость, 20%-ная HCl, %	98	89	не опр.
Кислотостойкость, H ₂ SO ₄ (96%), %	99	97	не опр.

В настоящее время технология промышленного производства труб с алюмотермическим (керамическим) покрытием и фасонных участков является освоенной. Покрытия наносятся на прямые трубы длиной до 2140 мм по ТУ [152], из которых также изготавливаются фасонные участки (отводы, тройники и крестовины) со следующими основными стандартными размерами:

- прямые трубы с внешним диаметром от 60 до 530 мм и толщиной керамического (алюмотермического) покрытия $8,5 \pm 0,5$ мм;
- различные углы поворота потока фасонных участков.

Трубы с алюмотермическим покрытием применяются в системах ГЗУ Павлодарских ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 с 1983 г., пылеподачи Рефтинской ГРЭС с 1984 г. и ПЗУ Аксусской ЭС с 1989 г. Кроме того, прямые и фасонные участки пылепроводов с алюмотермическим покрытием также успешно используются на следующих предприятиях:

- АО «Челябинский цинковый завод»: пневмотранспорт прокаленной вельцокиси;
- ООО «Тобольскнефтехим»: пневмотранспорт катализатора, температура до 650°С; циклоны Ø140-331x12, высота 556 мм, сталь 12X18H10T;
- ОАО «Малышевское рудоуправление»: струйные мельницы измельчения слюды; разгонные трубки Ø67x8 мм, длина 600 мм;
- АО «Невинномысский Азот»: пневмотранспорт катализатора; $t=450^{\circ}\text{C}$; отводы 45° и 90°, радиус 450...800 мм, труба Ø102 мм;
- ООО «ГермеС», г. Красноярск: гидротранспорт глинозема; различные элементы из труб Ø146; 127; 95 и 89.

На сегодня отсутствуют данные о замене или ремонте ранее установленных участков трубопроводов с алюмотермическим покрытием, т.к. их эксплуатация продолжается. Это объясняется тем, что трубопроводы с алюмотермическим покрытием обладают существенно большей абразивной стойкостью по сравнению с трубопроводами, выполненными из других материалов. Это относится не только к прямолинейным, но и к фасонным участкам трубопроводов. Оценочный срок службы трубопроводов с алюмотермическим покрытием по мнению представителей предприятия-изготовителя не менее, чем в 10 раз больше по сравнению с трубопроводами, выполненными из стали марки Ст.5. На основании выполненных исследований согласно [93] и [154], величина коэффициента относительной износостойкости труб с алюмотермическим покрытием находится в диапазоне 300...400.

Масштабного промышленного применения труб с алюмотермическим покрытием в энергетике и различных отраслях промышленности России до настоящего времени нет, несмотря на примеры их высокоэффективного применения

для гидро- и пневмотранспорта промышленной пыли, угольной пыли и золошлаков ТЭС и других абразивных полидисперсных материалов с 1983 г. на территории РФ и Казахстана.

Максимальный эффект по защите трубопроводов систем ЗШУ ТЭС от абразивного износа наблюдается от внедрения комплексной технологии, сочетающей в себе оптимизацию геометрической формы участков трубопроводов с участками стабилизации потока на входе в колено и выходе из него с нанесением алюмотермического покрытия. Особенно это касается фасонных участков трубопроводов, наиболее подверженных износу при транспортировании абразивных материалов. Для подтверждения этого, а также с целью масштабного внедрения комплексной технологии по защите трубопроводов систем ЗШУ ТЭС разработаны оптимальные формы поворотов трубопроводов систем гидрозолоудаления Хабаровской ТЭЦ-3 с участками стабилизации потока, на один из которых было нанесено алюмотермическое покрытие, после чего проведено обследование пилотного участка для оценки и контроля его состояния и износа.

4.2 Разработка усовершенствованной формы поворотов трубопровода с углом отклонения потока на 90, 75, 60 градусов для минимизации абразивного износа

Исходное стальное колено поворота потока на 75 градусов состоит из 4 сегментов (рисунок 4.2).

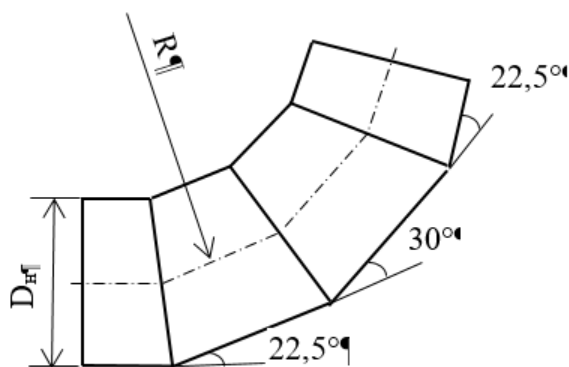


Рисунок 4.2 - Вид сварного колена поворота потока на 75 градусов

Маркус [155], проводя опыты с песком диаметром $d = 60 \dots 125$ мкм при скорости 180 км/ч, установил максимум износа при угле атаки 20° (рисунок 4.3). Исследуя износ патрубков трубопроводов, Утида [156] определил, что наиболее интенсивный износ происходит со стороны входа в том месте, где угол падения сыпучего материала составляет примерно $25 \dots 30^\circ$. Согласно [134] это угол обычно $20 \dots 30^\circ$. В.Н. Кащеев [157], исследуя износ труб поверхностей нагрева котлов, пришел к выводу, что угол атаки удара максимального износа зависит от вида, формы, величины и влажности абразивного зерна и для мягкой стали заключается между $30 \dots 42^\circ$. В [136] этот диапазон составляет $10 \dots 40^\circ$. Деформационный износ протекает в результате выкрашивания поверхности труб, и он максимален для хрупких материалов (стекло, керамика) при угле атаки в 90° (рисунок 4.3).

Абразивный износ образца из низкоуглеродистой стали в диапазоне углов атаки $20 \dots 90^\circ$, среднем размере частиц песка 220 мкм и скорости воздуха 30, 60, 80 м/с показан на рисунке 4.4 [137]. По мнению большинства авторов, наибольший износ имеет место при углах атаки, равных примерно 30° , а при углах атаки меньше 15° абразивный износ резко снижается, что подтверждается данными, представленными на рисунке 4.4.

Большинство авторов [132, 133, 135, 136, 155] строят свои теории на основе 2-х видов износа: режущего и деформационного. Режущий износ происходит в результате царапания поверхности трубопровода частицами. Он характерен для пластичных материалов (металлы), и основной износ происходит при углах атаки $10 \dots 42^\circ$.

На рисунке 4.5 приведена зависимость величины износа стального колена с радиусом поворота 650 мм ($R/D=5,2$) от угла поворота потока α ($\alpha=0$ на входе потока в колено и $\alpha=90^\circ$ при выходе потока из колена).

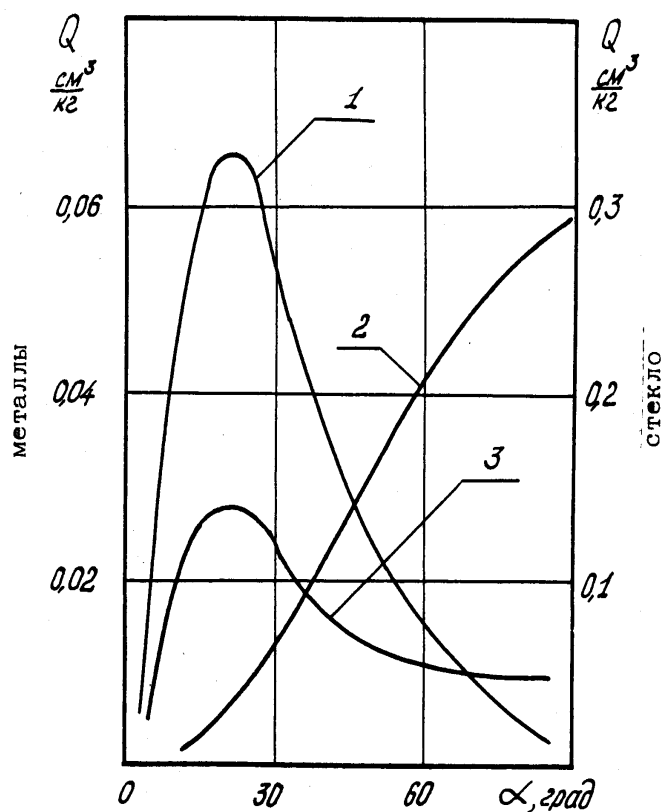


Рисунок 4.3 - Влияние угла атаки потока частиц на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов (зависимости 1, 2 – характерны для металлов, зависимость 3 – для стекла)

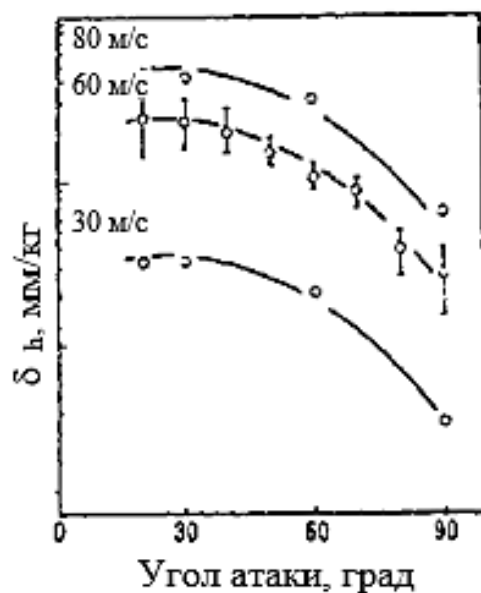


Рисунок 4.4 - Влияние угла атаки на величину удельного линейного абразивного износа мишени из низкоуглеродистой стали при различных скоростях частиц песка

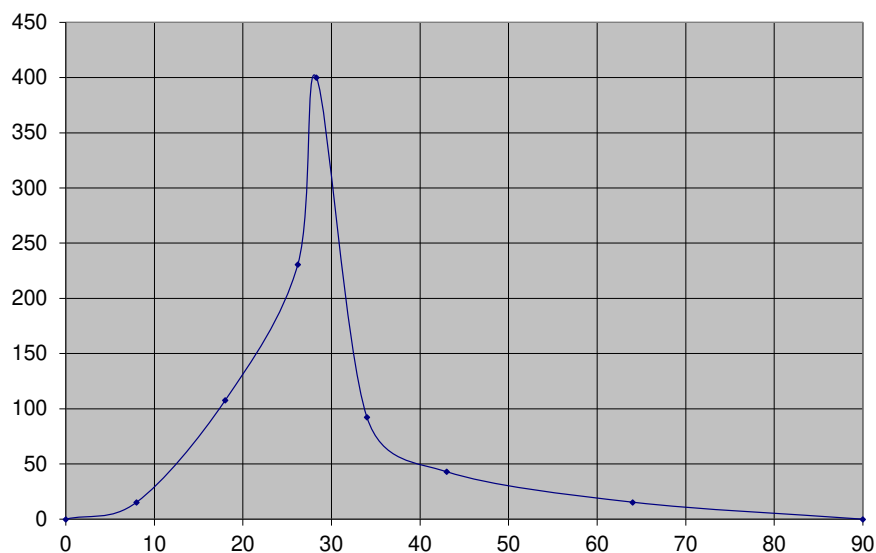


Рисунок 4.5 - Зависимость скорости износа стального колена от угла поворота потока (скорость воздуха 35,3 м/с; концентрация пыли 2,3 кг/кг)

Анализируя приведенные экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что износ металла трубы увеличивается при углах поворота потока от $7,5^\circ$.

При обработке результатов исследований, представленных выше, было установлено, что основной износ колена происходит в зоне внешней образующей при угле атаки транспортируемого потока к поверхности колена $\alpha = 7,5...45^\circ$. При этом максимальный износ находится в зоне внешней образующей при $\alpha = 25...28^\circ$, а градусная мера дуги области интенсивного абразивного износа в поперечном сечении колена составляет примерно 70° . В области внутренней образующей колена абразивный износ практически отсутствует [93]. Эти данные и были взяты в основу разработки усовершенствованной формы криволинейных участков трубопроводов с целью минимизации абразивного износа.

Анализируя аэродинамические характеристики и данные по абразивному износу криволинейных участков при движении мелкодисперсных сыпучих материалов в пневмотранспортных трубопроводах установлено, что при углах поворота потока в сегментах колена 15° и менее (угол атаки $7,5^\circ$ и менее):

- скорость абразивного износа элемента колена пылепровода снижается в 4 и более раз по сравнению со скоростью износа при угле атаки $\alpha = 25...28^\circ$;

- аэродинамическое сопротивление колена пылепровода уменьшается в 1,5...2,0 раза в связи с отсутствием областей повышенной турбулентности из-за отрыва потока от поверхности колена по всему поперечному сечению.

Те же самые выводы справедливы в случае абразивного износа пульпопроводов систем ГЗУ, что и было заложено при разработке эскизов колен поворотов пульпопроводов.

Автор рекомендует выполнять колена трубопроводов с углом поворота трубопровода на 90° по эскизу, представленному на рисунке 4.6. Такая форма колена позволяет значительно уменьшить не только скорость абразивного износа, но и существенно снизить аэродинамические потери в колене. Последнее обстоятельство является весьма важным для снижения общих потерь давления в пневмотранспортных трубопроводах сложной конфигурации с большим числом поворотов. Такая оптимальная форма поворотов рекомендуется при выполнении колен из любых материалов труб, независимо от их антиабразивных свойств.

На рисунке 4.7 показаны элементы колена на входе в поворот трубопровода, а на рисунке 4.8 - элементы колена на выходе из поворота трубопровода, где: 1 – первый элемент колена, являющийся торцем трубы конечного прямолинейного участка трубопровода перед поворотом; 2 - 7 – отдельные элементы колена; 8 – восьмой элемент колена, являющийся торцем трубы начального прямолинейного участка трубопровода после поворота; D_n – наружный диаметр трубопровода; $\alpha_1 = 7,5^\circ$ - угол между осями первого и второго элементов колена; $\alpha_2 = 15^\circ$ - угол между осями элементов колена со второго по седьмой; $\alpha_3 = 7,5^\circ$ - угол между осями седьмого и восьмого элементов колена

Согласно [158] при изменении направления трассы пульпопровода до 30° радиус в углах поворота должен быть не менее трех, более 30° до 45° - не менее пяти, более 45° до 90° - не менее семи диаметров пульпопровода.

В соответствии с [159] при расчетах следует учитывать, что износ в стыковых соединениях труб, особенно во фланцевых и быстроразъемных, на 25...50% больше износа на прямолинейных участках.

Согласно техническим условиям [160] в случае гидротранспорта абразивных материалов предпочтительно применение изделий с отношением $R:D_y=3$.

В соответствии с техническими условиями [161] длина стабилизационных участков на входе в колено поворота трубопровода и выходе из него должна составлять не менее 2500 мм для труб номинальным диаметром свыше 426 мм. Интенсивному абразивному износу в соответствии с [93] подвержены участки стабилизации потока не по всей длине, а только в частях, непосредственно прилегающих к возмущающим элементам трубопроводов. Поэтому, чтобы избежать частого ремонта или замены наиболее изнашиваемых участков трубопроводов, необходимо непосредственно на входе в фасонные участки и на выходе из них устанавливать патрубки с антиабразивным покрытием или с повышенной износостойкостью длиной не менее $5D$ каждый. На эти участки и рекомендуется нанести износостойкое алюмотермическое покрытие.

Исходя из гидродинамических характеристик золочой пульпы с целью минимизации абразивного износа в пульпопроводах системы ГЗУ, с одной стороны, и экономии средств на выполнение труб с алюмотермическим покрытием, с другой стороны, принято решение о необходимости и достаточности выполнения колен поворотов пульпопроводов с радиусом поворота, равным 3 диаметрам пульпопровода.

Рекомендации по компоновке параллельных трубопроводов на поворотах

Для сохранения оптимальных параметров колен трубопроводов на поворотах при их параллельной прокладке рекомендуется разводку трубопроводов осуществлять за счет увеличения длин элементов колен со второго по седьмой при неизменности угла α_1 . При этом трассировку поворотов трубопроводов необходимо начинать с трубопровода с минимальным радиусом поворота. Уменьшение длин элементов колена поворота трубопровода с наименьшим радиусом поворота по сравнению с расчетными не допускается.

Оптимальные параметры тройников, переключателей и других криволинейных участков трубопроводов

При выполнении криволинейных участков трубопроводов отдельные их элементы должны выполняться таким образом, чтобы угол атаки потока частиц транспортируемого материала в любом элементе не превышал $7,5^\circ$.

Разработка эскиза оптимальной формы поворота пульпопровода с углом отклонения потока на 90° градусов

На основании анализа источников научно-технической информации и собственных результатов исследований по вопросу оптимизации формы поворотов колен пульпопроводов установлено, что отношение R/D при гидротранспорте зольной пульпы должно быть не менее 3, однако, и этого недостаточно. Для снижения гидравлического сопротивления в колене поворота, а также возмущений потока до и после поворота, снижения воздействия пульпы на сварные стыки сегментов колена оптимальным отношением является $R/D=5$. При меньшем отношении R/D существенно увеличивается гидравлическое сопротивление в колене поворота, повышается возмущение потока до и после поворота пульпопровода, а поток, не успевая стабилизироваться, воздействует на сварные стыки сегментов, приводя к их повышенному абразивному износу. Все это является результатом снижения надежности и долговечности отдельных стыков и колена в целом.

Обязательным условием оптимизации формы колена поворота пульпопровода является наличие участков внутренней стабилизации потока на входе в колено и выходе из него. На основании собственных исследований установлено, что длины участков внутренней стабилизации на входе в поворот и выходе из него составляет по $2D_{\text{нар}}$, что позволяет застабилизировать и плавно развернуть поток перед входом в колено и выходом из него.

Еще одним условием оптимизации формы колена поворота пульпопровода

является переменный (непостоянный) радиус поворота колена. Он определяется геометрическим путем исходя из длин сегментов колена и углов отклонения потока в сегментах. Длины первого и последнего сегментов колена равны $D_{\text{нар}}$, т.е. $l_1 = l_8 = 530^\circ \text{мм}$. Для стабилизации потока перед поворотом и выходе из него необходима установка внешних участков гидродинамической стабилизации. Длина упомянутых участков должна составлять не менее $5D_{\text{нар}}$. При наличии первого горизонтального и последнего вертикального сегментов поворота длинами, равными $D_{\text{нар}}$ возможна установка участков гидродинамической стабилизации потока до входа в колено и выходе из него длинами по $4D_{\text{нар}}$. Таким образом, с учетом длин первого и последнего сегментов поворота длины участков внешней гидродинамической стабилизации потока составляют $5D_{\text{нар}}$.

Угол отклонения потока во втором и седьмом сегментах l_2 и l_7 составляет по $7,5^\circ$. При таком угле поворота поток разворачивается плавно, что не приводит к повышенной его турбулизации и срыву потока в зоне стыков. В сегментах с третьего по шестой угол поворота потока составляет 15° , т.е. $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 15^\circ$. При угле поворота потока более 15° поток турбулизуется, что приводит к увеличению абразивного износа в данной зоне и повышенному гидравлическому сопротивлению.

Пульпопровод усовершенствованной формы с углом поворота потока 90° состоит из 8 участков: первого горизонтального, восьмого вертикального и шести трапециевидных сегментов. Для данного случая разработан эскиз оптимальной формы поворота пульпопровода при $R/D=5$. Длины сегментов и углы отклонения потока в случае поворота потока на 90° определяются следующим образом:

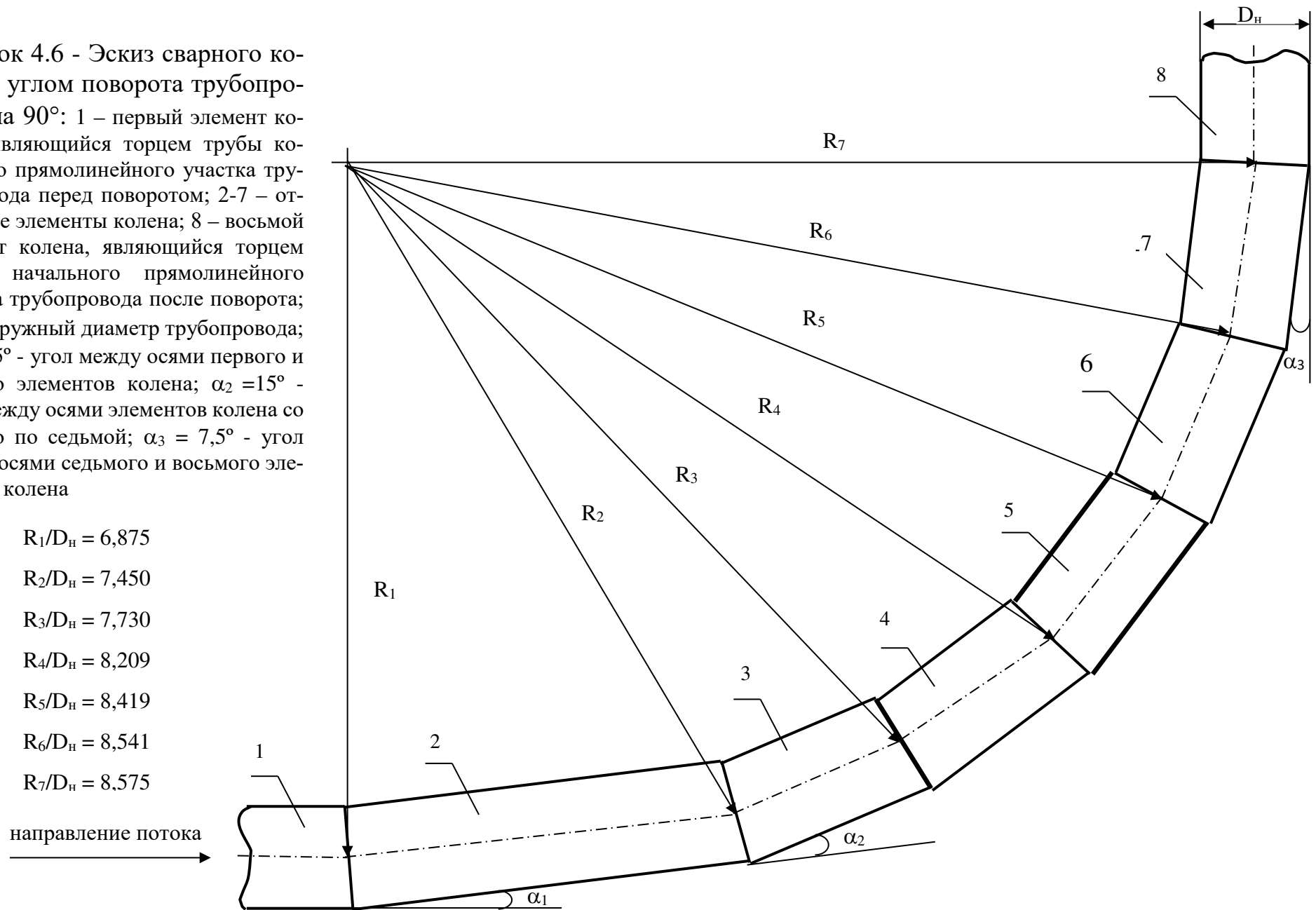
1. Длина окружности составляет $2\pi R$, где $R=5D$, а D – наружный диаметр поворота пульпопровода, т.е. $R=5 \cdot 530 + 265 = 2915$ мм.
2. Длина колена поворота на угол 90° составляет $\pi R/2$.
3. Число трапециевидных сегментов равно 6. Делим длину колена поворота на 6 равных частей. Таким образом, длина одного трапециевидного сегмента составляет $\frac{1}{2} \pi R/6 = 762,8$ мм.

4. Увеличиваем длины второго и седьмого сегментов с учетом внутренней зоны стабилизации потока до $2D_{\text{нар.}}$, т.е. $l_2 = l_7 = 2 \cdot 530 = 1060$ мм.
5. $l_3 = l_4 = l_5 = l_6 = 762,8$ мм.
6. Угол отклонения правого торца первого сегмента от вертикали $\alpha_1 = \frac{1}{2} \cdot 7,5^\circ = 3,75^\circ$.
7. Угол отклонения верхнего торца седьмого сегмента от горизонтали $\alpha_8 = \frac{1}{2} \cdot 7,5^\circ = 3,75^\circ$.
8. Углы отклонения потока в сегментах 3 - 6 составляет 15° .

На рисунках 4.9 - 4.18 представлены разработанные эскизы колен пульпопроводов при повороте потока на 90, 75 и 60 градусов при различных соотношениях радиусов поворотов к диаметру трубы.

Результаты исследований по разработке усовершенствованной формы поворотов пульпопроводов, футерованных алюмотермическим покрытием, защищены двумя патентами [162, 163] (Приложения Б и В).

Рисунок 4.6 - Эскиз сварного колена с углом поворота трубопровода на 90° : 1 – первый элемент колена, являющийся торцом трубы конечного прямолинейного участка трубопровода перед поворотом; 2-7 – отдельные элементы колена; 8 – восьмой элемент колена, являющийся торцом трубы начального прямолинейного участка трубопровода после поворота; D_H – наружный диаметр трубопровода; $\alpha_1 = 7,5^\circ$ - угол между осями первого и второго элементов колена; $\alpha_2 = 15^\circ$ - угол между осями элементов колена со второго по седьмой; $\alpha_3 = 7,5^\circ$ - угол между осями седьмого и восьмого элементов колена



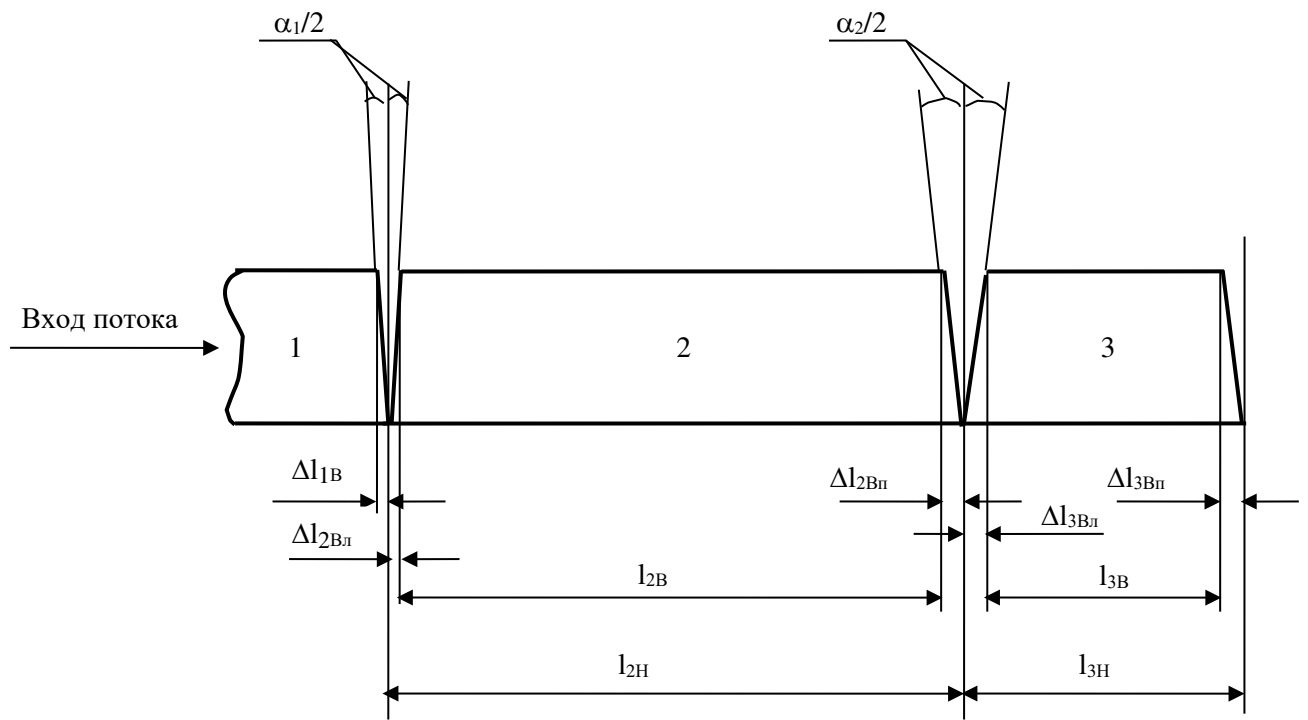


Рисунок 4.7 - Элементы колена на входе потока в поворот трубопровода

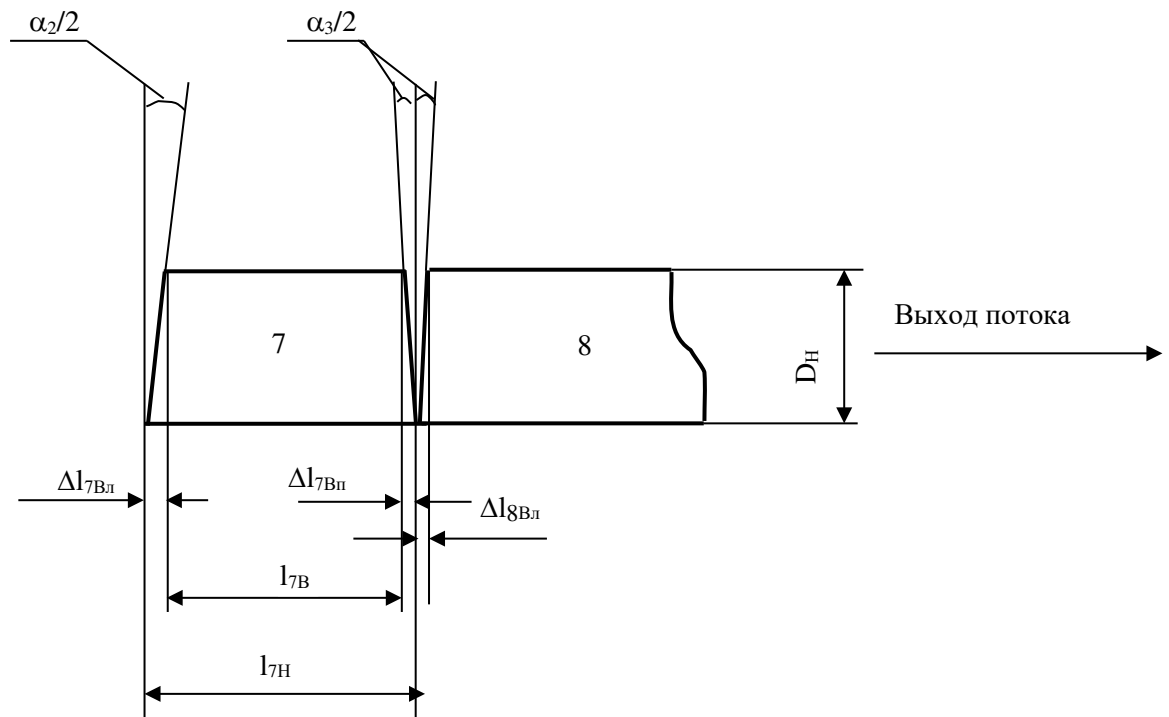
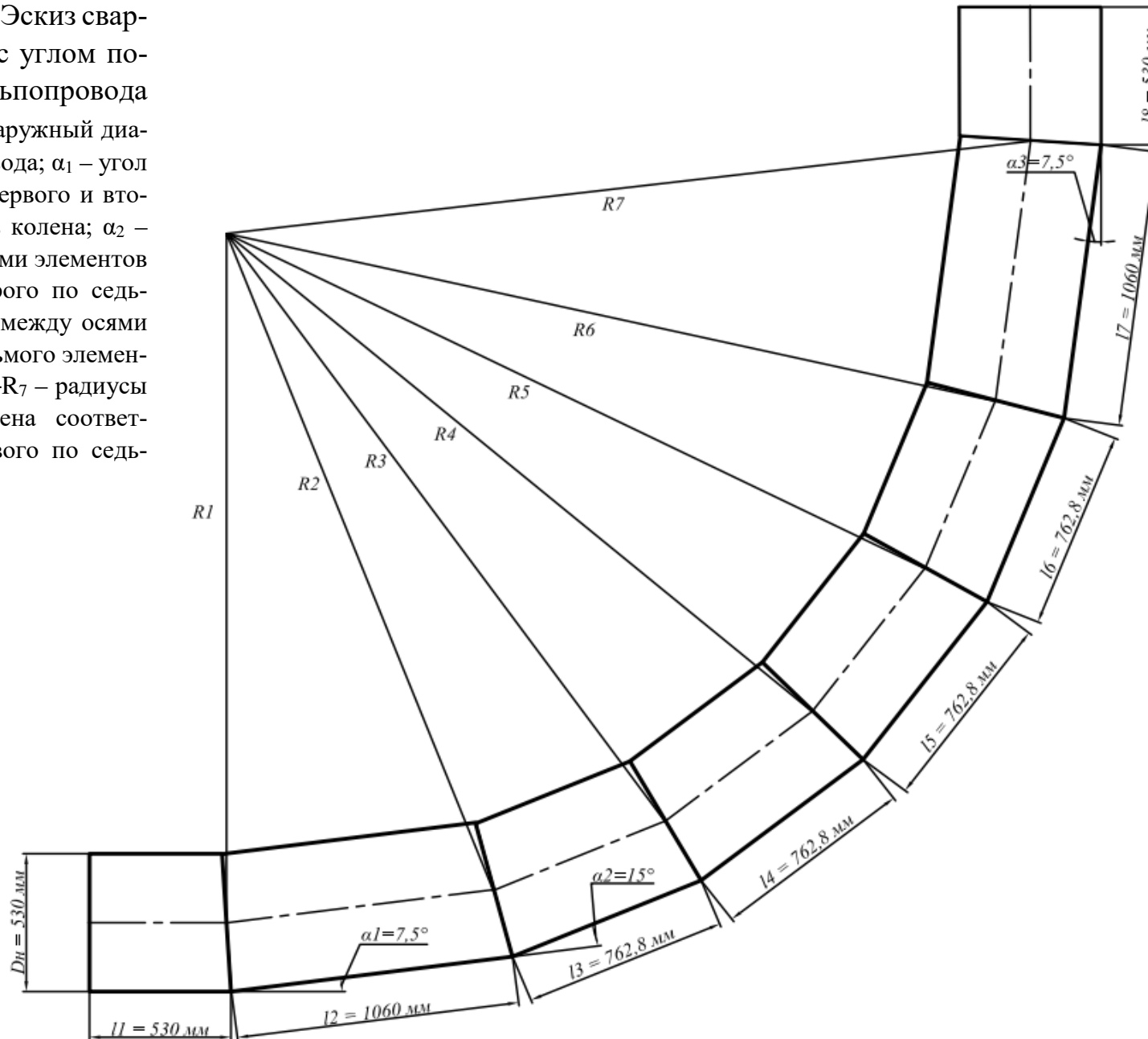


Рисунок 4.8 - Элементы колена на выходе потока из поворота

Рисунок 4.9 - Эскиз сварного колена с углом поворота пульпопровода на 90° : D_H – наружный диаметр трубопровода; α_1 – угол между осями первого и второго элементов колена; α_2 – угол между осями элементов колена со второго по седьмой; α_3 – угол между осями седьмого и восьмого элементов колена; $R_1 \div R_7$ – радиусы элементов колена соответственно с первого по седьмой



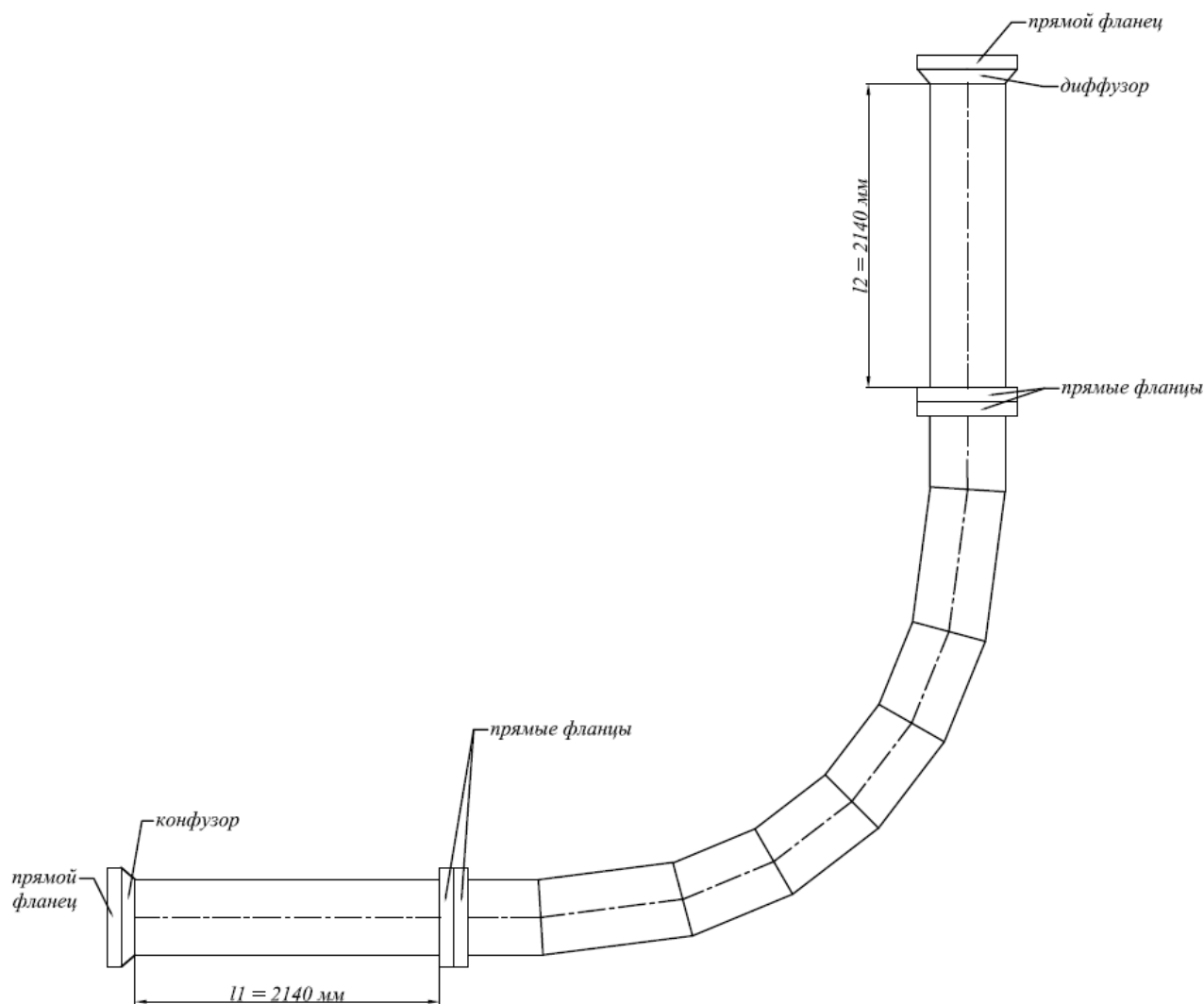


Рисунок 4.10 - Эскиз поворота пульпопровода на 90° с участками внешней стабилизации

Разработка эскиза усовершенствованной формы поворота пульпопровода с углом отклонения потока на 75° градусов

Для этого случая проведен расчет по трем вариантам R/D : $R/D=3$, $R/D=4$, $R/D=5$.

При создании эскиза усовершенствованной формы поворота пульпопровода при отклонении потока на 75° градусов нужно убрать один сегмент с углом поворота потока на 15° градусов.

1. Для форм поворота пульпопровода на 60° , 75° и 90° с отношением $R/D=5$

определение геометрических размеров сварного колена получается равным.

2. Определение геометрических размеров элементов сварного колена усовершенствованной формы поворота пульпопровода на 75° с отношением $R/D=4$

1) Длина окружности составляет $2\pi R$, где $R=4D$, а D – наружный диаметр поворота пульпопровода, т.е. $R=4*530+265=2385$ мм.

2) Угол между осями первого и второго элементов колена принят равным $7,5^\circ$; угол между осями элементов со второго по шестой $\alpha_2 = 15^\circ$; угол между осями шестого и седьмого элементов колена $\alpha_3 = 7,5^\circ$.

3) Размеры 1-ого элемента колена

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 1-ого элемента колена:

$$\Delta l_{1в} = \operatorname{tg}(\alpha_1/2) \times D_H = \operatorname{tg}3,75^\circ \times 530 = 34,738 \text{ мм}$$

Получается, что $l_{1н} = 530$ мм, а $l_{1в} = 530 - 34,738 = 495,26$ мм.

4) Размеры 2-ого и 6-ого элементов колена

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 2-ого и 6-ого элементов колена в районе левого торца:

$$\Delta l_{2вл} = \Delta l_{6вл} = \operatorname{tg}(\alpha_1/2) \times D_H = \operatorname{tg}3,75^\circ \times 530 = 34,738 \text{ мм}$$

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 2-ого и 6-ого элементов колена в районе правого торца:

$$\Delta l_{2вп} = \Delta l_{6вп} = \operatorname{tg}(\alpha_2/2) \times D_H = \operatorname{tg}7,5^\circ \times 530 = 69,776 \text{ мм}$$

Получается, что $l_{2н} = l_{6н} = 1060$ мм, а $l_{2в} = l_{6в} = 1060 - 34,738 - 69,776 = 955,49$ мм.

5) Размеры 3-ого, 4-ого и 5-ого элементов колена

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 3-ого, 4-ого и 5-ого элементов колена в районе левого торца:

$$\Delta l_{3вл} = \Delta l_{4вл} = \Delta l_{5вл} = \operatorname{tg}(\alpha_2/2) \times D_H = \operatorname{tg}7,5^\circ \times 530 = 69,776 \text{ мм}$$

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 3-ого, 4-ого и 5-ого элементов колена в районе правого торца:

$$\Delta l_{3вп} = \Delta l_{4вп} = \Delta l_{5вп} = \operatorname{tg}(\alpha_2/2) \times D_H = \operatorname{tg}7,5^\circ \times 530 = 69,776 \text{ мм}$$

Получается, что $l_{3н} = l_{4н} = l_{5н} = 748,9$ мм, а $l_{3в} = l_{4в} = l_{5в} = 748,9 - 2 \times 69,776 = 609,35$ мм.

Определение геометрических размеров элементов сварного колена усовершенствованной формы с поворотом пульпопровода на 75° и отношением $R/D=3$

1) Длина окружности составляет $2\pi R$, где $R=3D$, а D – наружный диаметр поворота пульпопровода, т.е. $R=3*530+265=1855$ мм.

2) Размеры 3-ого, 4-ого и 5-ого элементов колена

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 3-ого, 4-ого и 5-ого элементов колена в районе левого торца:

$$\Delta l_{3вл} = \Delta l_{4вл} = \Delta l_{5вл} = \operatorname{tg}(\alpha_2/2) \times D_n = \operatorname{tg} 7,5^\circ \times 530 = 69,776 \text{ мм}$$

Расчет уменьшения длины внутренней образующей 3-ого, 4-ого и 5-ого элементов колена в районе правого торца:

$$\Delta l_{3вп} = \Delta l_{4вп} = \Delta l_{5вп} = \operatorname{tg}(\alpha_2/2) \times D_n = \operatorname{tg} 7,5^\circ \times 530 = 69,776 \text{ мм}$$

Получается, что $l_{3н} = l_{4н} = l_{5н} = 582,5$ мм, а $l_{3в} = l_{4в} = l_{5в} = 582,5 - 2 \times 69,776 = 442,95$ мм.

Разработка эскиза усовершенствованной формы поворота пульпопровода с углом отклонения потока на 60 градусов

При создании эскиза усовершенствованной формы поворота пульпопровода с отклонением потока на 60 градусов нужно убрать два сегмента с углом поворота потока на 15 градусов.

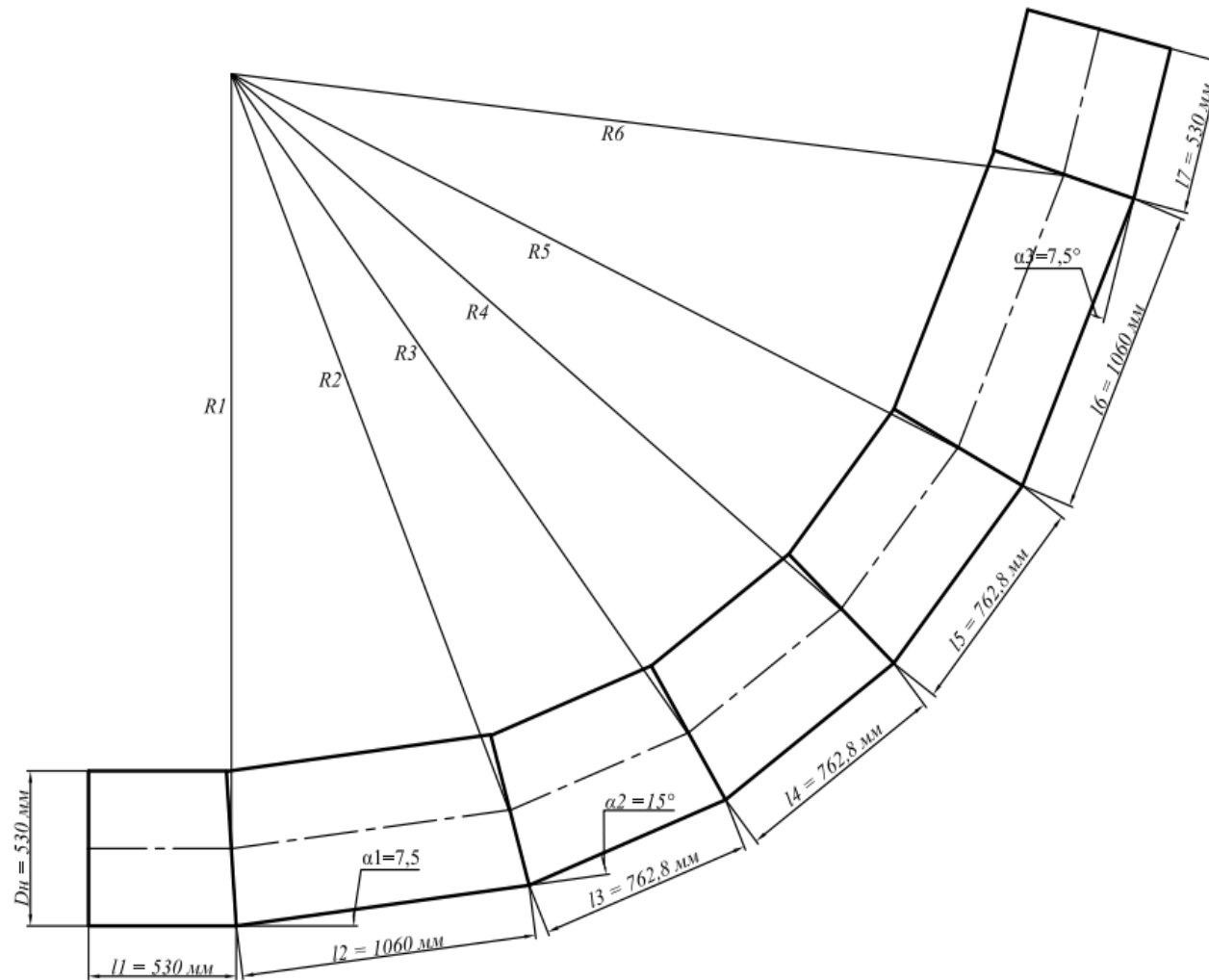


Рисунок 4.11 - Эскиз поворота пульпопровода на 75° с отношением $R/D=5$

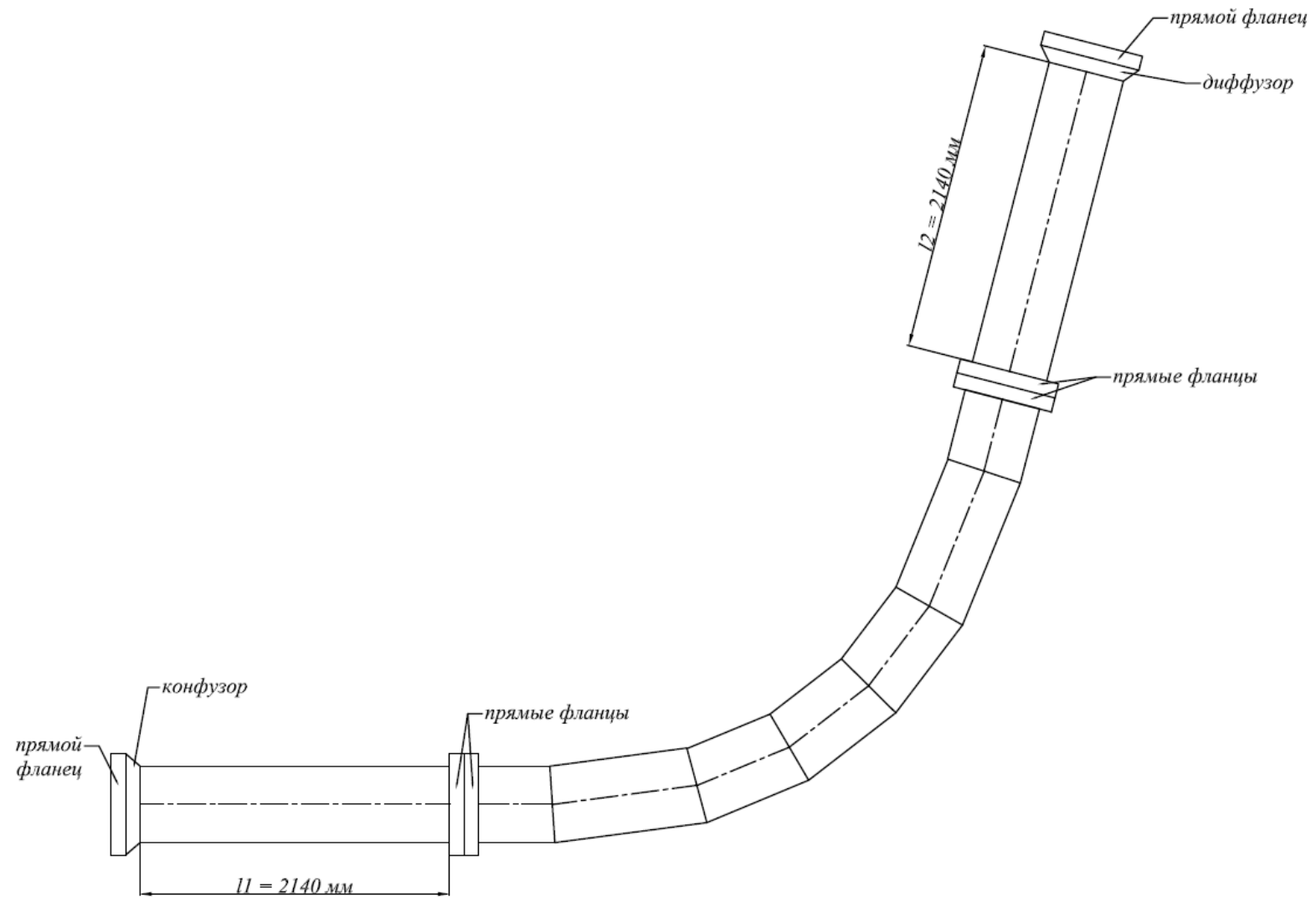


Рисунок 4.12 - Эскиз поворота пульпопровода на 75° с участками внешней стабилизации при $R/D=5$

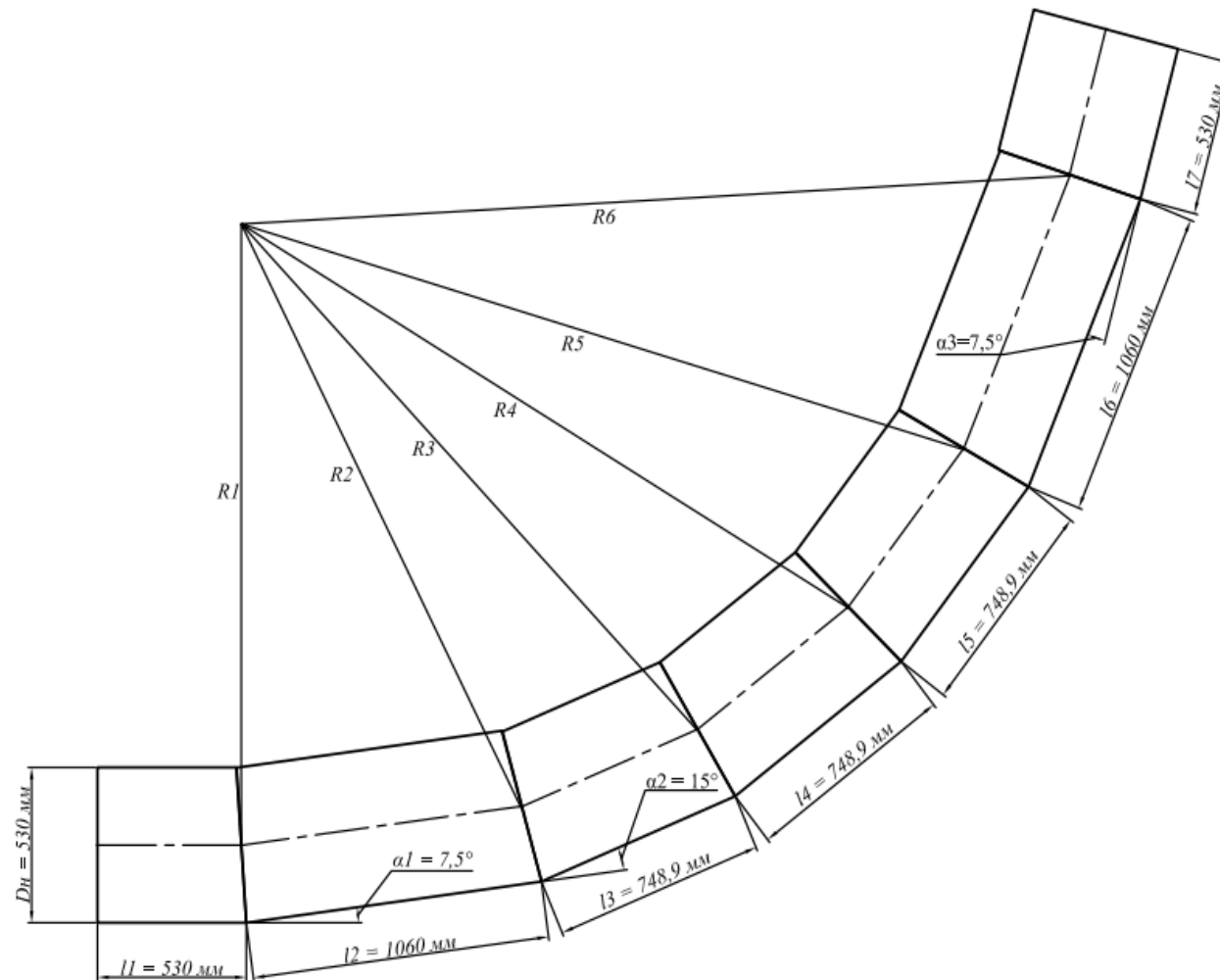


Рисунок 4.13 - Эскиз поворота пульпопровода на 75° с отношением $R/D=4$

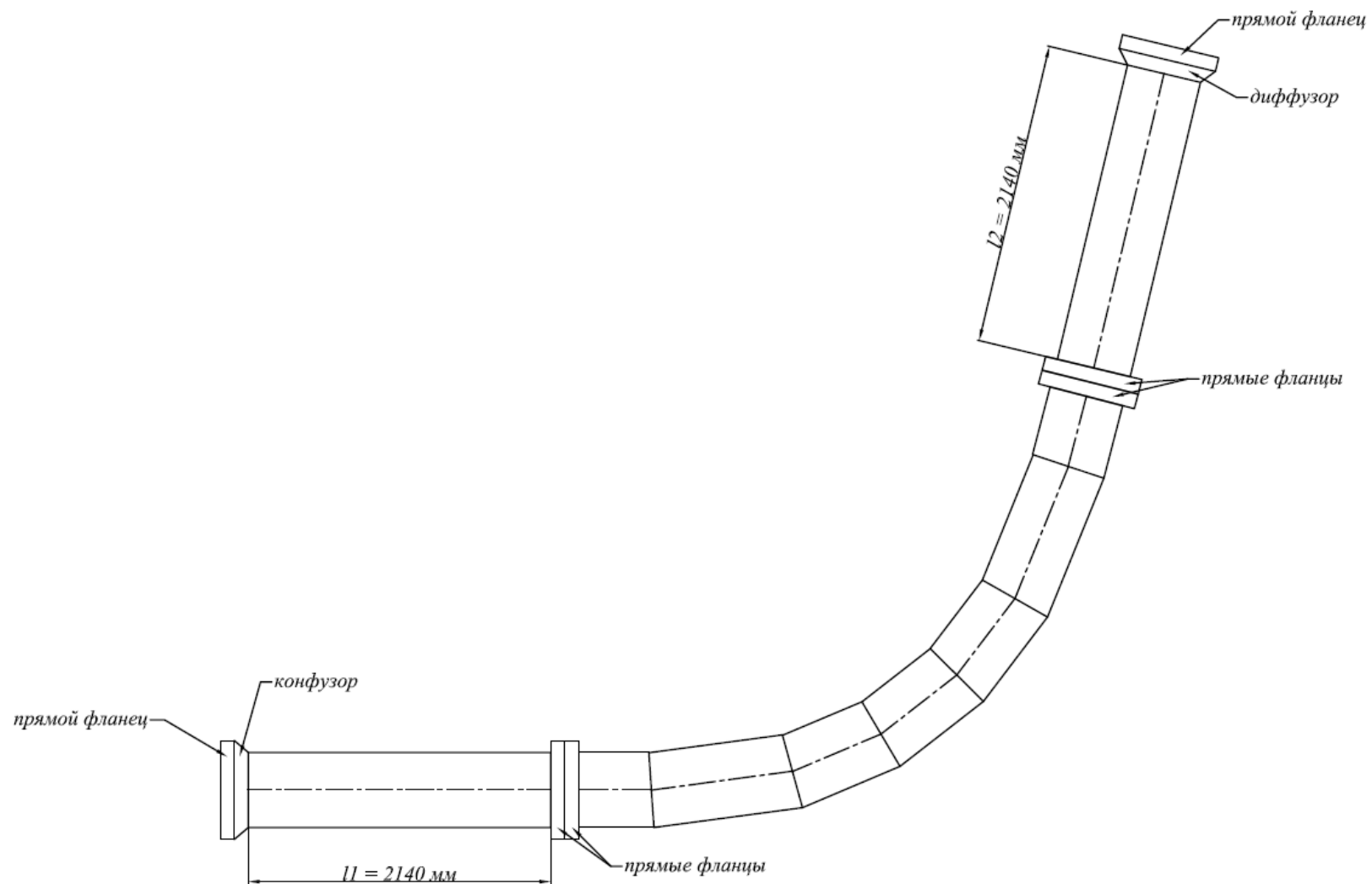


Рисунок 4.14 - Эскиз поворота пульпопровода на 75° с участками внешней стабилизации при $R/D=4$

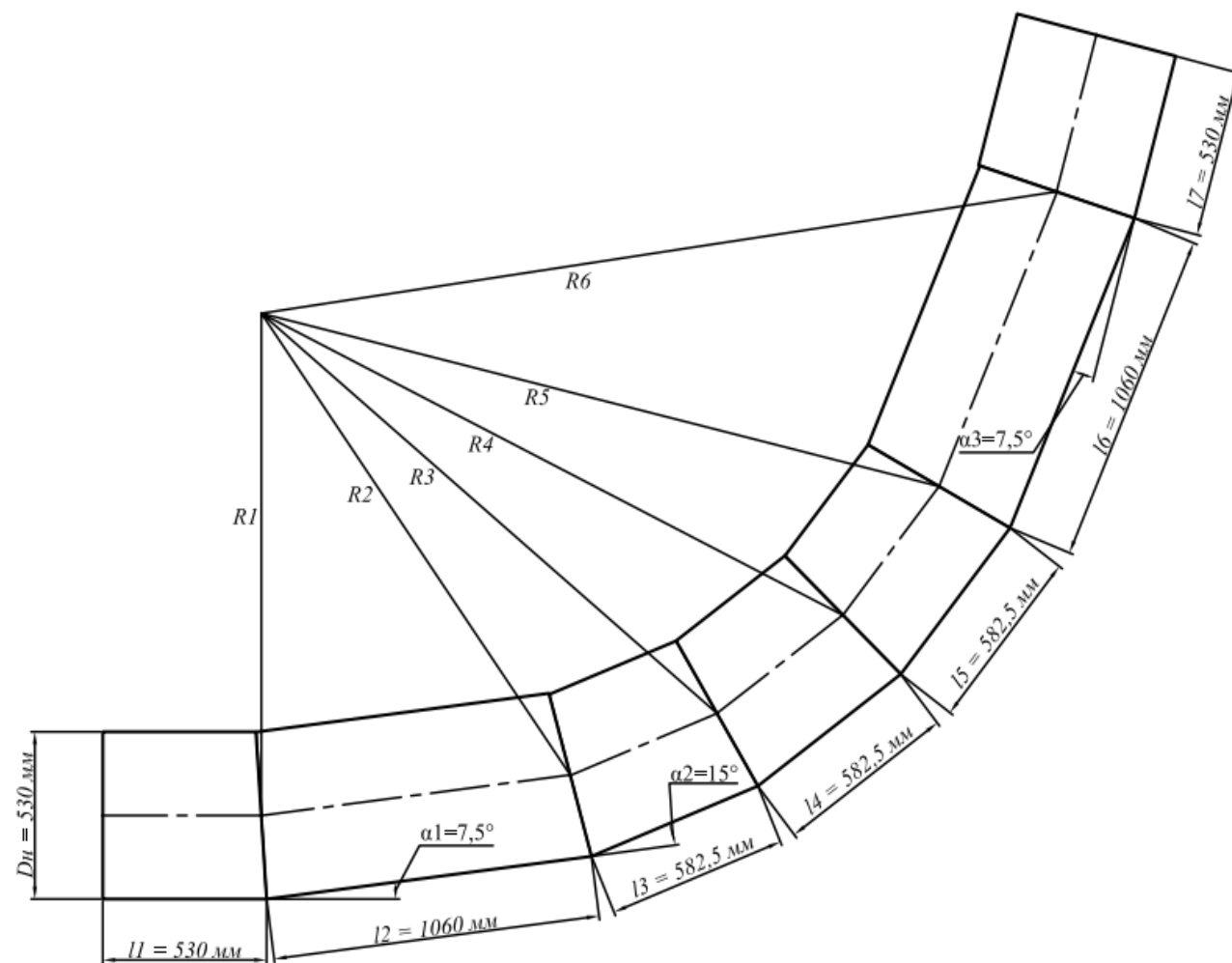


Рисунок 4.15 - Эскиз поворота пульпопровода на 75° с отношением $R/D=3$

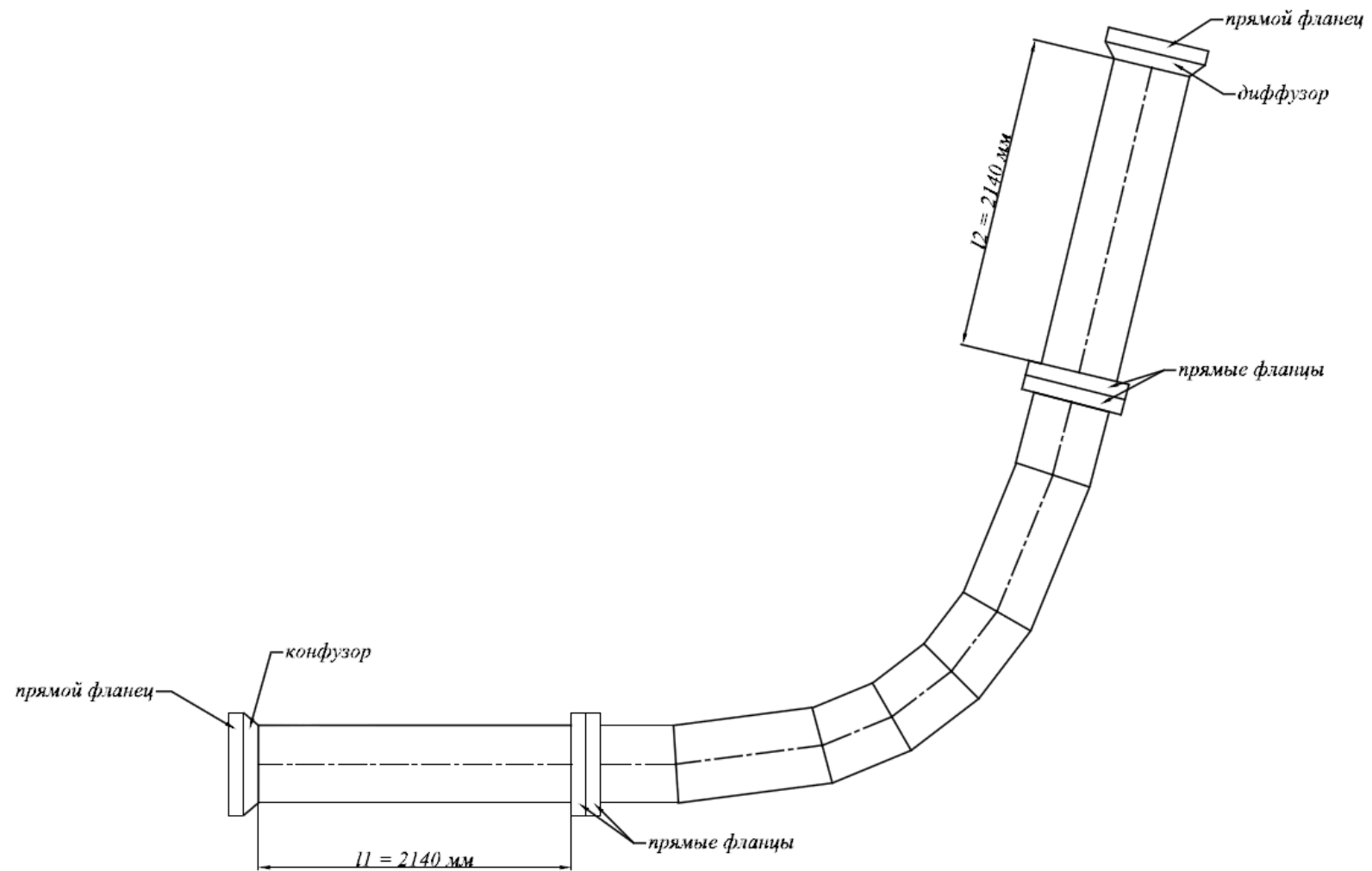


Рисунок 4.16 - Эскиз поворота пульпопровода на 75° с участками внешней стабилизации при $R/D=3$

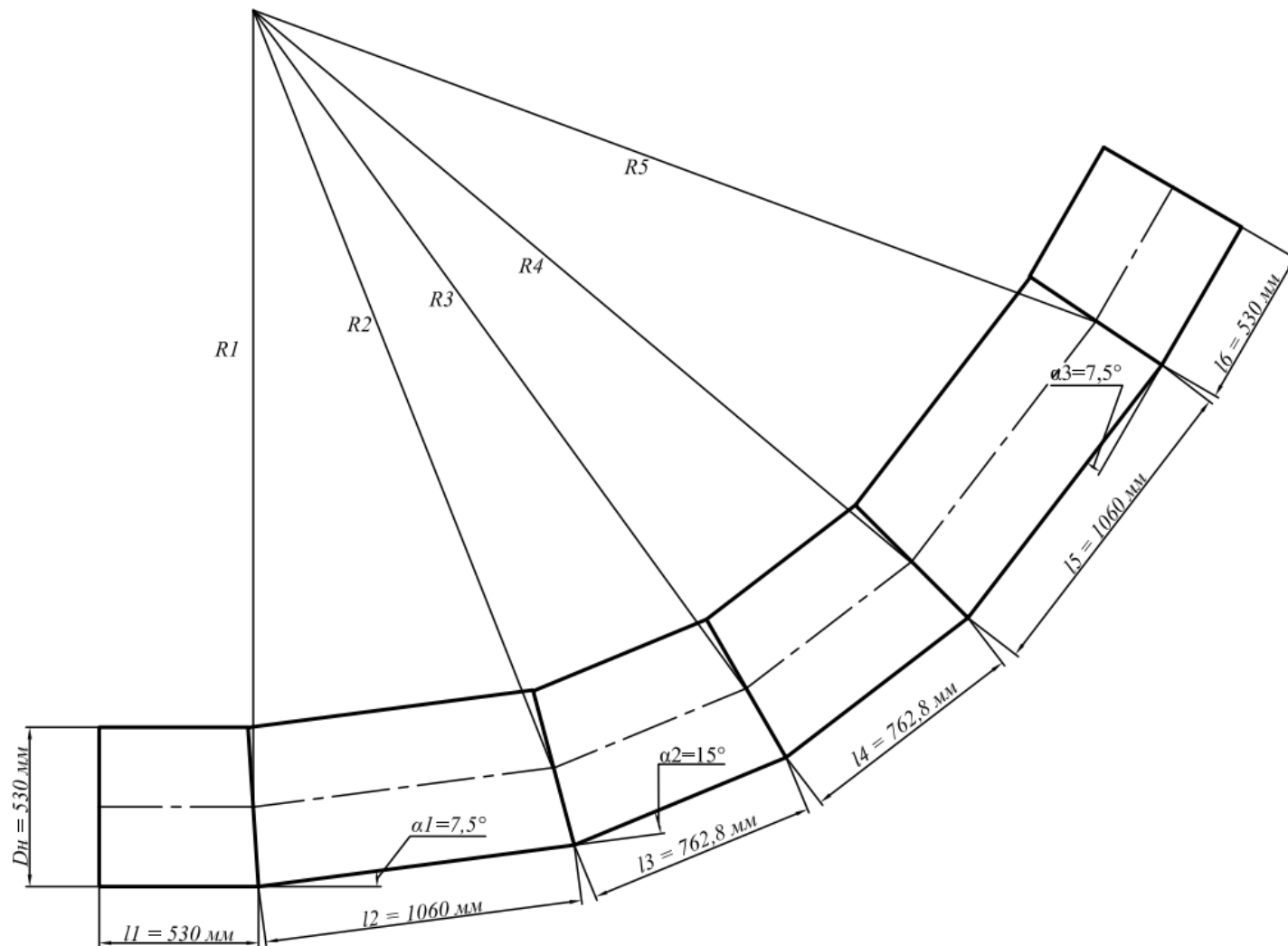


Рисунок 4.17 - Эскиз поворота пульпопровода на 60° с отношением $R/D=5$

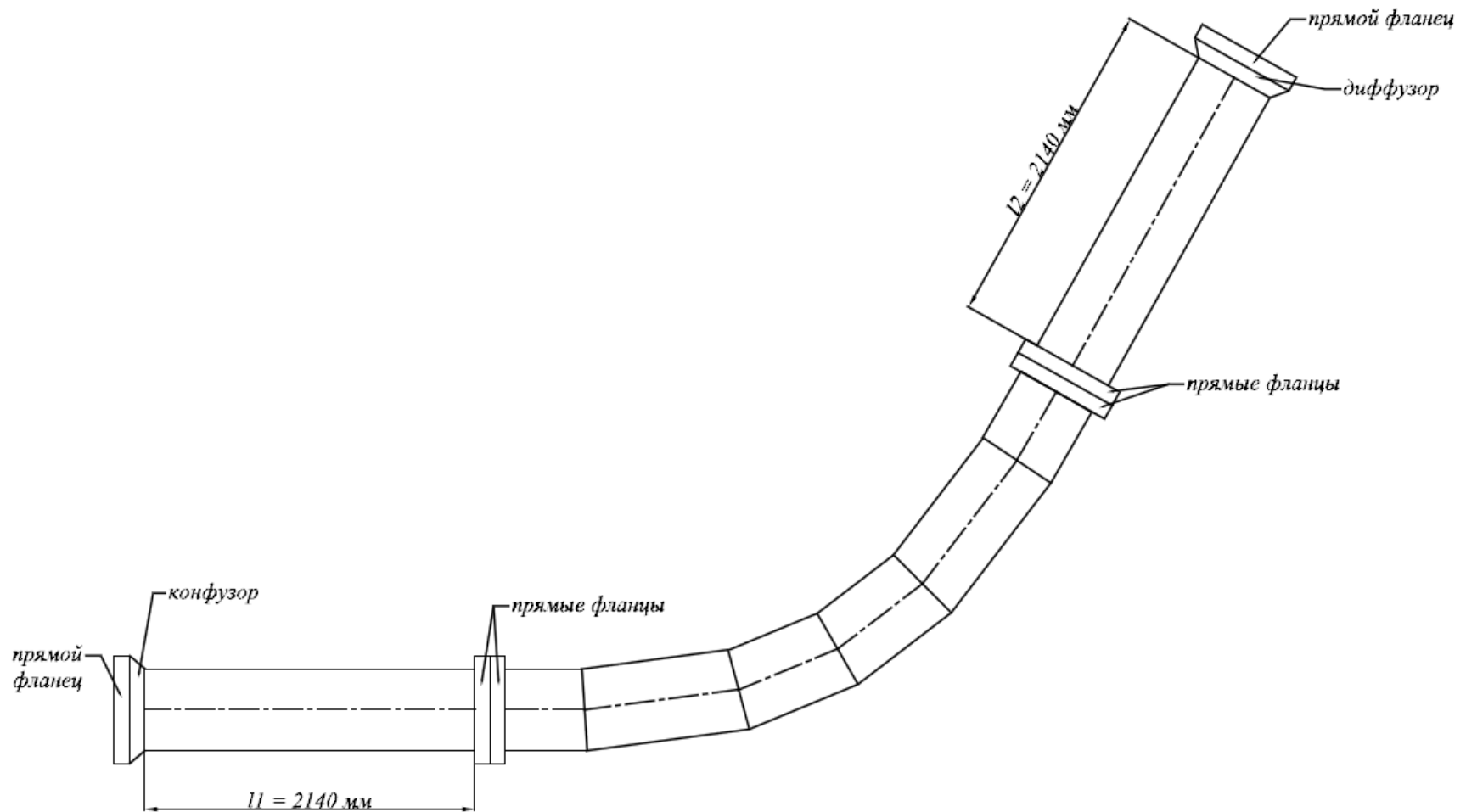


Рисунок 4.18 - Эскиз поворота пульпопровода на 60° с участками внешней стабилизации

4.3 Внедрение научных результатов диссертационной работы по защите поверхностей пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 от абразивного износа

В результате выбора обоснованного решения по продлению сроков службы пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 разработаны усовершенствованные формы криволинейных участков пульпопроводов с углами поворота потока на 60, 75 и 90 градусов для различных соотношений радиуса поворота к внутреннему диаметру трубы с участками стабилизации потока с нанесением алюмотермического покрытия. Был выбран опытный участок с поворотом потока на 75 градусов при соотношении $R/D=3$, выполнены работы по нанесению алюмотермического покрытия на опытный криволинейный участок трубопроводов системы ГЗУ и установлен опытный образец.

4.3.1 Описание характеристик труб и соединений

На Хабаровской ТЭЦ-3, в месте установки опытного образца поворота пульпопровода производилась замена двух ниток системы гидрозолоудаления.

Участки труб ГЗУ представляли собой электросварные прямошовные трубы с наружным диаметром 530 мм и толщиной стенки 10 мм, выполненные из стали 3сп5, класс прочности K38 (ГОСТ 10706-76, ГОСТ 10704-91).

Согласно техническим условиям [160] трубы с алюмотермическим покрытием изготавливались из труб стальных бесшовных горячедеформированных по ГОСТ [164] в соответствии с таблицей 4.3.

Таблица 4.3 - Толщина стенки труб стальных бесшовных.

Внешний диаметр, мм	60; 68; 70; 73; 76; 83; 89; 95; 102	108; 114; 121; 127; 133; 140; 146; 152; 159; 168; 180; 194; 203	219; 245; 273; 299; 325	351; 377; 402; 426; 450; 480; 500; 530
Толщина стенки, мм	4	8	10	12

Толщина стенки трубы внешним диаметром 530 мм составляла 12 мм. Толщина алюмотермического покрытия - 8 мм (таблица 4.4).

Таблица 4.4 - Параметры трубы с наружным диаметром 530 мм с алюмотермическим покрытием

№ п/п	Наименование трубы	Внешний диаметр трубы, мм	Внутренний диаметр трубы, мм	Масса 1 м трубы, кг
1.	Т 530×490	530	490	200,9

Предельные отклонения и требования к геометрическим характеристикам труб с алюмотермическим покрытием должны соответствовать указанным в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Требования к характеристикам труб с алюмотермическим покрытием

Наименование показателя	Допустимые отклонения
Наружный диаметр, не более	Для труб с внешним диаметром свыше 219 мм: $\pm 2,0\%$
Внутренний диаметр, не более	± 1 мм
Длина трубы	± 1 мм
Толщина покрытия	$8,5 \pm 0,5$ мм
Неперпендикулярность торца трубы относительно образующей поверхности, не более	1 мм
Смещение плоскости торца покрытия относительно плоскости торца стальной трубы для труб, соединяемых фланцами, не более	± 1 мм
Волнистость (разнотолщинность покрытия) на алюмотермической поверхности трубы, не более	3 мм
Количество волн на алюмотермической поверхности трубы на 1 м длины, не более	2
Наличие трещин	Не допускается

Для соединения изделий с алюмотермическим покрытием предусмотрены два вида соединения:

1. Разъемное болтовое при помощи фланцев;
2. Неразъемное на сварку при помощи бандажей по ГОСТ [165], сварное соединение Н4.

Отводы с алюмотермическим покрытием изготавливались путем сварки

сегментов труб. Сварка сегментов производилась по ГОСТ [165], сварное соединение С55.

Физико-химические свойства алюмотермического покрытия соответствовали значениям, приведенным в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Физико-химические свойства керамического покрытия

Наименование показателя	Величина
Содержание окиси алюминия, % по массе	Не менее 63
Предел прочности при сжатии, МПа	300...340
Предел прочности при изгибе, МПа	70...110
Потеря массы при истирании, г/см ² , не более	0,06
Термостойкость, количество теплосмен (закалка от 800 до 20°С в воду)	Не менее 2
Кислотостойкость, 6 н. НСl, %	98

4.3.2 Описание технологии производства работ по нанесению алюмотермического покрытия для опытного участка трубопроводов системы ГЗУ

Хабаровской ТЭЦ-3

Работы по нанесению алюмотермического покрытия выполнялись с помощью установки центробежного СВС-литья. Покрытия наносятся на прямые трубы длиной до 5 метров со стандартными диаметрами от 68 до 530 мм и толщиной стенки не менее 4 мм. Посредством электросварки или фланцев из указанных прямых трубных элементов изготавливаются отводы любого радиуса и длины, а также трубные тройники и крестовины [160].

Порядок выполнения технологических операций по изготовлению упрочненной трубы:

1. Подготовка термитной смеси;
2. Заполнение трубы термитной смесью;
3. Поджиг термитной смеси в трубе с помощью электрозапального устройства. Закрытие камеры, в которую помещена труба;
4. Нанесение термитной смеси вследствие прохождения термитной реакции;
5. Извлечение упрочненной трубы из камеры;

6. Помещение трубы с нанесенным покрытием в теплоизолирующую оболочку.

Схема упрочнения трубы описанным способом представлена на рисунке 4.19.

Во время центробежного СВС-литья формируется двухслойное покрытие (рисунок 4.20): между стальной трубой и слоем покрытия образуется промежуточный слой металла (на основе железа), приваренный к стенке трубы и диффузионно связанный с покрытием, который демпфирует нагрузки на покрытие от внешних механических и тепловых воздействий.

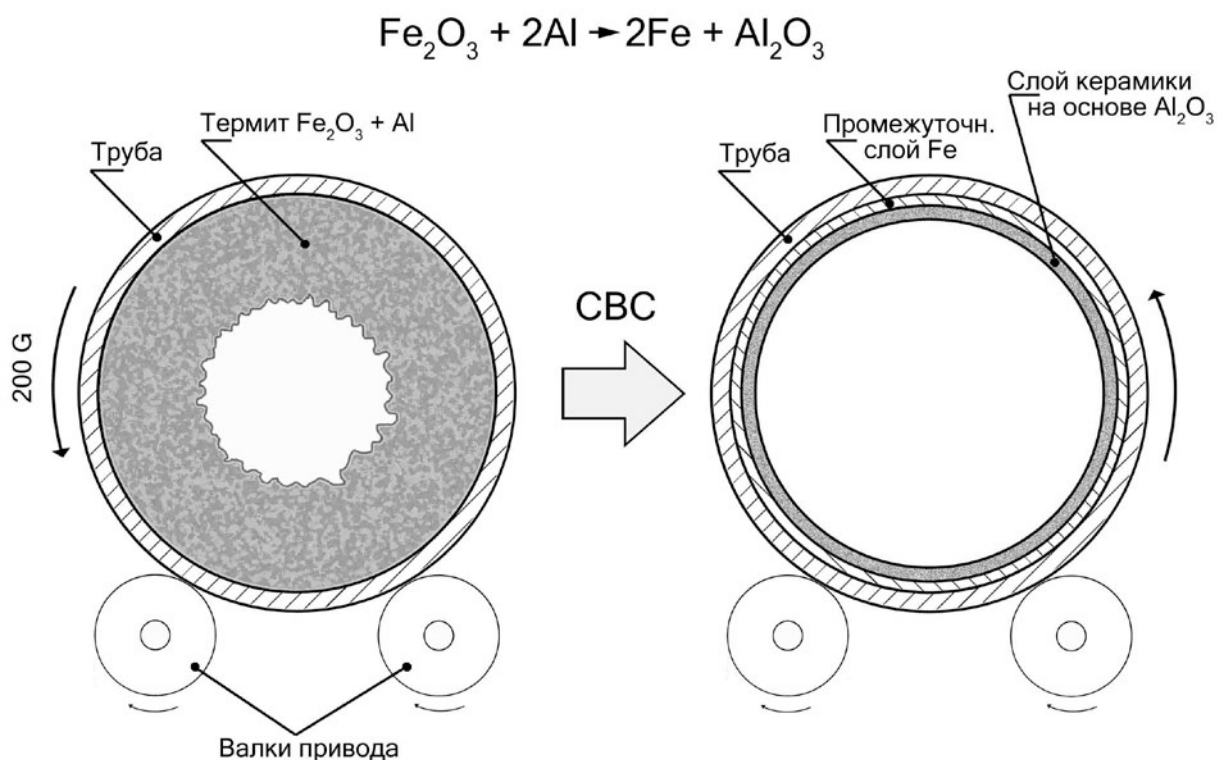


Рисунок 4.19 - Схема нанесения алюмотермического покрытия с помощью метода центробежного СВС-литья.

Микроструктура упрочненного слоя (рисунок 4.21) представлена равномерно распределенными зернами корунда (темный цвет) с включениями алюмосиликатных фаз (светлые участки).

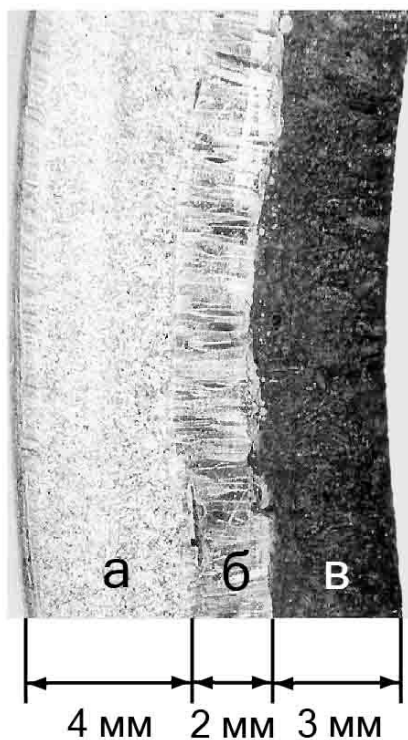


Рисунок 4.20 - Поперечный шлиф стальной трубы с алюмотермическим покрытием: **а** - стенка трубы; **б** – промежуточный слой металла; **в** – керамический слой

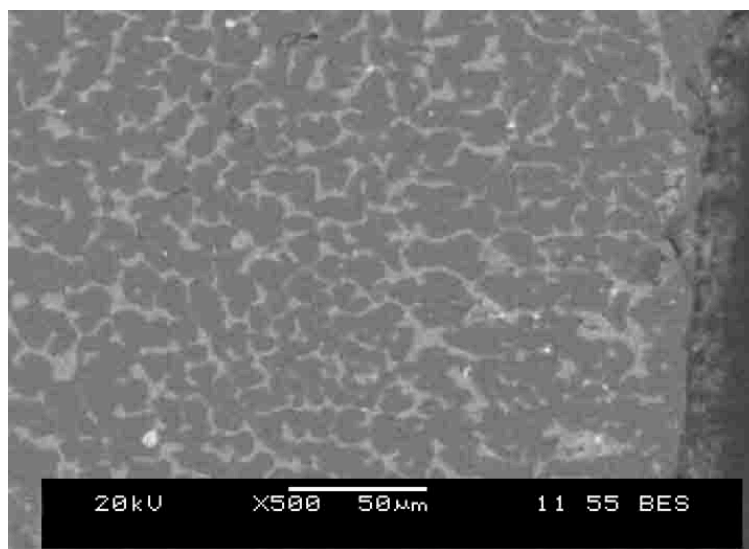


Рисунок 4.21 - Микроструктура упрочненного слоя

Обладая значительной твердостью, термостойкостью и химической стойкостью такое покрытие защищает трубопровод от абразивного износа, химической и высокотемпературной коррозии.

Возможные области применения труб с алюмотермическим покрытием:

- работа в условиях интенсивного истирания (пневмо- и гидротранспорт под давлением и без давления различных абразивных материалов, как, например, песок, цемент, золошлаки);
- работа в условиях значительного теплового воздействия для транспортировки в среде различных газов при температуре до 800 °С;
- для транспортировки некоторых расплавленных металлов, солей и химически агрессивных веществ.

В 2015 г. ООО «Энергохимкомплект» ввело в эксплуатацию две новых установки центробежного СВС-литья для нанесения покрытий на трубы диаметрами от 60 до 530 мм и длиной 2000 мм. На рисунке 4.22 представлена фотография установки центробежного литья для нанесения керамического покрытия на трубы большого диаметра. Вид участка трубы с нанесенным алюмотермическим покрытием приведен на рисунке 4.23.



Рисунок 4.22 - Установка центробежного литья для нанесения покрытия на трубы диаметром 530 мм

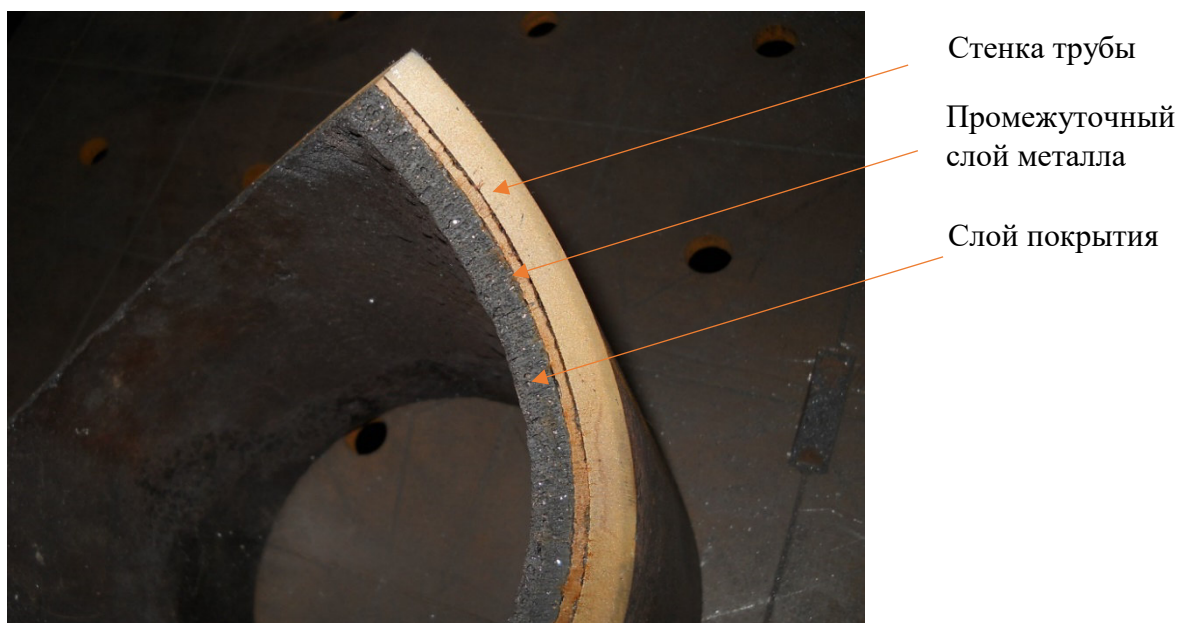


Рисунок 4.23 - Внутренняя поверхность трубы с алюмотермическим покрытием

4.4 Оценка эффективности применения технических решений по защите пульпопроводов от абразивного износа

4.4.1 Оценка эффективности применения технических решений по продлению сроков службы пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3

По результатам внедрения технических решений по продлению сроков службы криволинейных участков пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 были определены следующие показатели:

- коэффициент, учитывающий угол атаки k_α ;
- коэффициент, учитывающий отношение R/D - $k_{R/D}$;
- отношения величин абразивного износа криволинейных участков пульпопроводов при усовершенствованном и исходном вариантах исполнения поворотов при различных углах поворота потока.

В случае применения усовершенствованной формы колена поворота пульпопровода при повороте потока на $7,5^\circ$ вместо $22,5^\circ$, как было на исходном участке, величина удельного абразивного износа снизилась в 3,75 раза; в случае

поворота потока на 15° вместо 30° , как было на исходном участке, величина абразивного износа снизилась в 2,68 раза. Таким образом, срок службы фасонных участков пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 только в результате внедрения технических решений с учетом установки усовершенствованной формы поворота пульпопроводов можно продлить в 2,68...3,75 раза.

В настоящее время для оценки эффективности защиты опытных участков трубопроводов проводится визуальный и инструментальный осмотр, в результате которого выявляются отклонения от допустимых параметров в части волнистости и сплошности покрытия. В перспективе для оценки эффективности защиты опытных участков колен поворота трубопроводов предлагается использовать современные технические решения – роботы, способные диагностировать внутреннюю поверхность труб для оценки толщины, сколов, истирания и других дефектов с выводом результатов диагностических исследований на ПО в режиме реального времени. Данное техническое решение позволит проводить диагностику отключенных или резервных участков быстро и точно, не прибегая к образцовым методам диагностики и контроля с разбором участков труб или вырезанием отверстий для мониторинга их состояния.

Примеры возможных диагностических модулей представлены на рисунках 4.24 и 4.25 согласно материалам, приведенным в [166, 167] соответственно.

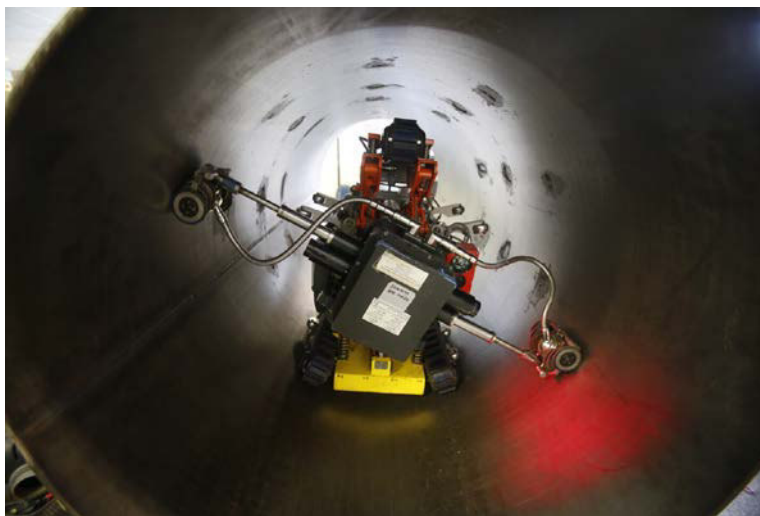


Рисунок 4.24 - Роботизированный комплекс компании «Диаконт» для диагностики состояния труб



Рисунок 4.25 - Роботизированный комплекс с акустическим датчиком

4.4.2 Расчет сроков службы пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 до и после проведения защитных мероприятий

Проведен расчет срока службы пульпопроводов системы ГЗУ после проведения мероприятий по их защите от абразивного износа.

Исходными данными для расчета абразивного износа металла стенки пульпопровода при перемещении золы являются:

1. Диаметр трубы;
2. Характеристики металла трубы;
3. Скорость транспортирования пульпы
4. Концентрация пульпы;
5. Результаты статистической обработки данных промышленных наблюдений за износом эксплуатируемых пульпопроводов с алюмотермическим покрытием.

При этом, удельный срок службы трубопровода до среднего износа толщины стенок труб на 1 мм, год/мм был определен по формуле из [147]:

$$T_1 = \frac{K_{ан} \cdot n \cdot \psi \cdot k_u}{k_a \cdot v_{cp}^{2,5} \cdot S_{cp}^{0,65} \cdot D^{0,3}}, \quad (4.6)$$

где $K_{ан}$ – коэффициент, учитывающий фактический срок службы трубопровода-

аналога до износа его стенок на 1 мм при определенных условиях эксплуатации; значения $K_{ан}$, определенные по результатам статистической обработки данных промышленных наблюдений за износом эксплуатируемых пульпопроводов при трубах из малоуглеродистой стали, выбран по [147] в зависимости от вида транспортируемого материала ($K_{ан} = 0,038$); n – число рабочих положений рассчитываемого пульпопровода до предельного износа трубы; ψ – коэффициент неравномерности износа по окружности рассчитываемого пульпопровода; $k_{и}$ – коэффициент относительной износостойкости используемого материала трубы; k_a – коэффициент относительной абразивности транспортируемого материала; $v_{ср}$ – средняя скорость движения пульпы в трубопроводе, м/с; $S_{ср}$ – средняя массовая концентрация пульпы, кг/кг; D – внутренний диаметр пульпопровода, м.

Удельный износ пульпопровода при гидротранспорте золовой пульпы является обратной величиной T_l .

При расчете принято, что $\psi = 2,5$. Износостойкость стали 3 составляет 0,64 г/см². Согласно [153] износостойкость керамического покрытия составляет не более 0,06 г/см². Тогда коэффициент относительной износостойкости материала трубы, футерованной алюмотермическим покрытием $k_{и}$ составит 0,64/0,06=10,77. В соответствии с данными промышленной эксплуатации пульпопроводов систем гидрозолоудаления ТЭС гидротранспорт золы по трубам осуществляется при скорости около 1,2 м/с, твердого шлака – 1,5 м/с и жидкого шлака – 1,8 м/с. Весовая концентрация гидросмеси при удалении золы или композиции из золы и шлака составляет 5...10% [147].

Исходные данные и результаты расчета абразивности золы углей ХТЭЦ-3 приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Исходные данные и результаты расчета абразивности золы Хабаровской ТЭЦ-3 по предложенной модели

Материал	SiO ₂ , %	k_{SiO_2}	$d_{ср}$, мкм	$k_{dср}$	k_f	k_a
Зола нерюнгринского угля	54,7	0,558	112,5	0,193	0,83	0,268
Зола кузнецкого угля	60,0	0,612	61,0	0,104	0,83	0,217
Зола ургальского угля	66,0	0,673	59,1	0,101	0,83	0,235

Для расчета коэффициента относительной абразивности золы выведена формула:

$$k_a = \frac{k_{SiO_2} \cdot k_{d_{cp}}^{0,5}}{k_f^{0,5}}, \quad (4.7)$$

где k_{SiO_2} – коэффициент относительного содержания SiO_2 ; $k_{d_{cp}}$ – отношение средневзвешенной крупности золы к средневзвешенной крупности песка; k_f – коэффициент формы частиц.

В таблице 4.8 представлены результаты расчета удельного срока службы пульпопроводов, выполненных из Стали 3 и пульпопроводов с алюмотермическим покрытием до среднего износа толщины стенок труб на 1 мм, год/мм (T_l), а также удельного абразивного износа пульпопроводов, выполненных из Стали 3, (δ) при транспорте золошлаковой пульпы, мм/год, содержащей золы нерюн-гринских, кузнецких и ургальских углей при скоростях транспортирования 1,2; 1,5 и 1,8 м/с и массовой концентрации пульпы 5 и 10 % согласно рекомендациям [147] с учетом расчета абразивности золы по предложенной формуле.

Акты о внедрении научных результатов диссертационной работы от Хабаровской ТЭЦ-3, а также от ООО «Энергохимкомплект» - изготовителя отвода с алюмотермическим покрытием, представлены в Приложении Д, Е, Ж. Отвод успешно эксплуатируется 4,5 года согласно Акту оценки состояния внутреннего износостойкого покрытия опытно-промышленного образца пульпопровода ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 по состоянию на 04.06.2024 г., что свидетельствует о правильном подходе при решении проблемы защиты участка пульпопровода от абразивного износа. Состояние внутренней поверхности опытно-промышленного участка пульпопровода ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 отражено на рисунке 4.26.

УТВЕРЖДАЮ:



Главный инженер ХТЭЦ-3
А.И. Примак
« 04 » июня 2024 г.

АКТ

Оценки состояния внутреннего износостойкого покрытия опытно-промышленного образца пульпопровода ГЗУ

Настоящий акт составлен о том, что 04.06.2024 произведена проверка состояния внутреннего износостойкого керамического покрытия опытно-промышленного образца пульпопровода ГЗУ состоящего из поворотного сварного участка и двух прямых участков внешней стабилизации потока пульпы после эксплуатации в течении 4,5 лет.

Проверка осуществлялась путем визуального осмотра состояния покрытия через вырезку в металлическом пульпопроводе смотрового отверстия размером 500×750 мм на расстоянии 500 мм от опытно-промышленного образца.

Результаты осмотра:

- керамическое покрытия опытно-промышленного образца пульпопровода визуально фиксируется по всей длине;
- целостность покрытия сохранена;
- сколы, трещины, иные механические повреждения не наблюдаются;
- механические измерения структуры керамического покрытия, ограничивающие работоспособность опытно-промышленного образца не зафиксированы.

Заместитель гл. инженера

А.М. Козлов

Начальник КТЦ

С.В. Симонов

Зам. начальника КТЦ

А.А. Попов

Рисунок 4.25 – Акт оценки состояния покрытия образца пульпопровода ГЗУ
ХТЭЦ-3



Рисунок 4.26 - Внутренняя поверхность опытно-промышленного участка пульпопровода ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3

Таблица 4.8 - Результаты расчета износа колена поворота пульпопроводов из Ст. 3 и с алюмотермическим покрытием при гидротранспорте золы

Материал	k_a	Скорость транспортирования, м/с	Массовая концентрация, %	Трубы из Стали 3		Трубы с алюмотермическим покрытием	
				T_1 , год/мм	δ_h , мм/год	T_1 , год/мм	δ_h , мм/год
Зола нерюн- гринского угля	0,268	1,2	5	1,926	0,519	20,991	0,048
		1,5	5	1,102	0,907	12,016	0,083
		1,8	5	0,699	1,431	7,617	0,131
		1,2	10	1,227	0,815	13,377	0,075
		1,5	10	0,703	1,423	7,657	0,131
		1,8	10	0,445	2,245	4,854	0,206
Зола кузнец- кого угля	0,217	1,2	5	2,384	0,419	25,988	0,038
		1,5	5	1,365	0,733	14,876	0,067
		1,8	5	0,865	1,156	9,431	0,106
		1,2	10	1,519	0,658	16,562	0,060
		1,5	10	0,870	1,150	9,480	0,105
		1,8	10	0,551	1,814	6,010	0,166
Зола ургаль- ского угля	0,235	1,2	5	2,202	0,454	24,002	0,042
		1,5	5	1,261	0,793	13,740	0,073
		1,8	5	0,799	1,251	8,710	0,115
		1,2	10	1,403	0,713	15,296	0,065
		1,5	10	0,803	1,245	8,756	0,114
		1,8	10	0,509	1,964	5,551	0,180

Расчет срока службы стального колена

Исходная стальная труба - электросварная прямошовная с наружным диаметром 530 мм и толщиной стенки 10 мм. Минимальная толщина стенки согласно [147] - 3 мм. Таким образом, максимальная величина износа пульпопровода может составлять не более 7 мм. Согласно выполненным расчетам абразивного износа стального колена поворота пульпопровода при гидротранспорте золы нерюнгринского, кузнецкого и ургальского углей при скоростях транспортирования пульпы от 1,2 до 1,8 м/с и массовой концентрации от 5 до 10% (таблица 4.9) срок службы стального колена составляет от 3 до 17 лет.

Расчет срока службы упрочненного колена с учетом оптимизации его формы

Срок службы колена после оптимизации его формы составляет в 3...4 раза больше, чем исходного стального колена.

Согласно результатам расчета, приведенным в таблице 4.8, срок службы колена, упрочненного алюмотермическим покрытием без учета оптимизации формы колена, составляет от 53 до 184 лет в зависимости от характеристик золы и условий транспортирования (скорости перемещения и массовой концентрации золы). Таким образом, срок службы футерованных колен возрастает в 10 и более раз по сравнению со сроком службы стальных колен.

При сопоставлении результатов расчетов срока службы стальных криволинейных участков пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 и участков после оптимизации формы колен, футерованных алюмотермическим покрытием, видно, что после защиты пульпопроводов от абразивного износа срок службы криволинейных участков системы ГЗУ возрастает более, чем в 14 раз.

Укрупненные финансовые показатели по расчету изготовления колена поворота трубопровода Ду 530×10 мм с учетом монтажа и проворота по состоянию на 01.01.2023 г. представлены в таблице 4.9. В качестве базовых цен берутся показатели по состоянию на 01.01.2000 г., а далее с использованием коэффициентов пересчета определяются текущие цены (по состоянию на 2024 год).

Таблица 4.9 - Укрупненные финансовые показатели изготовления колена поворота трубопровода длиной 5,5 м с учетом монтажа и проворота

Показатель	Базовая цена, тыс руб	Текущая цена, тыс. руб
Строительные работы	166,67	299,10
Монтажные работы	0,00	0,00
Оборудование	0,00	0,00
Прочие работы	55,00	55,00
Средства на оплату труда	166,67	299,10
Итого:	221,67	354,10

Стоимость упрочненного колена с участками стабилизации потока с учетом монтажа и доставки составляет 1 184, 09 тыс. руб в ценах 2024 года.

Стоимость обслуживания системы ГЗУ, потребляемая электрическая энергия на гидротранспорт золошлаковой пульпы до и после защиты пульпопроводов соизмеримы, поэтому основной экономический показатель, который существенно различается, - капитальные затраты. Разовые капитальные затраты на изготовление, доставку и монтаж исходного стального отвода - в 3,3 раза меньше, чем данный показатель для колена оптимальной формы с участками стабилизации потока, футерованного алюмотермическим покрытием. Однако, с учетом минимально возможного расчетного срока службы усовершенствованного отвода с алюмотермическим покрытием (53 года) капитальные затраты, связанные с демонтажем изношенных отводов, изготовлением и монтажом новых отводов составят за этот период 6 373,8 тыс. руб., что составит в 5,4 раза больше капитальных затрат на изготовление, поставку и установку упрочненного колена усовершенствованной формы. При этом, после защиты пульпопровода срок его службы можно продлить в 14 и более раз в зависимости от характеристик транспортирования абразивных материалов.

Выводы по главе 4

К малозатратным мероприятиям, не требующих инвестиций в реконструкцию действующих пневмо- и гидротранспортных установок, относятся: проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов вокруг своей оси; транспортирование пульпы с оптимальными параметрами.

К конструктивным мероприятиям, в разной мере требующих инвестиций в реконструкцию пневмо- и гидротранспортных установок, относятся: оптимизация формы фасонных участков трубопроводов; выполнение участков гидродинамической стабилизации потока на входе и выходе из фасонных участков трубопроводов с учетом зоны максимального износа; применение антиабразивных вставок в колена поворотов пульпопроводов; применение камнелитых изделий; использование труб с алюмотермическим покрытием.

В результате усовершенствования формы колен поворотов трубопроводов срок их службы увеличивается в 3...4 раза по сравнению с использованием стальных колен неоптимальной формы.

Применение труб с алюмотермическим покрытием для установки на наиболее изнашиваемых прямолинейных участках и изготовления фасонных участков трубопроводов позволяет снизить вероятность остановов систем золоудаления по причине абразивного износа в 11 раз и более по сравнению со стальными трубопроводами, что существенным образом позволяет снизить расходы на эксплуатацию системы ЗШУ ТЭС и повысить ее показатели надежности.

Максимальная эффективность от внедрения противоабразивных рекомендаций достигается при сочетании режимных мероприятий (оптимизация параметров транспортирования потока) и конструктивных мероприятий (оптимизация формы фасонных участков трубопроводов с нанесением на их внутреннюю поверхность алюмотермического покрытия).

После установки криволинейного участка пульпопровода системы ЗШУ ТЭС усовершенствованной формы, футерованного алюмотермическим покрытием, с зонами стабилизации потока на входе в отвод и на выходе из него расчетный срок службы отвода составит в 14 раз больше, чем при применении исходных стальных колен. Согласно информации, предоставленной Хабаровской ТЭЦ-3, отвод системы ГЗУ успешно эксплуатируется в течение 4,5 лет, в то время как исходный стальной отвод подлежал замене раз в 3 года.

Альтернативы применению труб и фасонных элементов с алюмотермическим покрытием для эффективного повышения межремонтного срока эксплуатации установок пневмо- и гидротранспорта золошлаков энергетики вследствие абразивного износа в настоящее время нет не только в России, но и в мировой практике.

Использование нормативных документов [20, 93], а также рекомендаций при строительстве новых и оптимизации параметров действующих пневмотранспортных установок позволяет удовлетворительно решить проблему абразивного износа трубопроводов систем ЗШУ ТЭС.

Глава 5 Разработка предложений для комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России

5.1 Предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы с целью повышения уровня использования золошлаков ТЭС

Результаты диссертационного исследования были включены в Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» с последующей актуализацией в 2022 г. (Акт о внедрении научных результатов приведен в Приложении 3 диссертационной работы), в раздел «Обращение с золошлаками», в котором представлено следующее:

- основные требования к системам ЗШУ;
- блок-схемы систем ГЗУ ТЭС при совместном транспортировании золы и шлака на золошлакоотвал, с отдельным удалением, складированием и отгрузкой золы и шлака, блок-схемы комбинированной системы ЗШУ, системы отгрузки, транспортирования и складирования неостребованной части сухой золы на сухом золоотвале и шлака на шлакоотвале;
- оборудование внутреннего золошлакоудаления, накопления и отгрузки сухой золы, внешнего транспорта золошлаков.

Предложения, приведенные в таблице 5.1, представлены в 2024 году на Общественных заседаниях Роснедра, в Российском союзе промышленников и предпринимателей (РСПП), на Секции «Энергоэффективность и экология в электроэнергетике» НТС ЕЭС, а также на Круглом столе НП «НТС ЕЭС» на РМЭФ-2024.

Таблица 5.1 - Предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы с целью повышения уровня использования золошлаков ТЭС

Наименование документа	Текущие формулировки	Предложенные формулировки
ГОСТ Р 54098-2024 «Ресурсосбережение. Вторичные ресурсы и вторичное сырье. Термины и определения»	«п. 2.22. золошлаковые отходы от сжигания угля: продукты термической обработки угля (золошлаковая смесь, золаунос, шлаки), полученные в результате его сжигания в целях производства электрический и (или) тепловой энергии»	«п. 2.22. золошлаки: - зола и шлак текущего выхода являются продуктами техногенного происхождения (продуктами термической обработки угля), если они не отгружены потребителю и хранятся на местах временного размещения (промплощадке) не более 11 месяцев с момента их образования; - зола сухого отбора, а также шлак котлов с твердым шлакоудалением при использовании безводных технологий удаления являются продуктами при соблюдении ими требований на поставку, заявленных потребителями. - по истечении 11 месяцев невостребованная часть золошлаков, размещенная на промплощадке, передается на золошлакоотвал ТЭС, и классифицируется как отход, с возможностью его последующей переработки и доведения до состояния «вторичные ресурсы»
Федеральный закон от 14.07.2022 г. № 268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации»	Не разграничены понятия «вторичные ресурсы», «отходы», «побочные продукты»	При актуализации № 268-ФЗ разграничить понятия: «отход», «вторичный ресурс», «побочные продукты производства» для исключения дополнительных административных и бюрократических барьеров
Федеральный закон «Об экономике замкнутого цикла» (проект)	Отсутствует экспертиза проектов, требования к разработке и реализации программ основного и дополнительного образования	1. Добавить статью «Установление требований к проведению комплексной экспертизы проектов в области экономики замкнутого цикла» в главу 4. Нормирование, государственный учет и отчетность в области экономики замкнутого цикла. 2. Добавить статью «Требования к разработке и реализации программ основного и дополнительного профессионального образования в области экономики замкнутого цикла» в главу 6 Экопросвещение и экообразование в экономике замкнутого цикла.
Разработка ГОСТов	Отсутствуют ГОСТы на продукты, полученные в результате переработки золошлаков (зольные микросферы, угольный концентрат, железный концентрат, песчаный грунт)	Разработать ГОСТы на следующие продукты переработки золошлаков ТЭС: - Зольные микросферы. Определение, классификация, характеристики. - Угольный концентрат. Определение, классификация, характеристики. - Железный концентрат. Определение, классификация, характеристики. - Песчаный грунт. Определение, классификация, характеристики.

Продолжение таблицы 5.1

Наименование документа	Текущие формулировки	Предложенные формулировки
ОКПД, ТН ВЭД	Отсутствуют коды на продукцию, получаемую из золошлаков в классификаторах	дополнить ОКПД, ТН ВЭД в части классификации продукции, получаемой из золошлаков
Разработка СТО	Отсутствуют СТО по применению золошлаков в дорожном хозяйстве	Разработать стандарты организаций по применению золошлаков в дорожном хозяйстве, согласованные с дорожными и природоохранными органами.
Справочник по НДТ «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии»	Отсутствует рекомендация о переходе на сухие технологии ЗШУ на ТЭС. В текущей версии справочника ГЗУ является НДТ	При актуализации следующей версии справочника при проектировании новых и реконструкции действующих систем ЗШУ ТЭС рекомендовать применять безводные технологии.
Схема и программа развития электроэнергетических систем России (СИПР)		Предлагается в СИПР ЭЭС России при проектировании новых угольных энергоблоков выбирать оптимальные технические и экономические решения в части систем ЗШУ с учетом наилучших доступных технологий, а именно безводные технологии обращения с золошлаками на ТЭС.

5.2 Предложения по стимулированию производителей золошлаков

С целью достижения показателей, приведенных в Энергетической стратегии России, к 2035 году доля утилизации золошлаков должна вырасти до 50% от объема их образования. Для этого необходимо разработать стимулирующий механизм, позволяющий экономически заинтересовать угольные ТЭС в увеличении уровня использования золошлаков, который предложен автором ниже.

Постановление Правительства РФ от 31 мая 2023 г. № 881 [168] введены нормативы платы за размещение отходов производства и потребления, в том числе за складирование побочных продуктов производства. Величина этих выплат зависит от степени опасности отходов.

При размещении отходов на объектах размещения отходов, исключаящих негативное воздействие на окружающую среду и определяемых в соответствии

с законодательством Российской Федерации в области обращения с отходами, плата за размещение отходов не взимается.

Размер платы за размещение отходов состоит из следующих видов:

- платы за размещение отходов в пределах лимитов на размещение отходов;
- платы за размещение отходов с превышением установленных лимитов на их размещение.

Плата за размещение отходов (за исключением твердых коммунальных отходов) в пределах лимитов на размещение отходов, либо в соответствии с декларацией о воздействии на окружающую среду, либо в соответствии с отчетностью об образовании, утилизации, обезвреживании, о размещении отходов, представляемой в составе отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля, рассчитывается по формуле 5.1:

$$\Pi_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^m (M_{\text{л}j} \times H_{\text{пл}j} \times K_{\text{от}} \times K_{\text{л}} \times K_{\text{од}} \times K_{\text{по}} \times K_{\text{ст}} \times K_{\text{инд}}) \quad (5.1)$$

где: m - количество классов опасности отходов; $M_{\text{л}j}$ - платежная база за размещение отходов j -го класса опасности, определяемая лицом, обязанным вносить плату, за отчетный период как масса или объем размещенных отходов в количестве, разном или менее установленных лимитов на размещение отходов, тонна или м^3 ; $H_{\text{пл}j}$ - ставка платы за размещение отходов j -го класса опасности, руб./т или руб./ м^3 ; $K_{\text{л}}$ - коэффициент к ставке платы за размещение отходов j -го класса опасности за объем или массу отходов, размещенных в пределах лимитов на их размещение, равный 1; $K_{\text{од}}$ - стимулирующий коэффициент к ставке платы за размещение отходов j -го класса опасности, равный 0; $K_{\text{по}}$ - стимулирующий коэффициент к ставке платы за размещение отходов j -го класса опасности, равный 0,3; $K_{\text{ст}}$ - стимулирующие коэффициенты к ставке платы за размещение отходов j -го класса опасности, равные соответственно 0,5, 0,67, 0,49 и 0,33; $K_{\text{инд}}$ - дополнительный коэффициент, применяемый к ставкам платы, устанавливаемый Правительством Российской Федерации в соответствии со ст.16 Федерального закона "Об охране окружающей среды".

В качестве стимулирующей меры по повышению уровня использования

золошлаков ТЭС предлагается дополнительно к п.16.3 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [60] ввести порядок расчета дифференцированных экологических платежей в зависимости от объемов использования золошлаков, образованных на угольных ТЭС. Так, в течение периода действия комплексного экологического разрешения (КЭР), 7 лет, предлагается ежегодно при исчислении платы за негативное воздействие на окружающую среду к ставкам такой платы применить следующие коэффициенты:

а) при расчете экологических платежей за складирование 50% золошлаков годового выхода предусмотреть коэффициент $K_{ст1}$;

б) при расчете экологических платежей оставшихся неиспользованных объемов золошлаков годового выхода предусмотреть повышающий коэффициент $K_{ст2}$;

в) в случае отгрузки золошлаков в объеме более 50% от текущего выхода не взимать экологические платежи за складирование не востребовавшей части золошлаков.

По истечении 7 лет предлагается ежегодно рассчитывать платежную базу следующим образом:

а) при расчете экологических платежей за складирование 40% золошлаков годового выхода предусмотреть коэффициент $K_{ст1}$;

пункт б) оставить без изменений;

в) в случае отгрузки золошлаков в объеме более 60% от текущего выхода не взимать экологические платежи за складирование не востребовавшей части золошлаков.

Предлагается в течение первых 7 лет использовать предложенную автором формулу для расчета ежегодных экологических платежей за размещение золошлаков текущего выхода с целью достижения показателей, предусмотренных Энергетической стратегией до 2035 г. [8] и Комплексным планом по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности [74]:

$$П_{пл} = 0,5 \cdot M_{зш} \cdot H_{плj} \cdot K_{ст1} + (0,5 \cdot M_{зш} - M_{исп}) \cdot H_{плj} \cdot K_{ст2}, \text{ руб}, \quad (5.2)$$

где: $M_{зш}$ - масса золошлаков годового выхода, т/год; $M_{исп}$ - масса использованных

золошлаков годового выхода, т/год; $H_{плj}$ – ставка платы за размещение золошлаков j -го класса опасности, руб./т или руб./м³; $K_{ст}$ – стимулирующий коэффициент к ставке платы за размещение золошлаков j -го класса опасности ($K_{ст1}=1$, повышающий коэффициент $K_{ст2}$ определяется Минприроды РФ).

5.3 Исследование существующего и формирование потенциального рынков сбыта золошлаков угольных ТЭС в РФ

5.3.1 Потенциал использования золошлаков в различных секторах экономики

О потенциале использования золы при производстве цемента и бетонов в России и зарубежных странах достаточно подробно описано в подразделе 1.4.2 диссертации. Как упоминалось в 1.4.2, в РФ 2022 году производство цемента составило 60,8 млн тонн. Примерно половина из этого объема приходится на регионы, в которых расположены угольные ТЭС. Согласно ГОСТ [79] до 30 % цемента может быть заменено высококальцевой золой. Таким образом потенциал ее использования составляет около 10 млн т в год с учетом минимального транспортного плеча и снижения транспортных расходов. Эти цифры подтверждаются Министерством энергетики РФ [169]. При этом, при добавлении в состав цемента золы до 30 % повышаются его прочностные качества. Также повышается прочность гипсовых вяжущих материалов при добавлении в них золы в количестве до 20 % [170].

В целом, в строительной отрасли с учетом производства строительных материалов и изделий, дорожного строительства, потенциал использования золошлаков составляет более 14 млн т в год. По данным Министерства энергетики РФ для засыпки оврагов, карьеров и болот потенциал применения золошлаков составляет около 5 млн т в год, рекультивации полигонов ТКО – около 2 млн т в год [169]. Согласно [171] использование золошлаков в производстве строительных материалов и дорожном строительстве позволяет экономить до 10...20% от себестоимости.

Таким образом, общий годовой потенциал использования золошлаков в циркулярной экономике России может составить до 25 млн т.

Первым шагом, направленным на повышение уровня применения золошлаков угольных ТЭС в различных отраслях экономики страны, является исследование как существующего, так и потенциального рынков сбыта. С этой целью необходимо располагать набором исходных данных - уникальных для каждой ТЭС с учетом марок сжигаемого топлива и его характеристик, принятых технологических схем, технологий, оборудования, режимов работы ТЭС, как, например, следующие:

- схема принятых технологических процессов эвакуации, отгрузки и складирования невостребованной части ЗШМ, производства товарной продукции или промпродуктов на их основе;
- основные показатели, характеризующие технологический процесс золошлакоудаления, переработку и реализацию товарной продукции с учетом технической и экологической безопасности, объема производства и использования, качественных характеристик и конъюнктуры спроса в регионе;
- технические требования к основному технологическому оборудованию систем ЗШУ, характеристики агрегатов с учетом объемов эвакуации золошлаков и их переработки в промпродукт или товарную продукцию.

Кроме этого, необходимо располагать данными по региону с учетом расположения объектов, на которых возможно использовать золошлаки с возможной потребностью замещения исходного сырья золошлаками, дорожными картами развития регионов с целью определения потенциальных объемов использования золошлаков ТЭС взамен природного сырья, добавок при изготовлении строительных материалов и смесей, мелиорантов и т.д. Особенный акцент нужно сделать на проектах крупнотоннажного использования золошлаков, а также высокотехнологичных проектах, при реализации которых продукция из золошлаков является максимально востребована рынком. Исходные данные также могут меняться в зависимости от того, является ли объектом рассмотрения существующая или проектируемая ТЭС.

Более подробный перечень исходных данных приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Исходные данных для анализа объемов и возможностей использования золошлаков ТЭС

1. Общие исходные данные по системе ЗШУ	
1.1. Мощность всей ТЭС и энергоблоков	
1.2 Вид топлива, его характеристики	
1.3. Способ сжигания топлива	
1.4. Способ вывода шлака из котлоагрегата	
1.5. Объем выхода золошлаков, всего, в т.ч.: шлака, золы	
1.5.1. Годовой выход золошлаков	
1.5.2. Максимальный выход ЗШМ	
1.5.3. Минимальный выход ЗШМ	
1.6. Золоулавливание	
1.6.1. Способ золоулавливания	
1.6.2. Тип золоуловителя	
1.7. Свойства золы и шлака	
1.7.1.Физико-механические характеристики	
1.7.2.Химико-минералогический состав	
1.7.3.Температура	
1.7.4.Радиоактивность	
1.7.5.Ограничения по использованию при производстве товарной продукции	
1.8. Схема системы ЗШУ	
2. Внутренний транспорт золошлаков	
2.1.Шлакоудаление	
2.1.1.Способ шлакоудаления от котла	
2.1.1.1.Механический	
2.1.1.2.Гидравлический	
2.1.1.3.Пневматический	
2.1.2. Дальность транспортирования	
2.2.Золоудаление	
2.2.1.Способ золоудаления	
2.2.1.1.Гидравлический	
2.2.1.2.Пневматический	
2.2.1.3.Комбинированный	
2.2.2.Дальность транспортирования от котлов до промбункеров установок внешнего транспортирования золошлаков	
2.2.3.Количество точек эвакуации золы из золоуловителя	
2.3. Схема внутреннего транспорта золы и шлака	
3. Внешний транспорт ЗШМ	
3.1.Вид системы ЗШУ (совместное или раздельное ЗШУ)	

Продолжение таблицы 5.2

3.2. Шлакоудаление до золошлакохранилища или до бункеров отгрузки шлака
3.2.1. Способ транспортирования
3.2.2. Дальность транспортирования и условия прокладки трасс до ЗШХ/до установок отгрузки шлака потребителям
3.2.3. Максимально часовая подача шлака на золошлакохранилище
3.2.4. Расход шлаковой пульпы
3.2.5. Показатели установки внешнего транспорта шлака
3.2.5.1. Тип и количество насосов
3.2.5.2. Установленная и потребляемая мощность насосов
3.2.5.3. Диаметры и общая протяженность шлакопроводов, трубопроводов осветленной воды, вспомогательных технологических трубопроводов
3.3. Золоудаление до золошлакохранилища или до установок отгрузки потребителям
3.3.1. Способ транспортирования
3.3.2. Дальность транспортирования и условия прокладки трасс до ЗШХ/до установок отгрузки золы потребителям
3.3.3. Максимально часовая подача золы на ЗШХ
3.3.4. Расход золовой пульпы
3.3.5. Показатели установок внешнего транспорта золы
3.3.5.1. Тип и количество насосов
3.3.5.2. Установленная и потребляемая мощность насосов
3.3.5.3. Диаметры и общая протяженность золопроводов, трубопроводов осветленной воды, вспомогательных технологических трубопроводов
3.3.6. Схема внешнего транспорта золы и шлака
4. Узлы и установки отгрузки золы, шлака и золошлаковой смеси
4.1. Вид товарной продукции
4.2. Годовой объем отгрузки товарной продукции
5. Цеха и предприятия по производству товарной продукции
5.1. Вид товарной продукции
5.2. Годовой объем производства товарной продукции
6. Исходные данные по субъекту РФ (региону)
6.1. Дорожная карта по развитию региона с учетом строительства новых дорог, аэропортов, морских портов, зданий, сооружений, железнодорожных узлов с указанием расстояний до объектов
6.2. Расположение следующих объектов с указанием расстояний до них:
6.2.1. Заводов-изготовителей строительных материалов, смесей и изделий, включая бетонные и цементные производства
6.2.2. Карьеров и шахт
6.2.3. Железных дорог
6.3. Наличие в регионе компаний, занимающихся автоперевозкой промышленных отходов

5.3.2 Исследование свойств и характеристик золошлаков

Следующим этапом, необходимым для повышения уровня применения золошлаков угольных ТЭС является обеспечение качества образовавшихся золошлаков ТЭС требованиям нормативных документов. Золошлаки, образован-

ные при сжигании различных марок углей, имеют разные свойства и характеристики, что коренным образом влияет на сферы и направления их применения. Возможно три варианта сценария:

1. Исследование свойств проб золошлаков, отобранных на золошлакоотвале существующей ТЭС;
2. Исследование свойств проб золошлаков, отобранных из системы золоудаления существующей ТЭС;
3. Исследование свойств проб золошлаков, образованных в результате опытного сжигания топлива (в случае проектирования новой ТЭС).

Для обеспечения качества золошлаков требованиям нормативных документов предлагается следующая последовательность действий:

1. Изучение требований нормативных документов в части использования золошлаков ТЭС в различных применениях.
2. Отбор проб золошлаков, образованных от сжигания угля на ТЭС или в результате опытного сжигания.
3. Исследование физико-механических характеристик, химико-минералогических свойств, токсичности и радиоактивности проб золошлаков.
4. Анализ и сравнение полученных результатов исследований проб с требованиями нормативных документов в области применения золошлаков ТЭС.
5. Подготовка заключения о возможности использования золошлаков ТЭС в различных направлениях экономики страны с учетом возможных ограничений по использованию.

Основные угли, которые сжигаются на твердотопливных ТЭС, - кузнецкие, канско-ачинские и экибастузские. Золой от сжигания этих углей обладают очень разными характеристиками и свойствами, которые определяют направления их применения.

Зола экибастузского угля является кислой, в ее составе преобладают оксиды кремния и алюминия (таблица 5.3), есть небольшое количество легкоплавких компонентов [172]. Преобладание алюмосиликатов в золе свидетельствует о ее высокой абразивности. Такая зола имеет большой потенциал применения в

строительной индустрии. Бетоны на основе зольных цементов по своим показателям не уступают бетонам на обычном цементе, а по водонепроницаемости превышают их. При этом, используя золошлаковые отходы в естественном состоянии, можно получать тяжелые бетоны, а в молотом состоянии – мелкозернистые бетоны [170].

Таблица 5.3 - Химические характеристики золы экибастузских углей.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO ₂	SO ₃
61,5	27,4	5,65	1,17	0,49	1,49	0,42	0,32	0,52	0,17	0,57

Золы, образующиеся при сжигании экибастузских углей, предлагается использовать для производства следующих строительных материалов:

- высокопрочные минеральные вяжущие на основе золы для производства портландцемента;
- ячеистый бетон (газобетон), в котором зола используется в качестве наполнителя и полностью заменяет песок. Доля золы в общей массе сырья может достигать 55 %;
- аглопорит, используемый для производства бетонов и теплоизоляционных засыпок (аглопоритовый гравий является наиболее золоемким продуктом - до 90 % золы);
- силикатный кирпич;
- зольный гравий.

Кроме строительного сектора, зола экибастузских углей может использоваться в сельском хозяйстве, как разрыхлитель для тяжелой глинистой почвы, а также в дорожном строительстве взамен щебня и песка при сооружении земляного полотна, дорожной одежды, для устройства укрепленных оснований, в качестве заполнителя и минерального порошка в асфальтобетонах; для вертикальной планировки территорий.

Продуктами переработки золы являются: микросферы, железный концентрат, алюмосиликаты.

Зола кузнецких углей является кислой, в ее составе преобладают алюмосиликаты (таблица 5.4) [122].

Таблица 5.4 - Химические характеристики золы кузнецких углей.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO ₂	SO ₃
60,2	21,0	8,3	3,3	1,5	0,8	2,1	0,8	0,4	0,3	0,2

Основными направлениями использования золы кузнецких углей является строительный сектор. Зола используется для производства:

- компонентов бетонных и растворных смесей при производстве тяжелых, легких, ячеистых бетонов и строительных растворов на минеральных и органических вяжущих;
- в виде топливно-отощающей добавки для производства обжиговых керамических изделий, силикатного кирпича, зольного гравия.

Используется в проектах дорожного строительства, вертикальной планировки территорий и сельском хозяйстве.

Продуктами переработки золы являются: микросферы, железный концентрат, алюмосиликаты.

Золы канско-ачинских углей резко отличаются от рассмотренных выше видов золы, их относят к типу основных, в составе преобладают оксиды кальция. Содержание оксида кальция может меняться с 20 до 45 %, а в золе березовского угля – до 60%. Содержание оксидов кремния варьируется от 30 до 50% в зависимости от угля.

Направления использования золы канско-ачинских углей:

- наполнитель при производстве бетонов взамен песка;
- минеральная добавка в цементе или компонент другого вяжущего при изготовлении строительных бетонов и растворов;
- вяжущее для частичной замены извести или цемента в ячеистых бетонах автоклавного и неавтоклавного твердения;
- дорожное строительство (подстилающие подсыпки на основе высококальциевой золы);

- вертикальная планировка территорий;
- закладка отработанных штреков шахт и рекультивация карьеров.
- сельское хозяйство (производство удобрений, раскисление почвы).

Продуктами переработки золы являются: микросферы, железный концентрат, алюмосиликаты.

5.3.3 Планирование и реализация мероприятий в части максимального использования золошлаков в производственных процессах предприятий России

С целью снижения негативного воздействия на окружающую среду от угольных ТЭС и увеличения объемов использования золошлаков в экономике России приоритетными считать безводные системы удаления золы и шлака при строительстве новых угольных энергоблоков и реконструкции действующих угольных ТЭС.

После исследования рынка сбыта золошлаков угольных ТЭС, определения перечня перспективных проектов по вовлечению золошлаков в хозяйственный оборот с учетом объемов использования золошлаков, проведения исследований свойств и характеристик золошлаков предлагается приступить к реализации пилотных проектов по приоритетному использованию побочных продуктов сжигания угля в разных регионах РФ. Разработка, реализация и поддержка государством комплексных региональных программ повышения объемов использования золошлаков ТЭС позволит улучшить экологическую обстановку вблизи действующих угольных ТЭС

Шаги, которые целесообразно предпринимать на всех этапах реализации проектов:

1. До начала реализации проектов проводить оповещение и просвещение общественности в СМИ и посредством личного общения о пользе подобных проектов, их выгодах для всех членов общества с привлечением авторитетных экспертов научного сообщества [173].

2. На всех этапах жизни проекта - от разработки технического задания до его реализации привлекать экспертов в области обращения с золошлаками ТЭС для сопровождения и консультирования.
3. Приоритетными должны являться проекты использования золошлаков ТЭС, отгруженных с золошлакоотвалов, находящихся в черте городов и других населенных пунктов.
4. При выборе технологий обращения с золошлаками ТЭС предпочтение должно отдаваться сухим системам ЗШУ.
5. Удаление золы и шлака должно быть РАЗДЕЛЬНЫМ.
6. Системы золоудаления должны обеспечивать надежное и непрерывное удаление всей уловленной в сухих золоуловителях золы во всем диапазоне изменения ее физико-механических характеристик и при любых эксплуатационных нагрузках котла.
7. Установка отгрузки сухой золы потребителям с оборудованием для приготовления невостробованной части золы к экологически приемлемым технологиям ее размещения на золошлакоотвале должна быть транзитным технологическим узлом системы ЗШУ.
8. Полная себестоимость удаления золы с учетом экологических затрат и платежей должна быть минимальной.
9. Системы золоудаления должны иметь возможность отгрузки сухой золы по заявкам потребителей в объеме до 100 % от ее текущего выхода из золоуловителей.
10. Системы золоудаления независимо от эксплуатационных нагрузок котлов, марок сжигаемых углей и их соотношений должны постоянно обеспечивать качество и количество отгружаемой сухой золы потребителям не хуже, чем определено техническими условиями и договорами на ее поставку. Состав и свойства золошлаков должны контролироваться химическими лабораториями ТЭС.
11. Установки внутреннего пневмозолоудаления должны обеспечивать отбор от котлов и транспортирование золы по естественно образующимся в электро-

фильтрах группам фракций, что позволит существенно повысить объемы использования золы, отгружаемой разным потребителям в зависимости от ее крупности.

12. Группы фракций золы для установок внешнего пневмотранспорта должны формироваться на основании исследований существующего и перспективного рынков сбыта золы с учетом стабильности потребительских свойств золы при сжигании углей различных марок.

13. Системы пневмозолоудаления должны оказывать минимальное технологически достижимое воздействие на окружающую среду и надежно эвакуировать золошлаки при различных режимах транспортирования.

14. Системы пневмозолоудаления должны быть максимально технологически гибкими и адаптируемыми к изменяющимся техническим условиям на поставку золы потребителям.

15. Системы пневмозолоудаления должны быть максимально автоматизированы и механизированы.

16. Невостребованная часть золошлаков должна размещаться на золошлакоотвалах в виде продуктов отложенного спроса и/или экологически приемлемыми способами.

17. Отгружать максимально возможное количество сухой золы, применяемой в качестве минеральной добавки или наполнителя при изготовлении тяжелых, легких, ячеистых бетонов, сухих строительных смесей и строительных растворов. Согласно ГОСТ 25818–2017 [79], в РФ до 30 % цемента может быть заменено сухой высококальциевой золой.

18. При внедрении технологий сухого ЗШУ предоставлять субсидии на компенсацию части затрат, которые понесли угольные ТЭС и котельные на модернизацию или реконструкцию систем ЗШУ с переходом на безводные системы.

19. В случае заинтересованности участников рынка в золошлаках определенного качества с учетом их химико-минералогического состава и физико-механических свойств, а также в продуктах их переработки предпочтение должно отдаваться таким потребителям.

20. При подготовке к внедрению технологий получения продуктов из золошлаков ТЭС на основании изученных характеристик и свойств исходных золошлаков выполнять аналитическое обоснование и выбор методов извлечения углеродного продукта, железосодержащего концентрата, алюмосиликатного продукта. Необходимо проведение лабораторных технологических испытаний с целью получения продуктов из золошлаков, после чего создается опытная установка.

21. Невостребованную в высокотехнологичных проектах часть золошлаков следует использовать в проектах дорожного строительства, вертикальной планировки территорий, рекультивации отработавших горных выработок.

22. При использовании золошлаков в проектах дорожного строительства необходимо строительство опытно-экспериментальных участков на автомобильных дорогах федерального, регионального и муниципального значения.

23. При строительстве новой или реконструкции действующей ТЭС раздел проекта «Оценка воздействия на окружающую среду» (ОВОС) должен содержать все необходимые обоснования предлагаемых решений по обращению с золошлаками, саму оценку воздействия помимо определения размера и границ санитарно-защитной зоны для золоотвала, после чего ОВОС выносится на общественное обсуждение и согласование с соответствующими государственными органами.

5.4 Результаты исследований рынка сбыта золошлаков на примере ТЭЦ-22

ПАО «Мосэнерго»

5.4.1 Анализ результатов отгрузки золошлаков ТЭЦ-22

На рисунке 5.1 приведены результаты анализа данных в период с 2004 по 2013 гг., представленных ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго», по внутреннему потреблению золошлаков (отсыпка дамб и дорог гидрозолошлакоотвала) и отгрузке золошлаковой смеси из гидрозолоотвала внешним потребителям.

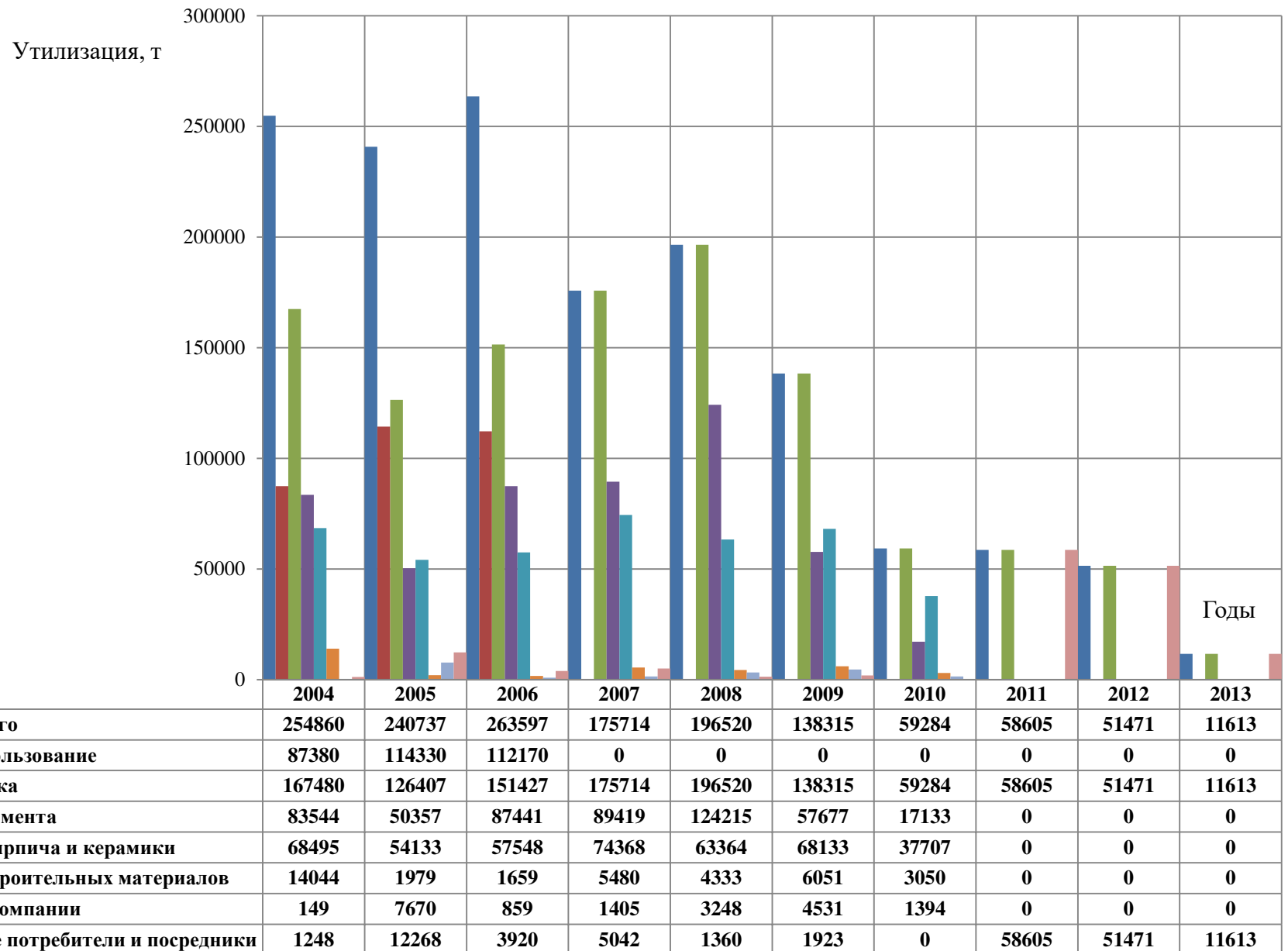


Рис. 5.1 - Утилизация золошлаков ТЭЦ-22 в 2004-2013 гг.

Результаты диссертационной работы по исследованию рынка по

Представленные данные сгруппированы для удобства анализа по основному признаку производственной деятельности согласно [174]:

1. Предприятия цементной промышленности,
2. Предприятия по производству обжигового кирпича и строительной керамики,
3. Предприятия по производству и продаже строительных, отделочных и нерудных (инертных) материалов,
4. Строительные компании,
5. Потребители с неопределенной сферой применения золошлаков и посреднические организации.

Начиная с 2007 г. прекратилось внутреннее использование золошлаков на отсыпку дамб и дорог гидрозолошлакоотвала ТЭЦ-22. Основными внешними потребителями золошлаков являлись предприятия цементной промышленности, а также предприятия по производству кирпича и керамики.

Резкий спад реализации золошлаков ТЭЦ-22 предприятиям по производству цемента, бетонов и керамического кирпича, а также другим организациям для строительных и других целей вызван следующими основными причинами:

- снижение объемов строительства и, соответственно, производства цемента, бетонов и керамического кирпича вследствие экономического кризиса в России и странах мирового сообщества, наступившего в 2008 г.;
- снижение дефицита традиционного природного сырья, компенсируемого золошлаковой смесью из гидрозолоотвалов ТЭС, вследствие снижения объемов производства цемента, бетонов и керамического кирпича в Московском регионе;
- непостоянство потребительских свойств золошлаковой смеси из ГЗО, особенно потерь при прокаливании (п.п.п.), фракционного состава и влажности;
- внедрение на части цементных заводов современных «сухих» технологий производства цемента, в которых предусмотрена возможность использования сухой летучей золы, соответствующей стандартам России [172] и Европейского

союза [175], но не золошлаковых смесей из гидрозолошлакоотвалов;

- производство более широкой гаммы бетонов, рецептурой которых предусмотрено использование сухой летучей золы в соответствии с российскими и зарубежными стандартами [79] и [84], но не отвальных золошлаковых смесей с существенно непостоянными свойствами;
- значительное сокращение числа мелких строительных фирм с практически неконтролируемым качеством выполнения работ, которые активно использовали золошлаки в качестве гидравлических вяжущих для замещения части цементов, а также в качестве инертных наполнителей с нарушениями требований нормативных документов по производству бетонов;
- передача функций продавца золошлаков от филиала ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» непосредственно в Генеральную дирекцию ПАО «Мосэнерго».

Кроме того, отгрузка золошлаков имеет ярко выраженный сезонный характер. Основная масса золошлаковой смеси отгружалась с марта по октябрь с пиком отгрузки в последние годы в сентябре-октябре.

5.4.2 Потребительские свойства и ТУ на золошлаки ТЭЦ-22

Исследован химический состав проб сухой золы текущего выхода с поля электрофильтра 11Б ТЭЦ-22, а также состав золошлаков с гидрозолошлакоотвала (таблица 5.5). Результаты исследований влаги, потерь при прокаливании и гранулометрического состава золошлаковой смеси из гидрозолошлакоотвала ТЭЦ-22 приведены в таблице 5.6.

Зола ТЭЦ-22 соответствует 5 классу опасности и удовлетворяет требованиям по токсичности.

Краткая характеристика результатов анализа 21 пробы золошлаковой смеси из гидрозолошлакоотвала ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго». Пробы отобраны из 12 скважин с глубиной отбора от 2,7 до 8,0 м. Среднее содержание влаги по всем пробам - 27,8 % (диапазон; 17,6...35,0 %). Средняя величина потерь при прокаливании (п.п.п.) – 16,6 % (диапазон: 9,0...31,1 %).

Таблица 5.5 - Результаты определения химического состава золы ТЭЦ-22.

Наименование показателей, % по массе	Проба №2-золашлаки с золовой карты №3	Проба №3-зола с электрофильтра №11Б
п.п.п.	10,49	16,53
Na ₂ O	0,80	1,03
MgO	1,59	0,69
Al ₂ O ₃	21,18	22,36
SiO ₂	45,55	45,55
CaO	3,93	1,25
TiO ₂	0,79	0,80
Fe ₂ O ₃	7,61	9,24
K ₂ O	1,84	1,40
V ₂ O ₅	0,013	0,0082
Cr ₂ O ₃	0,10	0,12
MnO	0,14	0,17
P ₂ O ₅	0,33	0,40

Таблица 5.6 - Результаты анализов на определение влаги, п.п.п. и гранулометрического состава

Место отбора, глубина отбора в м, номер пробы	W _{общ} , % по массе исходной пробы	Результаты исследований, % по массе сухой пробы				
		п.п.п.	Крупность по рассевке		п.п.п.	
			> 0,045 мм	< 0,045 мм	> 0,045 мм	< 0,045 мм
Скважина №1; 3,0 м; №7	26,6	14,6	25,5	74,5	30,7	9,2
Скважина №2; 5,5 м; №16	28,9	17,2	27,7	72,3	34,2	10,2
Скважина №3; 4,2 м; №12	30,5	16,7	7,9	92,1	41,3	14,6
Скважина №3; 7,0 м; №11	26,1	31,1	63,6	36,4	43,0	10,4
Скважина №4; 2,7 м; №17	21,3	14,9	33,2	66,8	25,9	8,7
Скважина №4; 6,4 м; №4	17,6	14,0	23,2	76,8	29,7	9,3
Скважина №5; 4,4 м; №3	35,8	21,4	42,2	57,8	32,6	12,2
Скважина №6; 5,1 м; №18	26,0	16,3	23,7	76,3	36,0	9,3
Скважина №6; 8,0 м; №1	28,6	9,0	26,7	73,3	20,7	4,5
Скважина №7; 4,2 м; №21	29,4	11,7	6,8	93,2	40,4	9,2
Скважина №7; 7,0 м; №15	35,0	16,8	14,6	85,4	33,1	13,1
Скважина №8; 3,0 м; №2	28,1	16,2	32,6	67,4	32,5	8,5
Скважина №9; 5,0 м; №6	25,7	12,6	5,9	94,1	37,0	11,1
Скважина №10; 3,2 м; №20	29,0	18,2	39,5	60,5	33,3	9,1
Скважина №10; 7,0 м; №5	26,1	16,1	25,2	74,8	33,1	10,4
Скважина №11; 3,0 м; №10	27,8	16,5	18,8	81,2	33,4	12,2
Скважина №11; 5,0 м; №9	30,2	17,8	31,3	68,7	35,0	9,9
Скважина №11; 7,0 м; №8	29,0	15,8	27,7	72,3	28,4	10,0
Скважина №12; 3,0 м; №14	30,5	20,6	39,5	60,5	41,7	7,8
Скважина №12; 4,5 м; №13	28,5	16,3	28,6	71,4	33,2	9,7
Скважина №12; 5,1 м; №19	22,6	15,5	23,1	76,9	34,5	10,0
Средние величины	27,8	16,6	27,0	73,0	33,8	10,0

*W_{общ} - влага, с которой проба поступила в лабораторию.

Рассевка всех проб на 2 фракции дала следующие результаты:

- крупнее 45 мкм: доля по сухой массе – 27 %, содержание горючих – 33,8 %;
- менее 45 мкм: доля по сухой массе – 73 %, содержание горючих – 9,97 %.

Следовательно, из 1 т обезвоженной золошлаковой смеси, после ее рассевки на фракции больше и меньше 45 мкм, можно получить 270 кг горючего материала с теплосодержанием 2984 МДж (713 Мкал), удельная теплота сгорания полученного горючего материала – 11,05 МДж/кг (2640 ккал/кг). Для сравнения: Подмосковский бурый уголь имеет удельную теплоту сгорания 8,33 МДж/кг (1990 ккал/кг).

Наиболее перспективное место – скважина №3, в которой фракция > 45 мкм имеет содержание горючих 41,3...43,0 %. Хорошие показатели у скважины №12 (глубина 3,0 м): доля крупной фракции – 39,5 %, содержание горючих – 41,7 %.

Наименее перспективны для извлечения горючих из золошлаковых отходов из скважин 4 и 11 (глубина 7,0 м): содержание горючих здесь меньше 30 %. Чёткой зависимости содержания крупных фракций и горючих от глубины отбора пробы не обнаружено.

ТУ 1511-003-00102798-2008. «Минеральная добавка на основе золошлаковых смесей ТЭЦ-22 для керамической промышленности. Технические условия» разработаны ООО «С-Сервис», согласованы с ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» и утверждены ОАО «Мосэнерго» 12.11.2008.

Согласно упомянутым ТУ требуемая величина п.п.п. составляет не более 15 % по массе (определено в ТУ 21-31-2-82), а фактическая величина п.п.п. для золошлаковой смеси ТЭЦ-22 является переменной величиной и колеблется в диапазоне 9...31,1 %.

ТУ 5711-001-00102798-2008. «Заполнители техногенные на основе золошлаковых смесей ТЭЦ-22. Технические условия» разработаны ООО «С-Сервис», согласованы с ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» и утверждены ОАО «Мосэнерго» 12.11.2008.

Золошлаковые смеси ТЭЦ-22 по виду сжигаемого угля и плотности образуемого шлака характеризуются как смеси от сжигания каменного угля с плотным шлаком, образующегося в топках с жидким шлакоудалением.

Согласно данным ТУ техногенные заполнители и наполнители в зависимости от области применения подразделяются на виды (I-V) в соответствии с данными таблицы 5.7.

Таблица 5.7 - Области применения техногенных заполнителей на основе золошлаковых смесей

Вид заполнителя	Наименование заполнителя, наполнителя и активной минеральной добавки	Наименование золошлаковой смеси	Вид бетона по области применения	Достижимый эффект (полная замена крупного или мелкого заполнителя, частичная замена крупного или мелкого заполнителя)
I	крупный заполнитель	рядовой несортированный шлак ГОСТ 26644	тяжёлый бетон на различных вяжущих	частичная или полная замена крупного заполнителя
II	крупный комбинированный заполнитель	крупнозернистая золошлаковая смесь по ГОСТ 25592-91	тяжёлый бетон на минеральных и органических вяжущих	частичная или полная замена крупного и мелкого заполнителя, возможна экономия цемента, улучшение технологических свойств бетонной смеси
III	мелкий комбинированный заполнитель	среднезернистая золошлаковая смесь по ГОСТ 25592-91	тяжёлый, мелкозернистый бетон	частичная замена крупного заполнителя в тяжёлом бетоне; частичная или полная замена мелкого заполнителя; улучшение технологических свойств бетонных смесей; возможна экономия цемента; частичная или полная замена мелкого заполнителя в мелкозернистых бетонах
IV	кремнезёмистый наполнитель	мелкозернистая золошлаковая смесь с размером шлака не более 0,315 мм	строительные растворы тяжелые, легкие бетоны, плотный силикатный бетон	частичная замена песка; улучшение технологических свойств раствора, экономия цемента
V	активная минеральная добавка	зола гидроудаления и сухого отбора	ячеистые бетоны, строительные растворы, бетоны	вместо кварцевого песка с целью экономии цемента и заполнителя

Заполнители на основе золошлаковых смесей ТЭЦ-22 I-III видов, а также наполнитель и активная минеральная добавка на основе золы гидроудаления или золы сухого отбора по основным строительно-техническим свойствам и химическому составу должны соответствовать показателям, приведенным в таблице 5.8.

Таблица 5.8 - Показатели заполнителей на основе золошлаковых смесей ТЭЦ-22

Наименование показателей (норма/факт)	Компоненты золошлаковых смесей			
	Зольная составляющая для заполнителей I-III вида	Шлаковая составляющая для заполнителей I-III вида	Зола гидроудаления или зола сухого отбора	Шлак
Плотность, г/см ³	(1,88...2,29)	2,6	(2,0...2,3)	2,6
Объёмная насыпная масса, г/см ³	(0,95...1,14)	(1,1...1,4)	(0,85...1,1)	
Удельная поверхность, см ² /г			>1500/ (2200...4600)	
Остаток на сите 008, % по массе	/<50		/(8,4...30)	
Дробимость шлака в цилиндре, %		20 для фракции 10...20 мм/		
Стойкость против силикатного и железистого распадов – потеря массы, % по массе не более				
силикатный распад		8/		8/
железистый распад		5/		5/
Морозостойкость – кол-во циклов попеременного замораживания и оттаивания		>100/		>100/
Содержание сернистых соединений и сернокислых в пересчёте на SO ₃ , % по массе не более	3,0/0,8	3,0/0,8	3,0/0,8	3,0/0,8
в том числе сульфидной серы, % по массе не более	1/		1/	
Содержание оксида кальция, % по массе не более	10/6		10/6	
Содержание оксида магния, % по массе не более	5/2,6		5/2,6	
Содержание щелочных оксидов Na ₂ O и K ₂ O, % по массе не более	3/0,5		3/0,5	
Содержание несгоревшего топлива (п.п.п.), % по массе не более				
Для бетонов железобетонных конструкций	10/(10...20)		10/(10...20)	
Для бетонов, бетонных конструкций и изделий	15/(10...20)		15/(10...20)	

Возможность использования комбинированных крупного и мелкого заполнителей, а также наполнителя и активной минеральной добавки на основе золошлаковых смесей при содержании п.п.п. более 10 % при изготовлении бетонов для железобетонных конструкций, армированных обычной ненапрягаемой арматурой, определяется после проведения исследований по коррозионной стойкости арматуры на конкретных материалах.

Возможность применения золошлаковых смесей для полной замены мелкого и крупного заполнителей в тяжелых и легких бетонах, а также оптимальное количество ее для частичной замены заполнителей устанавливают в результате подбора состава бетона на конкретных материалах при условии обеспечения требуемых показателей, качества бетона в изделиях, конструкциях и коррозионной стойкости арматуры.

При полной или частичной замене заполнителей золошлаковой смесью в целях обеспечения коррозионной стойкости ненапрягаемой арматуры в железобетонных конструкциях, эксплуатируемых в неагрессивных средах, содержание зольной составляющей золошлаковой смеси и мелкозернистой смеси в бетоне не должно превышать расход портландцемента, при этом минимальный расход цемента устанавливают по ГОСТ 26633-2015 [176].

Увеличение содержания мелкозернистой смеси или зольной составляющей золошлаковой смеси допускается после проведения специальных исследований по деформативным свойствам бетонов и коррозионной стойкости арматуры, выполненных на конкретных материалах.

Применение золошлаковых смесей в бетонных и железобетонных конструкциях, предназначенных для работ в агрессивных средах, может быть допущено при условии удовлетворения требований СП 28.13330.2017 [177], предъявляемых к качеству бетона в зависимости от назначения конструкций и условия их работы.

Применение золошлаковых смесей в бетонах для преднапряженных конструкций, армированных высокопрочной термически упрочненной арматурой,

склонной к коррозионному растрескиванию, не допускается без проведения специальных исследований.

Влажность заполнителей на отработанной формовочной смеси ТЭЦ-22, отгружаемых круглогодично не должна превышать 15 %.

При отгрузке заполнителей в зимний период, особенно III-V видов, необходимо применять меры, предотвращающие смерзание, а в летний период – пыление.

Для гарантированного сбыта золошлаков энергетики различным группам потребителей необходимо соблюдение ряда условий, основными из которых являются следующие:

- безусловное соблюдение требований к потребительским свойствам (качеству) золошлаков, указанным в технических условиях (ТУ) потребителей на поставку золошлаков;
- гарантии постоянства потребительских свойств (качества) золошлаков;
- соответствие графика поставок золошлаков графику производства продукции потребителя золошлаков;
- привлекательность цены золошлаков в качестве заместителя традиционных природных ресурсов;
- возможность заключения долгосрочных договоров на поставку золошлаков с фиксированными ценами.

5.5 Переработка золошлаков, размещенных на золошлакоотвалах ТЭС.

Рекомендации по выбору перспективной системы ЗШУ

Параллельно с переработкой и утилизацией золошлаков ТЭС текущего выхода необходимо работать по второму направлению – переработка и утилизация золошлаков, размещенных на золошлакоотвалах ТЭС, минимизируя количество накопленных отходов и снижая экологическую нагрузку в районе расположения угольных ТЭС.

В некоторых странах-членах ЕС эксплуатируются угольные ТЭС без золошлакоотвалов; таким образом, перерабатывается 100% золошлаков текущего выхода. Строительство золошлакоотвалов ТЭС запрещено на государственном уровне в Германии. Там сухая зола после придания ей товарных свойств отправляется в большие силосы, расположенные вблизи главных корпусов ТЭС, из которых производится отгрузка золы потребителям при постоянном мониторинге характеристик отгружаемых продуктов. Во многих странах-членах ЕС создана система обращения с побочными продуктами сжигания угля от котельных установок до установок по переработке золошлаков. Существенное влияние на рынок золошлаков имеет сезонность, с учетом которой неравномерность выхода золошлаков в холодный и теплый периоды незначительна в странах с мягким климатом, что обусловлено достаточно теплыми зимами и коротким промежутком холодного периода. В регионах России, в которых преобладает угольная генерация (Дальний Восток, Сибирь), наблюдается существенная неравномерность выхода золошлаков зимой и летом в связи с резким перепадом температур и длительным холодным периодом, что не может не сказаться на рынке золошлаков и подходах к решению проблемы. В регионах с резким перепадом температур для ТЭС технически невозможно обходиться без золошлакоотвалов. В этом случае с учетом сезонности автором предлагается на основании исследованного рынка сбыта золошлаков выполнять комплекс мероприятий по получению промпродукта из золошлаков или продуктов отложенного спроса, временно размещенных раздельно на золо- и шлакоотвалах ТЭС, которые в таком случае будут являться местами временного хранения невостребованных в холодное время побочных продуктов сжигания угля, а также узлами отгрузки золы и шлака потребителям, а не объектами их постоянного накопления и захоронения со всеми вытекающими последствиями. Такой подход является особенно актуальным в связи с ужесточением природоохранного законодательства и кратным повышением экологических платежей за размещение отходов, а также необходимостью оформления комплексных экологических разрешений на объекты, оказывающие существенное воздействие на окружающую среду. Потребителями продукции из

золошлаков будут, прежде всего, предприятия строительного комплекса, которые в соответствии с требованиями нормативных документов ГОСТ 25818-2017 [79], ГОСТ 31108-2020 [178], ГОСТ 379-2015 [179], ГОСТ 28013-98 [180], ГОСТ Р 56592-2015 [181] будут использовать сухую золу для следующих целей:

- активные минеральные добавки для производства портландцементов;
- активные минеральные добавки и наполнители для производства тяжелых, легких, ячеистых, жаростойких бетонов и строительных растворов;
- активные минеральные добавки и наполнители для сухих строительных смесей на цементной основе;
- активные минеральные добавки для производства силикатного кирпича;
- отошающие добавки для керамических изделий.

Для переработки золошлаков, размещенных на золошлакоотвалах в течение длительного времени, рекомендуется руководствоваться рекомендациями, рассмотренными в подразделе 5.3.3, которые являются технически достижимыми в конкретных условиях.

В случае, если полностью отказаться от системы ГЗУ технически невозможно, то одной из перспективных схем системы золошлакоудаления ТЭС при ее реконструкции или модернизации является схема, изображенная на рисунке 5.2. Удаление золы и шлака реализуется отдельно с учетом требований потребителей. Преимуществом схемы является наличие цеха товарной продукции из золы, размещенного непосредственно на угольной ТЭС, что позволяет переработать часть золы на электростанции. В такой схеме предусмотрена максимальная отгрузка востребованной сухой золы потребителю в авто- и железнодорожный транспорт, оставшаяся востребованная часть отправляется в цех товарной продукции, а невостребованная в текущий период времени часть транспортируется на хранилище сухой золы или промпродукта с возможностью ее дальнейшей реализации впоследствии, в то время как оставшаяся невостребованная часть золы с помощью системы гидротранспорта отправляется на гидрозолоотвал, с которого также предусмотрена отгрузка гидратированной золы в автомобильный или железнодорожный транспорт. В таком случае и установка отгрузки сухой золы,

и узлы отгрузки сухой и гидратированной золы, размещенные на золоотвалах, являются не тупиковыми ветками, а промежуточными звеньями в системе обращения с золошлаками ТЭС. Недостатком такой схемы является наличие воды в системе ЗШУ, что приводит к дополнительным эксплуатационным расходам в системе обращения с золошлаками.

Наиболее перспективной с точки зрения технико-экономических и экологических показателей является безводная или «сухая» система обращения с золошлаками ТЭС, в которой предусмотрена 100%-ная возможность отгрузки сухой золы потребителю, а в случае наличия невостребованной в текущий период части золы, последняя отправляется в хранилище сухой золы или промпродукта, где хранится не более одного года, и откуда отгружается в автоцементовозы или железнодорожные вагоны. Шлак, которого образуется существенно меньше, чем золы, поступает на переработку и отгрузку потребителям в соответствии с их требованиями. Блок-схема такой системы изображена на рисунке 5.3. Вопросы экономической оценки внедрения сухих систем ЗШУ на угольных ТЭС рассмотрены в [182].

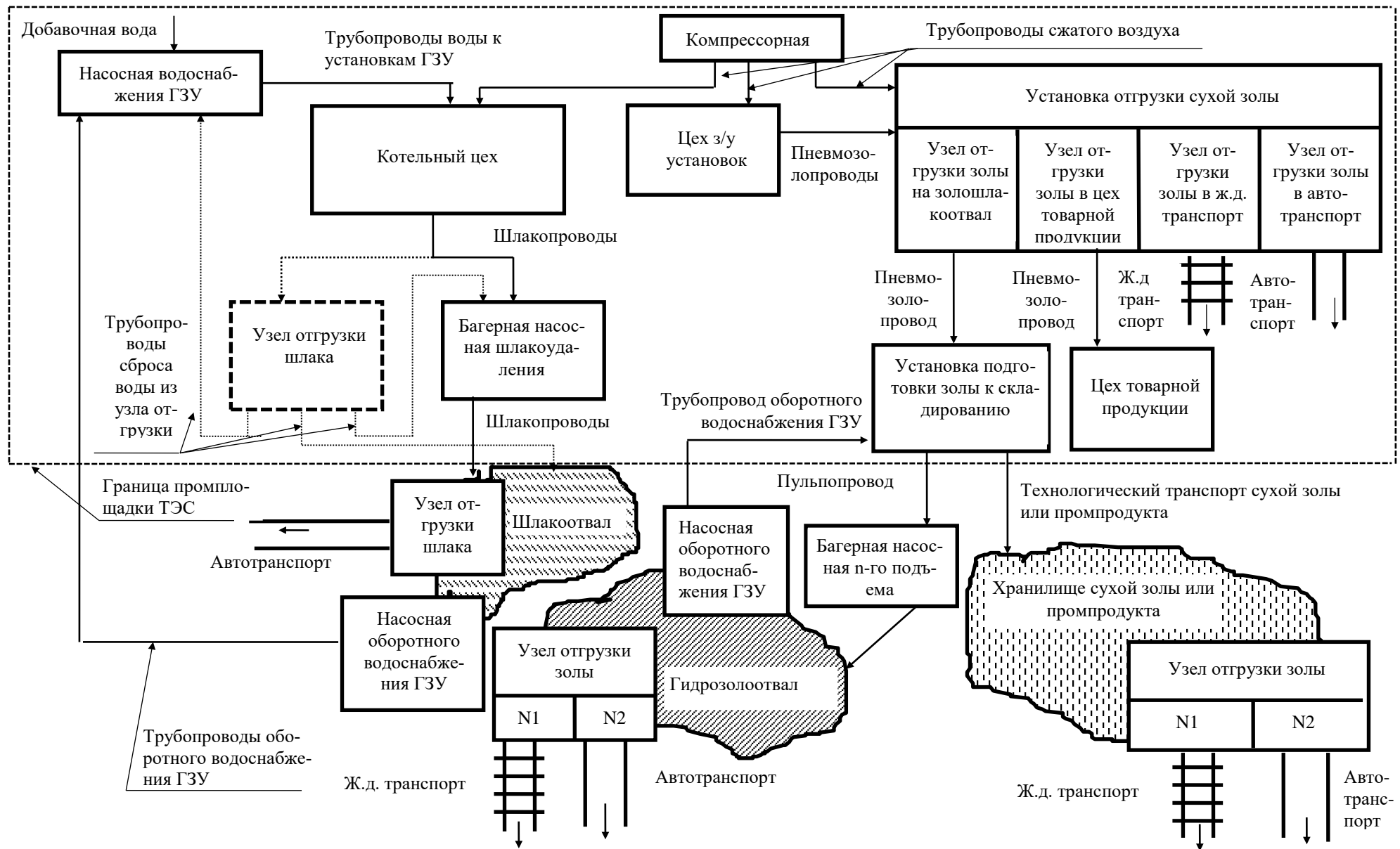


Рисунок 5.2 - Блок-схема системы золошлакоудаления при раздельном транспортировании, отгрузке и складировании неостребованной части золы и шлака на золошлакоотвалах

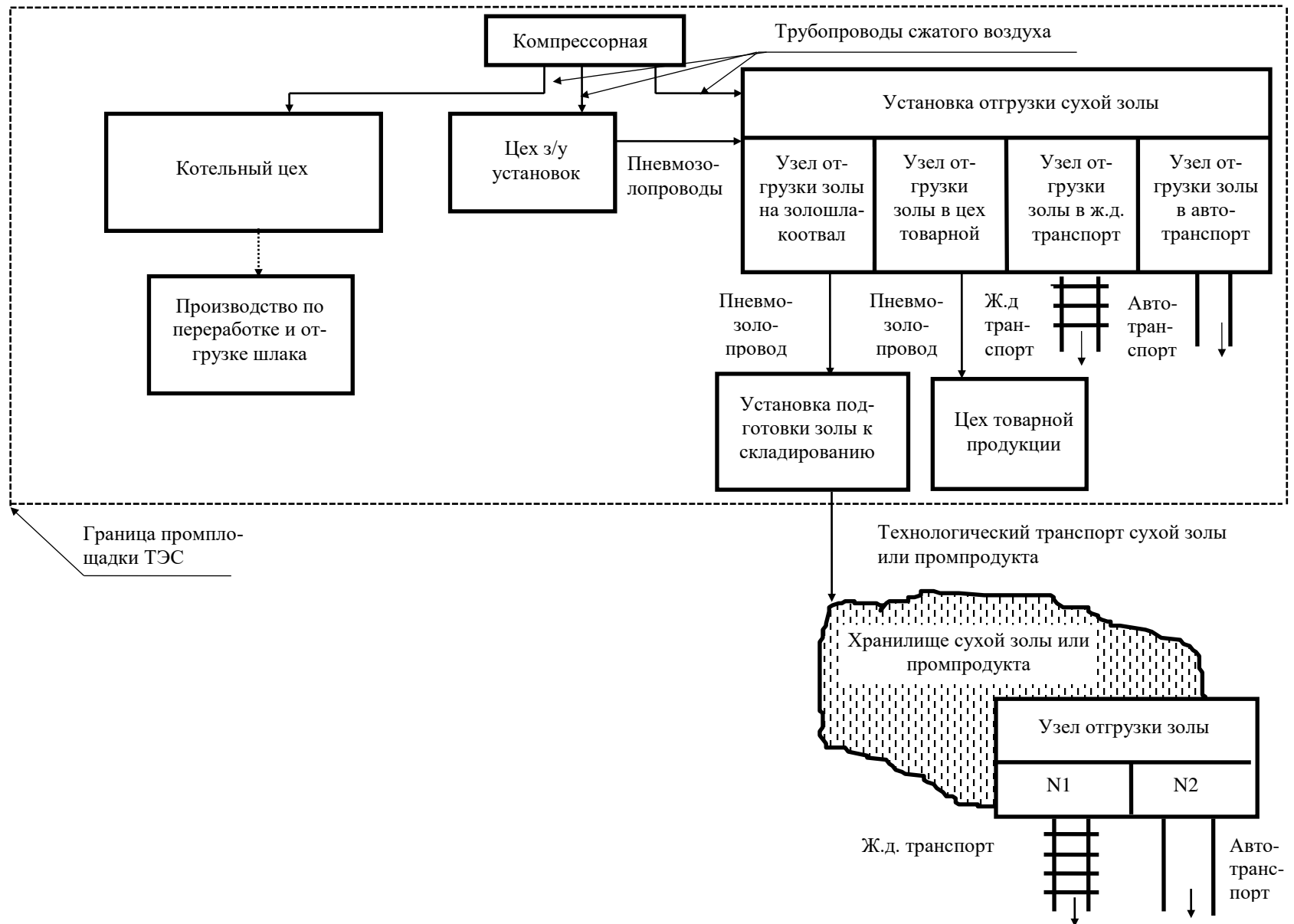


Рисунок 5.3 - Блок-схема перспективной системы ЗШУ при раздельном транспортировании, отгрузке и временном складировании невостребованной части золы

5.6 Реализация технологий комплексной переработки золошлаков ТЭС

Наиболее эффективным решением проблемы обращения с золошлаками ТЭС является внедрение технологий их комплексной переработки. Комбинация таких технологий зависит от состава и характеристик золошлаков, спроса на конечную продукцию, что должно быть обосновано требованиями рынка. При наличии конечных потребителей продукции из золошлаков существует возможность их 100%-ной переработки в продукцию текущего или отложенного спроса. В научно-технических источниках можно встретить последовательность технологий, приведенную на рисунке 5.4. На первом этапе получают алюмосиликатные микросферы различных фракций, собирая их с поверхности гидрозолошлакоотвала в случае применения систем гидравлического транспорта золошлаков на ТЭС. Далее из золошлаков извлекается недожог, который может повторно использоваться в качестве топлива на ТЭС и котельных. При этом, применяются как безводные, так и флотационные методы извлечения недожога. Для повышения эффективности извлечения недожога рекомендуется предварительно измельчать золошлаки. Количество несгоревшего угля в золе может составлять 25% и более. Содержание потерь при прокаливании выше 5% является лимитирующим фактором при применении золошлаков при производстве строительных материалов и изделий. В случае использования безводных систем золошлакоудаления на ТЭС алюмосиликатные микросферы различных фракций получают путем обработки золы в гидроциклонах и специальных центрифугах. На следующем этапе методом магнитной сепарации происходит разделение золы на магнитную и немагнитную фракции. Магнитный концентрат из золошлаковых отходов может быть использован для производства ферросилиция, чугуна и стали. Он может служить исходным сырьем для порошковой металлургии. И только на после этого оставшиеся отходы направляются на производство строительных материалов и используются в строительных проектах.



Рисунок 5.4 - Принципиальная схема этапов комплексной переработки золошлаков ТЭС

Получение из золы ценных и редких материалов и компонентов, включая редкие, редкоземельные и благородные металлы в настоящее время освоено на стадиях НИОКР и является направлением, которое необходимо проработать в будущем для возможного применения в промышленном масштабе с учетом технико-экономических и экологических характеристик процессов глубокой переработки. В золе содержится 1-2% специальных концентратов Ti, Ni, Cr, Sr и редкоземельных металлов Nb, Sn, Y. Известны кислотные и щелочные технологии комплексной переработки золошлаков с получением редких и редкоземельных металлов. Для извлечения микроэлементов основного и амфотерного характера используют растворы минеральных кислот (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) [183–185]. Для извлечения микроэлементов кислотного и амфотерного характера используют различные щелочные растворы (NaOH , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NH_4OH) [186, 187]. В золе кузнецких и экибастузских углей, в основном, содержатся глинистые минералы. Наличие α -кварца и муллита в них делает малоэффективными кислотные и щелочные методы из-за стойкости данных фаз к химическому воздействию. Из золы бурых углей канско-ачинского бассейна скандий и итрий извлекались солянокислотными растворами [188]. Недостатками упомянутых методов является использование большого количества кислот и щелочей, проблемы выделения редкоземельных металлов из сложных по составу растворов. Поэтому на данном этапе рекомендуется внедрять наиболее масштабные и изученные технологии комплексной переработки золошлаков (рисунок 5.4).

Написан ряд научных статей, в которых рассмотрены различные техниче-

ские решения и технологии переработки золошлаков ТЭС, тем не менее, в Российской Федерации до последнего времени не было комплексных решений, доведенных до стадии промышленного внедрения, не считая технологии производства стройматериалов из золошлаков. Примером реализации комплексного подхода по переработке золошлаков ТЭС ООО «Приморская ГРЭС» является деятельность компании ООО «Экометт-Луч». По заказу вышеназванной компании институтом Горного дела ДВО РАН проведены исследования свойств и характеристик золошлаковых отходов ООО «Приморская ГРЭС», по результатам которых разработан проект и в 2017 г. запущена в производство опытно-промышленная линия по переработке золошлаковых отходов с получением неагломерированного железного концентрата и угольного продукта (недожога). В том же году отгружена первая партия полученного железного концентрата корпорации “China Chengtong Holdings Group” [15].

Научные и практические результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, использованы при разработке стратегии развития компании ООО «Экометт-Луч» (Приложение Ж), а также в НИР «Теоретический анализ возможности использования угольного продукта производства ООО «Экометт-Луч» на котлах Приморской ГРЭС», выполненной по заказу ООО «Экометт-Луч» в 2020 г.

Установленная мощность ООО «Приморская ГРЭС» составляет 1467 МВт. Проектный уголь – Бикинский 1Б. В Приморском крае более 62% от общего количества золошлаков V класса опасности образуется в результате сжигания угля на Приморской ГРЭС. Согласно данным Росприроднадзора золошлаки Приморской ГРЭС представляют собой золошлаковую смесь от сжигания углей практически неопасную или золошлаковую смесь от сжигания углей при гидроудалении золы-уноса и топливных шлаков практически неопасную. По состоянию на 2022 г. на ООО «Приморская ГРЭС» образовано 1,283 млн тонн золошлаков. В 2023 г. поставлена цель переработать не менее 30% от общего объема золошлаков, образованных от сжигания твердого топлива в Приморском крае, что составит 418 млн т. [189].

Усредненный химический состав золошлаков ООО «Приморская ГРЭС» представлен в таблице 5.9 по данным электростанции.

Таблица 5.9 - Химический усредненный состав золошлаковой смеси ООО «Приморская ГРЭС»

Содержание элементов в составе золошлаковых смесей, %									
п.п.п.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃
21,54	47,09	18,71	3,33	5,09	1,44	0,39	0,59	1,82	-

В собственности ООО «Приморская ГРЭС» находятся 2 объекта размещения и хранения золошлаковых отходов – золошлакоотвал №1 и золошлакоотвал №2.

Золошлакоотвал №1 находится вблизи промплощадки Приморской ГРЭС. Состоит из 3 карт. Первая и третья карты отработаны, территория рекультивирована, участки переданы муниципалитету. Вторая карта является аварийно-резервной. Золошлаки не размещаются на золошлакоотвале №1. Проектная емкость золошлакоотвала №1 составляет 9,693 млн тонн. Проектная общая площадь – 122,4 га.

Золошлакоотвал №2 действующий, овражного типа, расположен вне населенных пунктов, в 8 км к юго-западу от промплощадки станции. Проектная емкость золошлакоотвала №2 составляет 85,171 млн тонн. Проектная общая площадь – 1023,8 га [189].

На золошлакоотвалах ООО «Приморская ГРЭС» размещено 64,4 млн т золошлаков на 01.01.2022.

До 2023 г. ООО «Экометт-Луч» в пгт. Лучегорск реализует пилотный инвестиционный проект по комплексной переработке золошлаковых смесей. Проект состоит из двух этапов: по первому этапу объем переработки золошлаковых смесей до 2024 г. составляет 320 тыс. тонн в год, по второму этапу этот показатель должен составить 3,2 млн т в год. Продукты переработки золошлаковой

смеси – угольный продукт, железный концентрат и грунт песчаный (песок). Более подробные показатели по объему производства продукции ООО «Экометт-Луч» приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Планируемые производственные показатели компании

Наименование продукта	% от общего количества	Объем производства, т/год	
		1 этап	2 этап
Концентрат железный	6,5	20 800,0	208 000,0
Уголь обогащенный бурый	6,0	19 200,0	192 000,0
Грунт песчаный (песок)	87,5	280 000,0	2 800 000,0
Всего	100,0	320 000,0	3 200 000,0

Основные характеристики и характеристики минеральной части Бикинского угля и угольного продукта, полученного из золошлаков Приморской ГРЭС, приведены в таблицах 5.11 – 5.13.

Таблица 5.11 – Характеристики проектного топлива и угольного продукта

Параметр	Бикинский 1Б (Проектный)	Угольный продукт (анализ лаборатории ОАО «ВТИ»)
Влажность на рабочую массу, %	45,00	40,73
Зольность на рабочую массу, %	15,95	9,36
Содержание серы, %	0,30	0,31
Содержание углерода, %	25,55	32,68
Содержание водорода, %	2,15	3,04
Содержание азота, %	0,70	6,38
Содержание кислорода, %	10,35	7,50
Выход летучих на сухую беззольную массу, %	56,00	24,46
Теплота сгорания низшая, ккал/кг (МДж/кг)	2000,00 (8,37)	2850,00 (11,93)
Коэффициент размолоспособности	1,10	1,10

В результате расчетов установлено, что угольный продукт производства ООО «Экометт-Луч» имеет несколько большую склонность к шлакованию по сравнению с проектным углем. Это относится к образованию железистых отложений и отложению на основе кальция. По остальным параметрам загрязнения и шлакования угли находятся на одном уровне. Относится к 1 классу взрывоопасности, поэтому дополнительных мер по обеспечению взрывобезопасности не требуется.

Таблица 5.12 – Состав минеральной части и температуры плавления

Наименование	Обозначение	Бикинский 1Б (Проектный)	Угольный продукт (анализ лаборатории ОАО «ВТИ»)
Оксид кремния, %	SiO ₂	61,20	42,19
Оксид алюминия, %	Al ₂ O ₃	26,80	21,29
Оксид титана, %	TiO ₂	0,90	0,82
Оксид железа, %	Fe ₂ O ₃	3,40	8,18
Оксид кальция, %	CaO	2,90	7,60
Оксид магния, %	MgO	2,00	2,45
Оксид калия, %	K ₂ O	2,40	1,49
Оксид натрия, %	Na ₂ O	0,40	0,70
Оксид фосфора, %	P ₂ O ₅	0,50	0,49
Оксид серы, %	SO ₃	1,50	7,86
Температура начала деформации, °C	t _a	1380,00	1240,00
Температура размягчения, °C	t _b	1460,00	1270,00
Температура полусферы, °C	t _c	-	1290,00
Температура разжижения, °C	t _{нж}	1500,00	1330,00

Содержание серы в топливе практически такое же, как и в проектном угле, но т.к. содержание CaO гораздо больше (7,60% против 2,90%), то это способствует связыванию оксидов серы в дымовых газах и снижению их выбросов в атмосферу. Содержание азота в полученном угольном продукте значительно больше, чем в проектном топливе, что приведет к повышению концентрации оксидов азота в дымовых газах. Учитывая мощности предприятия по поставке не-проектного угля, его доля в смеси не будет превышать 5,30 %, а в этом случае повышение концентрации оксидов азота составит 60 мг/нм³.

Таблица 5.13 – Характеристики проектного топлива и топливной смеси

Уголь	Проектный	Смесь в пропорции 94,70/5,30 %
Влажность на рабочую массу, %	45,00	44,77
Зольность на рабочую массу, %	15,95	15,60
Содержание серы, %	0,30	0,30
Содержание углерода, %	25,55	25,93
Содержание водорода, %	2,15	2,20
Содержание азота, %	0,70	1,00
Содержание кислорода, %	10,35	10,20
Теплота сгорания низшая, МДж/кг (Ккал/кг)	8,37 (2000,00)	10,15 (2425,00)
Выход летучих на сухую беззольную массу, %	56,00	40,23

Основные данные по тепловому расчету для проектного топлива и смеси с содержанием непроектного угля в количестве 5,3% представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Основные данные по тепловому расчету

Доля угольного продукта ООО «Экометт-Луч»	0,00	0,053
Расчетный расход топлива, т/ч	241,92	236,55
Полный расход топлива, т/ч	247,62	242,12
Температура на выходе из топки, °С	998,10	1000,30
Температура уходящих газов, °С	145,70	144,80
Температура горячего воздуха, °С	372,50	371,20
Температура воздуха, в рассечке ТВП, °С	269,00	268,10
Температура острого пара, °С	545,00	545,00
Температура вторичного пара, °С	545,00	545,00
КПД котла, %	89,59	89,70
Доля впрыска №2 по острому пару	0,64	0,62
Расход байпаса по вторичному пару, т/ч	380,26	375,63
Расход вторичного пара в поверхности, т/ч	179,74	184,37

Параметры как острого пара, так и пара промперегрева выдерживаются на уровне проектных значений. С увеличением доли непроектного топлива расход натурального топлива на котел снижается. При доле непроектного угля 5,30 % расход топлива снижается на 5,50 т/ч (с 247,62 т/ч на проектном угле до 242,12 т/ч на непроектном). Это обусловлено увеличением низшей теплоты сгорания непроектного топлива. Снижение выхода летучих непроектного топлива приводит к смещению факела вверх, и незначительному повышению температур на выходе из топки с 998 °С до 1000°С. Температуры уходящих газов снижаются на 0,9 °С (с 145,7 °С до 144,8 °С). Это, в свою очередь, приводит к уменьшению потерь тепла с уходящими газами и росту КПД котла с 89,59 % до 89,70 %.

Основными компонентами проб магнитной фракции золошлаков являются оксиды железа, кремния, алюминия, кальция, магния и марганца. Химический состав пробы, полученной из золошлаков Приморской ГРЭС, приведен в таблице 5.15.

Блок-схема переработки золошлаков в продукты, реализованная ООО «Экометт-Луч» приведена на рисунке 5.5.

Таблица 5.15 - Химический состав железной фракции золошлаков Приморской ГРЭС по данным ООО «Экометт-Луч»

Компонент	Содержание, %
SiO ₂	9,11
TiO ₂	0,18
Al ₂ O ₃	4,64
Fe ₂ O ₃ общ	79,22
Fe ₂ O ₃	56,96
FeO	20,03
CaO	3,41
MgO	0,73
MnO	1,67
SrO	0,04
K ₂ O	0,35
Na ₂ O	0,18
S	0,28
Co	0,10
Zn	0,04
P ₂ O ₅	0,55
Cобщ	0,91
CO ₂	1,07
C	0,61
Сумма	99,95

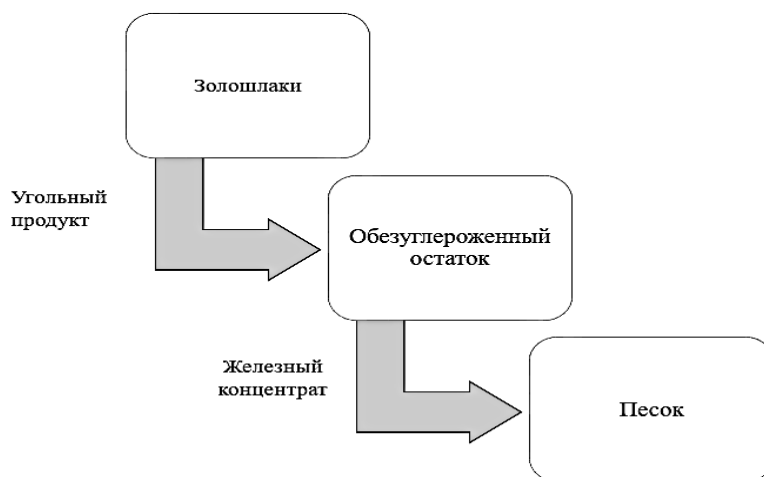


Рисунок 5.5 - Блок-схема получения продуктов из золошлаков ООО «Приморская ГРЭС» согласно первому этапу реализации проекта

Согласно технологическому циклу золошлаки Приморской ГРЭС подвергаются грохочению, что способствует отделению угольной фракции за счет механического воздействия. Обезуглероженный остаток, содержащий фракции

крупностью до 0,5 мм, отправляется на магнитную сепарацию первой ступени с целью, а далее на магнитную сепарацию второй ступени для получения более качественного железосодержащего концентрата, после чего остатком от всех перечисленных выше процессов является песчаный грунт (песок).

ООО «Экометт-Луч» завершило первый этап реализации проекта. В настоящее время смонтировано и введено в работу оборудование для переработки золошлаков ООО «Приморская ГРЭС», которое расположено вблизи золошлакоотвала станции.

С участием автора выполнен анализ возможности использования угольного продукта производства ООО «Экометт-Луч» на котлах Приморской ГРЭС. Установлено, что сжигание 5,3% угольного продукта производства ООО «Экометт-Луч» в смеси с проектным Бикинским углем не приведет к ухудшению эксплуатационных характеристик котла. Изменение экологических характеристик работы котла при сжигании смеси проектного и непроектного углей приведет к снижению выбросов оксидов серы в дымовых газах, а также незначительному росту концентрации оксидов азота в дымовых газах, что удовлетворяет экологическим нормативам.

Также для снижения расхода топлива при производстве тепловой энергии на котельной в с.Губерово, ООО «Экометт-Луч» и КГУП «Примтеплоэнерго» реализует пилотный проект по внедрению многотопливных решений с применением угля, получаемого ООО «Экометт-Луч» из золошлаков ООО «Приморская ГРЭС».

Важным региональным направлением в области обращения с золошлаками ТЭС является создание кластера по производству строительных материалов с использованием золошлаков Приморской ГРЭС. Основными направлениями развития кластера являются:

- развитие сотрудничества между предприятиями – участниками кластера;
- увеличение количества предприятий, внедряющих новые технологии производства стройматериалов;
- создание условий для развития малого и среднего бизнеса в производстве

стройматериалов;

- внедрение инновационных и композитных стройматериалов и изделий из них при строительстве объектов транспортной инфраструктуры, ЖКХ, промышленном строительстве;
- развитие машиностроительной базы по изготовлению современного высокотехнологичного оборудования для предприятий стройматериалов и промышленного домостроения.

Перечень мероприятий с участием ООО «Экометт-Луч» в области обращения с золошлаками на территории Приморского края, который должен быть реализован до 2030 г согласно [189]:

1. Создание кластера по производству строительных материалов с использованием золошлаков (производство цемента, бетонов, портландцементного клинкера, кирпича, асфальтобетонной смеси, минеральных вяжущих; материалов для дорожного строительства и др.).
2. Строительство дорог IV технической категории из стабилизированного грунта песчаного из золошлаков.
3. Холодная регенерация дорожных одежд с применением стабилизированного грунта из золошлаков.
4. Ремонт объектов (покрытия из переработанных материалов, тротуарная плитка, бордюры, ограждения).
5. Технический этап рекультивации нарушенных земель, обратной засыпки котлованов и выемок при проведении строительных работ, рекультивации свалок и полигонов ТКО, планировки естественных неровностей рельефа.
6. Вовлечение неагломерированного угля из золошлаков, как дополнительного топлива на угольных котельных.
7. Применение брикетированного угля из золошлаков на котельных.
8. Производство и поставка железного концентрата.

5.7 Алгоритм действий по реализации комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России

Разработанный алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России приведен на рисунке 5.6. Он предусматривает реализацию двух независимых сценариев и включает следующие элементы комплексного подхода: образование и информационное обеспечение; стратегическое планирование в электроэнергетике; совершенствование НПА и НТД в области обращения с золошлаками ТЭС; формирование рынка сбыта золошлаков; разработка и внедрение технологий обращения с золошлаками; административные и финансовые меры.

Блок «Разработка и внедрение технологий обращения с золошлаками» включает разработку и внедрение технологий сухого удаления золы и шлака на ТЭС при реконструкции эксплуатируемых или строительстве новых угольных энергоблоков, как альтернативу системам ГЗУ; технологий кондиционирования, глубокой переработки золошлаков, а также технологий комплексной переработки золошлаков текущего выхода и отвальной золы с получением продукции из золы в виде зольных микросфер, недожога (углеродного продукта), железного концентрата, алюмосиликатов, редких и редкоземельных металлов.

На рисунке 5.7. представлена перспективная блок-схема производства продуктов из золошлаков энергетики с указанием их назначения. Таким образом, продукцией перспективной угольной ТЭС являются не только тепловая и электрическая энергия, но и побочные продукты сжигания угля, применяемые в различных сферах экономики РФ (энергетике, ЖКХ, металлургии, оборонной промышленности, химической и нефтехимической промышленности, строительном секторе, сельском хозяйстве), потенциал использования которых превышает ежегодные объемы их образования. Последнее позволяет существенно экономить строительные нерудные материалы природного происхождения (песок, гравий, щебень) и способствует развитию минерально-сырьевой базы России.

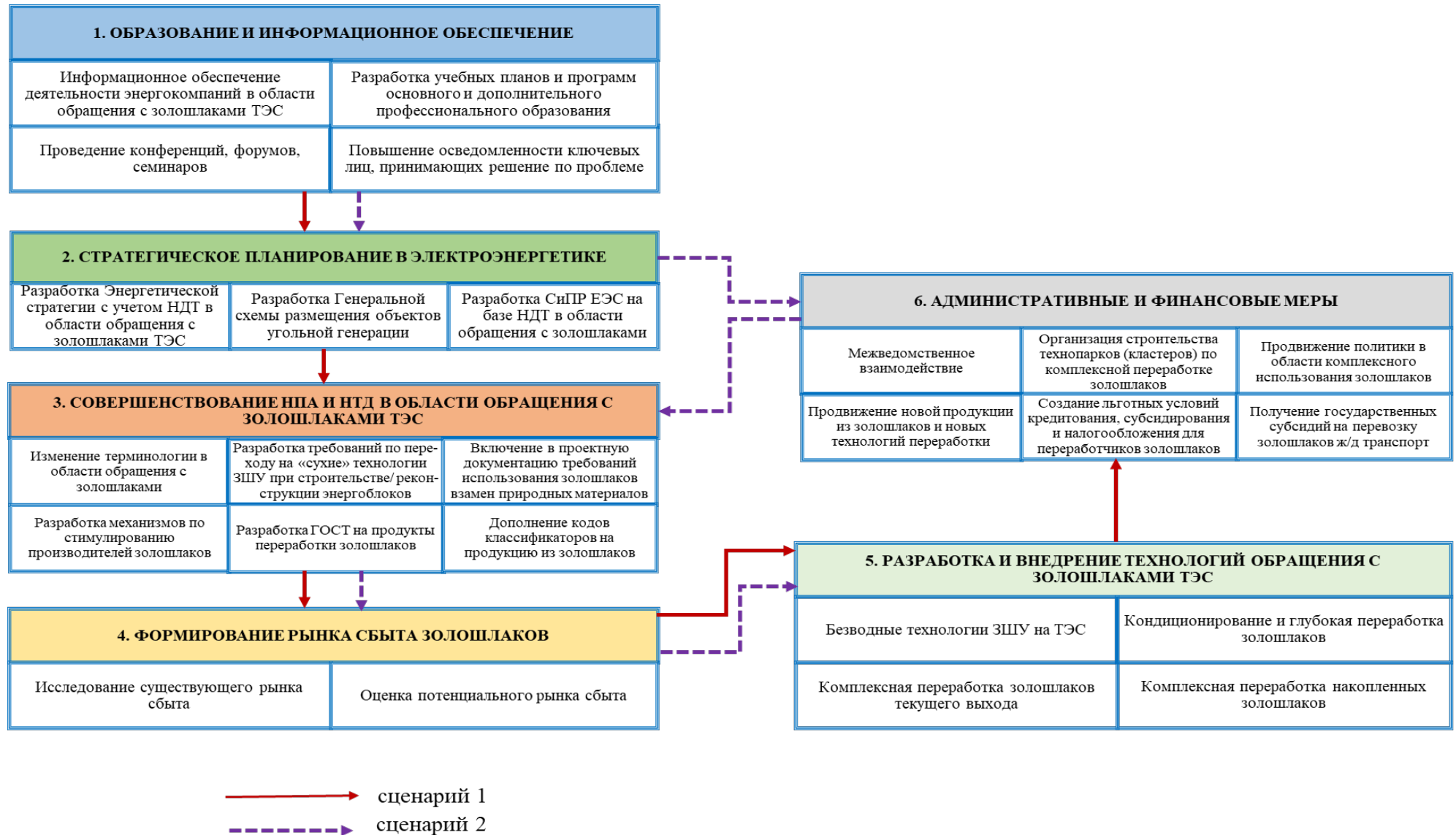


Рисунок 5.6 - Алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России

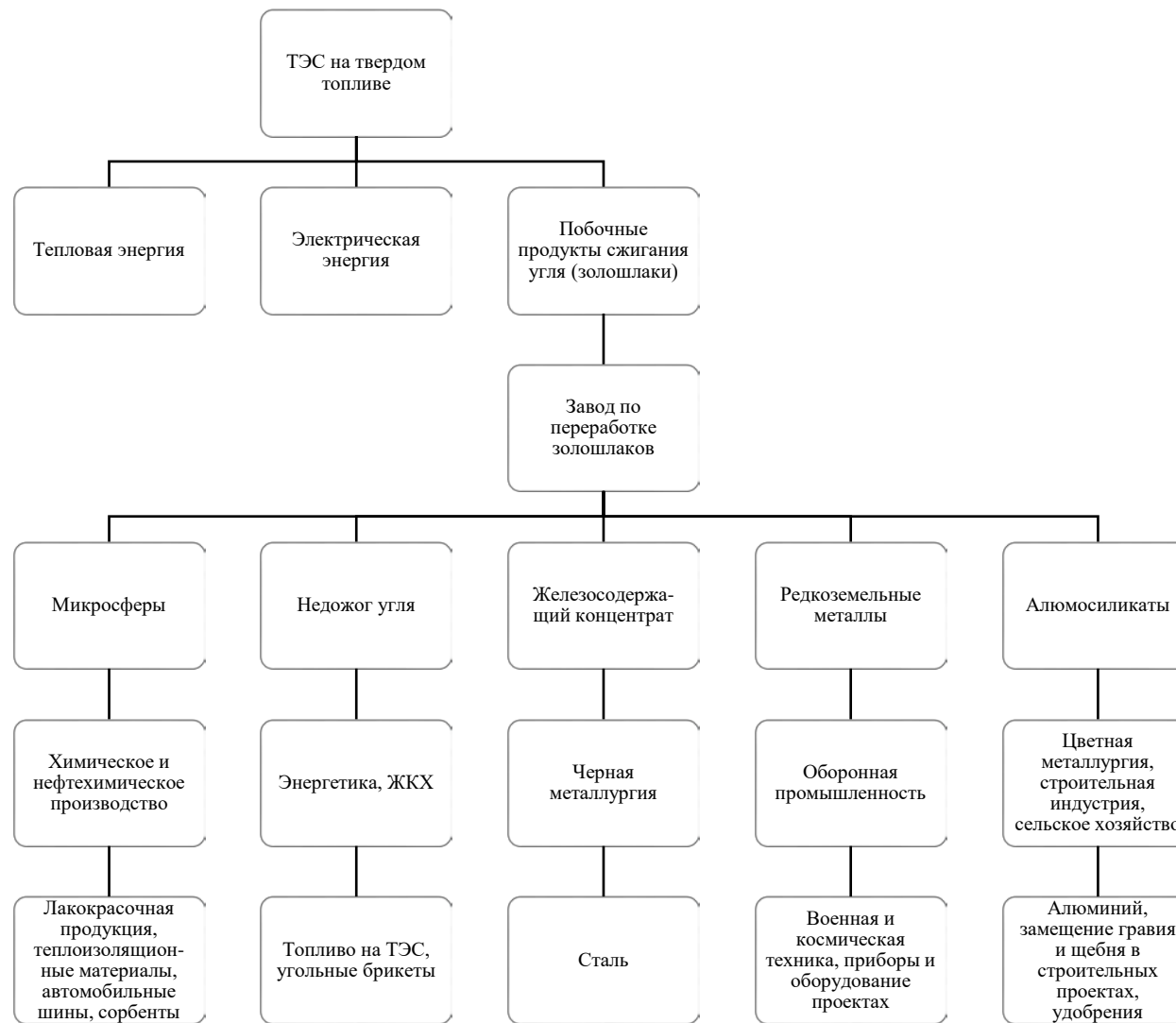


Рисунок 5.7 - Перспективная блок-схема производства продуктов из золошлаков ТЭС и их назначение

Выводы по главе 5

Для реализации комплексного подхода при обращении с золошлаками ТЭС необходимо:

- отдавать приоритет безводным технологиям ЗШУ в проектах строительства новых угольных энергоблоков и при реконструкции действующих систем ЗШУ ТЭС, поскольку это позволяет существенно расширить спектр направлений использования золошлаков в различных отраслях экономики России;
- в части совершенствования нормативно-правовой базы четко разграничить понятия «отход», «вторичный ресурс», «побочные продукты производства»;
- внедрять и тиражировать технологии комплексной переработки золошлаков ТЭС;
- экономически заинтересовать ТЭС в снижении объёмов складирования золы и шлака за счет дифференцированной платы в зависимости от объема размещаемой на золошлакоотвале золы, а также разработать и внедрить механизм стимулирования потребителей золошлаков;
- разработать ГОСТы в части определений, классификаций и характеристик продуктов переработки золошлаков ТЭС;
- разработать стандарты организаций по применению золошлаков в дорожном хозяйстве, согласованные с дорожными и природоохранными органами с последующей разработкой соответствующих ГОСТ;
- проводить постоянный мониторинг свойств и характеристик золошлаков текущего выхода на ТЭС на основании требований нормативных документов и требований потребителей на поставку с целью повышения уровня их применения в различных секторах экономики;
- разработать рекомендации по использованию золошлаков различных углей в зависимости от их свойств в отраслях экономики России;
- исследовать пути и механизмы максимального вовлечения продуктов переработки золошлаков ТЭС, в т.ч. возможности сжигания недожога (угольного

продукта), полученного из золошлаков, совместно с проектными углями, поставляемыми на ТЭС;

- на примере опыта компании ООО «Экометт-Луч» внедрять технологии комплексной переработки золошлаков ТЭС.

Заключение

На основании проведенных исследований решена научно-техническая проблема разработки комплексного подхода при обращении с золошлаками ТЭС для их максимального использования в экономике России, направленная на достижение ключевых показателей по использованию золошлаков ТЭС к 2035 году в объеме 50% согласно Энергетической стратегии РФ. Учитывая необходимость экономии природных ресурсов за счет замещения ими золошлаков ТЭС, данная проблема в настоящее время и стратегически имеет важное экологическое и технико-экономическое значение для РФ.

Сформулированы основные результаты работы:

1. Выявлены основные барьеры, препятствующие эффективному использованию золошлаков ТЭС в РФ, основным из которых является использование систем гидрозолоудаления для транспортирования золы и шлака. Приведено, что ежегодно в экономике России используется менее 20 % золошлаков, что приводит к увеличению негативного воздействия на воздушный, водный бассейны, а также деградации почв в зоне расположения угольных ТЭС. Показано, что применение систем пневмотранспорта, способствующих увеличению объемов использования золошлаков в экономике России, позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию золошлакоотвалов и обеспечивает экономические преимущества безводных систем по сравнению с традиционными системами гидрозолоудаления.
2. Проведены экспериментальные исследования абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок и критических скоростей пылегазовых потоков в Индийском институте технологий Дели. Результаты использованы в отчете по гранту РФФИ №08-08-91300-ИНД_а. Предложена формула для определения оптимальной скорости пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов через критическую скорость пылегазовых потоков. Разработаны базовые рекомендации по эксплуатации существующих и перспективных систем ЗШУ ТЭС с определением оптимальных режимов и параметров транс-

портирования золошлаков. Определено, что при транспортировании низкоконцентрированных пылевоздушных потоков оптимальные скорости в системах пневмотранспорта золы варьируются от 11,0 до 31,0 м/с, а при транспортировании высококонцентрированных - оптимальные скорости варьируются от 1,0 до 11,0 м/с.

3. Проведены экспериментальные исследования свойств и характеристик мелкодисперсных сыпучих материалов. Создан математический аппарат для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов систем пневмо- и гидрозолоудаления ТЭС с учетом основных значимых факторов (абразивность, полидисперсность, форма частиц транспортируемого материала, износостойкость материала труб, угол атаки, радиус поворота потока, диаметр трубопроводов). Определена инструментальная погрешность разработанных зависимостей, которая составила около 13 % с учетом погрешности определения основных факторов, влияющих на абразивный износ. Проведена оценка соответствия разработанных формул результатам экспериментальных исследований по существующим зависимостям; относительная погрешность предлагаемых формул составила 4 % и 21 % для прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов, соответственно.

4. Разработаны усовершенствованные формы поворотов трубопроводов системы ЗШУ с углом отклонения потока на 90, 75, 60 градусов при различных соотношениях радиуса поворота потока R к внутреннему диаметру трубы D с участками стабилизации потока на входе в поворот и выходе из него. Выполнен расчет срока службы колена усовершенствованной геометрической формы, упрочненного алюмотермическим покрытием, с учетом расчета абразивности золы по модели автора. В результате расчета выявлено, что срок службы колена после применения противоабразивных мероприятий не менее, чем в 14 раз превышает срок службы исходного стального колена и может варьироваться в зависимости от параметров транспортирования золы. Результаты диссертационного исследования использованы ООО «Энергохимкомплект» и СП «Хабаровская ТЭЦ-3» при выполнении НИОКР «Разработка технологии защиты поверх-

ностей пульпопроводов при работе на углях с повышенной зольностью. Изготовление опытно-промышленного образца» (патенты РФ №№ 198596 U1, 200900 U1).

5. С целью достижения показателей, приведенных в Энергетической стратегии России до 2035 г., предложен стимулирующий механизм, позволяющий экономически заинтересовать угольные ТЭС в увеличении уровня использования золошлаков.

6. Разработан алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России на основании комплексного подхода, предусматривающего реализацию двух независимых сценариев. Предложенный алгоритм включает: образование и информационное обеспечение; стратегическое планирование в электроэнергетике; совершенствование НПА и НТД в области обращения с золошлаками ТЭС; формирование рынка сбыта золошлаков; разработку и внедрение технологий обращения с золошлаками; административные и финансовые меры.

7. Основные положения работы использованы при анализе существующего и потенциального рынка сбыта золошлаковых материалов ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» в Московском регионе при разработке плана увеличения объемов реализации золошлаков предприятиям стройиндустрии, при анализе соответствия существующей системы обращения с золошлаками задаче увеличения доли сжигания углей в топливном балансе ТЭЦ-22.

8. Материалы диссертации использованы при разработке стратегии развития ООО «Экометт-Луч» - компании - переработчика золошлаков в Приморском крае.

9. Описание технологий обращения с золошлаками, являющимися НДТ, разработанные схемы существующих и перспективных систем ЗШУ ТЭС, рекомендации по выбору оборудования для внутреннего и внешнего транспорта золошлаков на основе НДТ использованы при подготовке Информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» с последующей актуализацией в 2022 г.

10. Материалы диссертационного исследования использованы в учебных дисциплинах программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки сотрудников энергетических предприятий и производств по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

11. Результаты диссертационной работы использованы при разработке раздела «Обращение с золошлаками» базы данных «Наилучшие доступные и перспективные природоохранные технологии в энергетике России» (свидетельство о государственной регистрации базы данных №2013620175, 09.01.2013. Заявка №2012621420 от 13.12.2012).

Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные научные и прикладные результаты диссертационной работы могут быть использованы на энергетических предприятиях и производствах, на предприятиях, занимающихся переработкой золошлаков ТЭС, а также при совершенствовании нормативно-правовой базы в области обращения с побочными продуктами сжигания угля. Применение комплексного подхода при решении проблемы обращения с золошлаками позволит существенно повысить экологические и технико-экономические показатели угольной генерации и, в целом, имеет важное стратегическое значение для России, учитывая возможность замещения золошлаками природных материалов.

Список литературы

1. Спецвыпуск № 8, 2015 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://вэб.пф/common/upload/files/veb/analytics/sd/2015q4.pdf>.
2. Energy Outlook [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>.
3. Веб-сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>.
4. Веб-сайт «Глобальная энергия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalenergyprize.org/ru/2024/02/08/kitaj-rezko-uvelichil-vvod-moshhnosti-ugolnyh-tjes/>.
5. Веб-сайт Системного оператора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2024/tech-disc2024ups/>.
6. Отчет ООН на 2022 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.un.org/annualreport/index.html>.
7. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации. <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/rsskwUHzl25X6IijBy20Doj88faOQLN4.pdf>.
8. Министерство энергетики РФ. Энергетическая стратегия до 2035 г. [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
9. Крылов, Д. А. // Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // ГИАБ. 2017. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/negativnoe-vliyanie-elementov-primesey-ot-ugolnyh-tes-na-okruzhayuschuyu-sredu-i-zdorovie-lyudey>.
10. Zroichikov, N.A., Putilov, V.Y., **Putilova, I.V.** et al. Evaluation of the Influence of Abrasive Wear on the Service Life of Hydraulic Transport Systems of TPPs' Ash and Slag Removal Systems. Therm. Eng. 67, 617–625 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0040601520090128>.

11. Природоохранные технологии на ТЭС: учебник / И.С. Никитина, В.Б. Прохоров, **И.В. Путилова** и др.; под общ. ред. Рогалёва Н.Д. и Прохорова В.Б. - М.: Издательство МЭИ, 2021. - 452 с.
12. Шубов, Л. Я. Вторичные ресурсы, образующиеся в сфере теплоэнергетики. Л. Я. Шубов, К. Д. Скобелев, Д. А. Загорская // https://aventine.ru/wp-content/uploads/2021/07/11_chpt_15.pdf.
13. Putilov, V. The Influence of Terminology on the Effective Solution of the Coal Ash Handling Problem / V. Putilov, **I. Putilova**, H.-J. Feuerborn // KnE Materials Science. - 2017, No. 2(2), –pp. 133-140. <https://doi.org/10.18502/kms.v2i2.959>.
14. Путилов, В. Я. Золошлаки энергетики: статус и определения / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова**, Н. А. Зройчиков, Х. Й. Фоерборн // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 1-3(213-215). – С. 73-83.
15. **Путилова, И. В.** Правовые основы формирования системы эффективного обращения с побочными продуктами сжигания угля / И. В. Путилова, В. Р. Шевцов, Е. А. Шубин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2021. – № 1-3(359-361). – С. 102-112.
16. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Е. А. Пичугин. УДК 504.054:628.544 DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.
17. Темникова, Е. Ю. Выделение магнитной фракции золы уноса Кемеровской ГРЭС / Е. Ю. Темникова, А. А. Лапин, А. Р. Богомоллов, Н. В. Тиунова // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: Материалы IV Всероссийской конференции, Кемерово, 27–28 ноября 2018 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018. – С. 6201-6205. – EDN YNXVFZ.
18. Рыженков, А. Я. О необходимости ликвидации объектов накопленного экологического вреда для перехода России к «зеленой» экономике / А. Я.

Рыженков // Актуальные проблемы российского права. — 2022. Т. 17. — № 3. — С. 160–169. — DOI: 10.17803/1994-1471.2022.136.3.160-169.

19. Сайт «Атомная энергия». Росатом займется переработкой отходов ТЭЦ и котельных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/10/14/107884>.

20. Б.Л. Вишня, В.Я. Путилов. Методические указания по проектированию систем пневмозолоудаления золы от котлоагрегатов, установок отпуска сухой золы потребителям и отгрузки ее на насыпные золоотвалы. РД 34.27.109-96, Екатеринбург, УРАЛТЕХЭНЕРГО, 1997, 119 с.

21. Путилов, В. Я. Ключевые вопросы решения проблемы обращения с золошлаками энергетики в России / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова**, Е. А. Маликова // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: Материалы V международной конференции, Москва, 24–25 апреля 2014 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 58-63.

22. Heidrich, C. // Global opportunities and challenges for coal combustion products with a Circular Economy / C. Heidrich, J. Feuerborn <https://worldofcoalah.org/wp-content/uploads/2022/09/global-opportunities-and-challenges-for-coal-combustion-products-with-a-circular-economy.pdf>.

23. Сайт Всемирной сети по побочным продуктам сжигания угля. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.wwccpn.com.

24. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/NDT/sprav_NDT_2017 (Электронный ресурс).

25. Thomas Adams, Craig Heidrich, Jinder Jow, Joachim Feuerborn. Coal Combustion Products Worldwide: On the Stretch from Suitability to Sustainability. World of Coal Ash, Amway Grand Plaza, Grand Rapids/United States, 13 - 16 May 2024. <https://uknowledge.uky.edu/woca/woca2024/>.

26. Web site of the American Coal Ash Association [E-resource]. Available on: <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2023/12/2022-Production-and-Use-Survey-Results-FINAL.pdf>.

27. Ash Development Association of Australia [E-resource]. Available on: <https://www.adaa.asn.au/resource-utilisation/ccp-utilisation>.

28. Report on fly ash generation at coal / lignite based thermal power plants and its utilization in the country for the year 2021 - 2022 Central Electricity Authority, Thermal Civil Design Division / New Delhi, August 2022.

29. **Putilova, I.** Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy / I. Putilova // International Journal of Hydrogen Energy. - 2023. – Vol. 48, No. 80, – pp. 31040-31048. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.230>.

30. Web site of the American Coal Ash Association [E-resource]. Available on: <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/case-studies/CS-1144-15th.pdf>.

31. Web site of the American Coal Ash Association [E-resource]. Available on: <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/case-studies/CS-Apogee-Stadium.pdf>.

32. Web site of the American Coal Ash Association [E-resource]. Available on: <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2022/01/ASU-Interdisciplinary-Science-and-Technology-Building.pdf>.

33. Сайт Национальной ассоциации развития вторичного использования сырья [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://arvis.online/materials/cases/vetryanaya-elektrostantsiya-v-niagarskom-regione-kanady-postroena-s-primeneniem-zoly-unosa/>.

34. Кумар, В. Препараты, возможности и решения проблемы летучей золы энергетики в Индии / В. Кумар // Материалы II Международного научно-практического семинара «Золышлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 23-24 апреля 2009 г. — М.: НИУ «МЭИ», 2009. — с. 31-36.

35. Kumar V., Mathur M., Sharma P. Fly ash: a billion dollar re-source - wasted so far [E-resource]. Available on: <http://www.c-farm.org/dollar-construction%20world.pdf>.
36. Web site of the European Coal Combustion Products Association [E-resource]. Available on: <https://www.ecoba.com/ecobaccpexs.html>.
37. Web site of NS Energy [E-resource]. Available on: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/medupi-power-plant/>.
38. Сайт ООО «ПСО «Теплит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://twinblock.ru/> (Дата обращения: 27.02.2023).
39. Левченко, В.Н. Опыт переработки золы-уноса Рефтинской ГРЭС / В. Н. Левченко // Материалы V Международной конференции «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 24-25 апреля 2014 г. — М.: НИУ «МЭИ», 2014. — с. 91-94.
40. Барахтенко, В. В. Использование золы уноса при производстве пористых строительных материалов нового поколения // В. В. Барахтенко, Е. В. Зелинская, Е. О. Костюкова, Т. А. Меркульева, М. Н. Самусева, Ф. А. Шутов. // Материалы III Международного Научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 22-23 апреля 2010 г. — М.: НИУ «МЭИ», 2010. — с. 60-63.
41. Балабанов, В. Б. Применение зольных отходов в дорожном строительстве / В.Б. Балабанов, В.Л. Николаенко // Вестник ИрГТУ №6 (53) 2011, с.37-41.
42. Кумар, В. Анализ законодательства Индии в области обращения с золошлаками энергетики / В. Кумар, Г.К. Джа // Материалы V Международной конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 24-25 апреля 2014 г. — М.: НИУ «МЭИ», 2014. — с. 22-26.
43. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. – СПб: Мир и Семья, 2002. –Ч. I. – 988 с.

44. Морозова, Т. Н. Использование бактериального препарата для ремедиации техногенно загрязненных почв / Т. Н. Морозова, Е.С. Белик, Л.В. Рудакова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015. – № 3. – С. 69–81.
45. Сеницын, А. П. Имобилизованные клетки микроорганизмов / А. П. Сеницын, Е. И. Райнина, В. И. Лозинский, С.Д. Спасов. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 288 с.
46. Белик, Е.С. Исследование возможности использования отходов производства в качестве биосорбента / Е.С. Белик, К.А. Злобина // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. - 2016. - № 31. – С.62-75.
47. Горбачева, Т. Т. Золошлаки ТЭЦ как сорбент для очистки сточных вод от ионов аммония / Т. Т. Горбачева, Д. В. Майоров // Теплоэнергетика. – 2022. – № 3. – С. 72-79. – DOI 10.1134/S0040363622030043. – EDN FGVKMW.
48. Фатеев, В. Н. Проблемы аккумулирования и хранения водорода / В. Н. Фатеев, О. К. Алексеева, С. В. Коробцев и др. // Chemical Problems 2018 no. 4 (16), с. 453-483.
49. Вербецкий, В. Н. Гидриды интерметаллических соединений - синтез, свойства и применение для аккумулирования водорода / В. Н. Вербецкий, С. В. Митрохин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2005. № 10 (30). С. 41 – 61.
50. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник под ред. Д. Ю. Гамбурга и Н. Ф. Дубовкина. М.: Химия. 1989. 672 с.
51. Hart, D. // Financial Times Energy Publishing, a division of Pearson Professional Limited, 1997.
52. Irani, R. S. // MRS Bulletin, September 2002. P. 680 - 682.
53. A Multiyear Plan for the Hydrogen R&D Program: Rationale, Structure, and Technology Roadmaps, Office of Power Delivery; Office of Power Technologies; Energy Efficiency and Renewable Energy; U.S. Department of Energy, August 1999.

54. Патент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/217/2176981.html> (Дата обращения: 25.12.2022).

55. Патент N 5653951 USA 3. I. E. Gabis, A. A. Kurdyumov, N. A. Tikhonov. Installation for realization of complex studies on interaction of gases with metals. Vestnik (Herald) of Saint-Petersburg State University, Ser. 4, 1993. Vol. 2 (N 11), pp. 77-79.

56. **Путилова, И. В.** Современное состояние проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России и за рубежом / **И. В. Путилова** // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2023. – № 1(406). – С. 51-62.

57. Патент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/237/2377176.html> (Дата обращения: 25.12.2022).

58. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

59. Путилов В.Я., **Путилова И.В.** «Основы экологии и природоохранной деятельности в энергетике» / Учебное пособие для слушателей программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Электроэнергетика и электротехника», Москва, РИО НИУ «МЭИ», 2018 г., 112 с.

60. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

61. Федеральный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».

62. Федеральный закон №268-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

63. Федеральный закон от 23.11.1995 № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности».

64. Федеральный закон № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе».

65. Федеральный закон № 343-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О недрах».

66. Приказ Минприроды России от 08.12.2020 года №1029 «Об утверждении порядка разработки и утверждения нормативов образования отходов и лимитов на их размещение».

67. Приказ Минприроды России от 25 февраля 2010 г. № 49 «Об утверждении Правил инвентаризации объектов размещения отходов».

68. Приказ Минприроды России от 08 декабря 2020 г. №1028 «Об утверждении Порядка учета в области обращения с отходами».

69. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 N 792 "Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов, утвержденного приказом Минприроды России".

70. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов".

71. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 г N792 «Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов.

72. Указ Президента РФ от 20.04.2017 за №176 «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».

73. Распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года».

74. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 15 июня 2022 года №1557-р «Об утверждении комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности».

75. Сайт Минэнерго РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/18342> (Дата обращения: 01.03.2023).

76. Федеральный закон от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании».

77. Федеральный закон от 19.06.2015 №162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

78. ГОСТ 26644-85 «Щебень и песок из шлаков тепловых электростанций для бетона». Технические условия.

79. ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов». Технические условия.

80. ГОСТ Р 57789-2017 «Золы, шлаки и золошлаковые смеси ТЭС для производства искусственных пористых заполнителей». Технические условия.

81. ГОСТ 25592-2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов». Технические условия.

82. ВСН 185-75 «Технические указания по использованию зол уноса и золошлаковых смесей от сжигания различных видов твердого топлива для сооружения земляного полотна и устройства дорожных оснований и покрытий автомобильных дорог».

83. Putilova, I.V. Review of Regulatory and Technical Documentation in the Field of Ash and Slag Handling at TPPs / I.V. Putilova, N.A. Zroichikov // Thermal Engineering, 2024, Vol. 71, No. 6, pp. 471–481.

84. EN 450-1-2012 Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria.

85. ASTM C618-171: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2017.

86. AS 3582.1: Supplementary cementitious materials, Part 1: Fly ash, 2016.

87. JIS 6201: Fly ash, 1991.

88. IS 3812-1: Pulverized fuel ash — specification, Part 1 For use as Pozzolana in Cement, Cement Mortar and Concrete, 2003.

89. GB/T 1596: Fla ash for cement and concrete, 2017.

90. Сниккарс, П. Н. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кроссотраслевая задача / П. Н. Сниккарс, И. Ю. Золотова, Н. А. Осокин // Энергетическая политика. – 2020. – № 7(149). – С. 34-45. – DOI 10.46920/2409-5516_2020_7149_34. – EDN KXNSGF.

91. Путилов, В. Я. Основные барьеры на пути эффективного решения проблемы обращения с золошлаками энергетики / В. Я. Путилов, И. В. Путилова,

Е. А. Маликова // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2013. – № 1. – С. 016-023.

92. РД 34.02.103-98. Методика оценки технико-экономических показателей систем золошлакоудаления ТЭС с учетом экологических требований // Путилов В.Я., Автономов А.Б., Боричев К.П., Орлов А.В., Маликова Е.А. и др. М.: НТФ “Энергопрогресс”, 1997. 79 с.

93. РД 153-34.1-27.512-2001. Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС // В.Я. Путилов, **И.В. Путилова**, Е.А. Маликова, Б.Л. Вишня, К.П. Боричев. - М.: МЭИ (ТУ), 2001, 20 с.

94. Отчет о НИР. Технические предложения по повышению надежности, экономичности и экологичности систем пневмозолоудаления от сухих золоуловителей при раздельном или совместном факельном сжигании углей различных марок // В.Я. Путилов, Е.А. Маликова. - М.: МЭИ (ТУ), 1999, 50 с.

95. РД 153-34.1-10.341-2001. Нормы расхода материалов перегородок на ремонт аэрожелобов и пневмоаппаратов для транспорта золы. // В.Я. Путилов, С.В. Кобцев, Б.Л. Вишня. - М.: МЭИ (ТУ), 2001, 6 с.

96. РД 153-34.1-10.342-2001. Нормы расхода стальных труб на ремонт пневмозолопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления ТЭС // В.Я. Путилов, С.В. Кобцев, Б.Л. Вишня. - М.: МЭИ (ТУ), 2001, 6 с.

97. Тепловые и атомные электрические станции / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. –М.: Энергоатомиздат, 1995. – 415 с.

98. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций: Учебник для вузов / Л.А. Рихтер, Э.П. Волков. В.Н. Покровский. М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с., ил.

99. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / В.В. Абрамов...**И.В. Путилова** и др.; Под общей ред. В.Я. Путилова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 388 с.: ил.

100. Путилова, И. В. Обзор оборудования и схем систем золошлакоудаления ТЭС / И. В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2023. – № 1(406). – С. 63-76.

101. Путилов, В. Я. Анализ общемировых тенденций и перспектив решения проблемы золошлаков ТЭС в России / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова** // Материалы I Международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование», 23 марта 2007 г., Москва, Издательский дом МЭИ, - М. с.11-17.

102. Путилов, В. Я. Об экологической экспертизе энергетических проектов и внедрении наилучших доступных природоохранных технологий / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – № 4-6(252-254). – С. 82-94.

103. Putilov, V.Y., **Putilova, I.V.** Problems of handling ashes and slags produced at Russian thermal power stations: Barriers, possibilities, and ways of solving them. Therm. Eng. 57, 617–621 (2010). <https://doi.org/10.1134/S0040601510070141>.

104. Cianci, V. Wet vs. dry bottom ash handling compared: one plant's experience / V. Cianci // Modern Power Systems, June 2007. Available at: <https://www.modernpowersystems.com/features/featurewet-vs-dry-bottom-ash-handling-compared-one-plant-s-experience/>.

105. Quattrucci, V. Dry bottom ash technology improves coal fired boiler operations / V. // Quattrucci Power-Gen Europe, April 2004.

106. Takahashi, Y. The First dry bottom ash handling system in Japan / Y. Takahashi // Power-Gen Asia, October 2002.

107. Tarli, R. An efficient and non-polluting bottom ash extraction system Energy for the transition age / R. Tarli, A. Carrea // Florence, Italy (June 1992).

108. Bassetti, F. MAC® - Magaldi ash cooler. Fully-dry bottom ash removal system for elimination of ponds / F Bassetti, D Coppola, D Ricci // World of coal ash conference, Nashville, TN, USA, 5-7 May 2015. 17 pp.

109. Proceedings of the World of Coal Ash Conference (WOCA), May 2015, Nashville, Tennessee, USA, May, 2015.

110. Гавлитин, Н.В. Экологически приемлемые технологии золошлакоудаления на примере Рефтинской ГРЭС ОАО «Энел ОГК-5» / Н.В. Гавлитин, Ю.В. Коломиец // Материалы IV научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 19–20 апреля 2012 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 55 – 58.

111. Хили, М. Применение технологии пневмотранспортирования золошлаков от энергоблоков мощностью 300 и 500 МВт угольных электростанций / М. Хили, Ю. Коломиец // Материалы II научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 23–24 апреля 2009 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 101 – 103.

112. Ricci, D. Beneficial effects of dry bottom ash extraction and recycling in modern PCF power plants / D. Ricci, F. Bassetti, S. Savastano // Fuel, Volume 215, 2018, Pages 13-21, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.088> Beneficial effects of dry bottom ash extraction and recycling in modern PCF power plants.

113. Успенский В.А. Пневматический транспорт. Свердловск: Metallurgizdat, 1959.

114. Гаврилов Е.И. Топливо-транспортное хозяйство и золошлакоудаление на ТЭС: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 168 с.:ил.

115. Назмеев Ю.Г. Системы золошлакоудаления ТЭС. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 572 с.: ил.

116. Рекомендации по аэродинамическому расчету вакуумных систем пневмозолоудаления. Л.: ВНИИГ, 1977.

117. Путилов В.Я. Аэродинамика систем напорного пневмотранспорта золы тепловых электростанций. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1992, 20 с.

118. Путилова, И. В. Уточнение зависимости для определения критических скоростей пылегазовых потоков с учетом коэффициентов формы и полидисперсности частиц / И. В. Путилова, В. Я. Путилов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 5(91). – С. 63-67.

119. Путилов, В. Я. а абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок ТЭС от коэффициента надежности транспортирования мелкодисперсных сыпучих материалов / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова** // Энергосбережение и водоподготовка. - 2007. - №5. - С.42-44.

120. Putilov, V. Y. Erosive wear in pipelines at pneumatic conveying of fine silicon-containing materials / V. Y. Putilov, **I.V. Putilova**, V. K. Agarwal // Online journal “Coal Combustion and Gasification Products”, 2009, CCGP-D-09-00010.

121. **Путилова И.В.** Исследование критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах: заключительный отчет. – Москва, 2013. – 60 с.

122. Состав и свойства золы и шлака ТЭС: справочное пособие / В.Г. Пантелеев, Э. А. Ларина, В. А. Мелентьев и др.; Под ред. В. А. Мелентьева. –Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1985. – 288 с., ил.

123. Путилов, В. Я. Зависимость абразивного износа пылепроводов пневмотранспортных установок ТЭС от химико-минералогического состава транспортируемых материалов / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // Энергосбережение и водоподготовка. - 2007. - №2. - С.61-65.

124. Каминска, Д. Применение приборных комплексов Kamika для исследования фракционного состава угольной пыли и золы, и измерения запыленности уходящих газов ТЭС / Д. Каминска, С. Камински // Материалы IV научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 19–20 апреля 2012 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 78 – 84.

125. Putilov, V. Investigation of the particle shape and the particle size distribution of fine bulk solids by the example of the shale cyclone ash / V. Putilov, **I. Putilova**, D. Kaminska // KnE Materials Science. - 2017. No. 2(2), –pp. 141-149.DOI: 10.18502/kms.v2i2.960.

126. Интернет-сайт ПЕ «Специальные материалы» АО «СУЭК-Кузбасс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cenosphere.ru/proizvodstvo/>.

127. **Путилова, И. В.** Исследование влияния формы и полидисперсности частиц на критические скорости пылегазовых потоков / **И. В. Путилова, В. Я. Путилов, А. Р. Хасяншина** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 4(90). – С. 47-52.

128. Мюллер Э., Польшир К. Износ пневмотранспортных трубопроводов. Черные металлы, 1964, №21, С. 32-39.

129. Путилов, В. Я. Зависимость абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов ТЭС от критерия аэродинамической легкости частиц транспортируемого материала / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // Вестник МЭИ. – 2007. - №2. - С.28-31.

130. ГОСТ 22551-2019. Межгосударственный стандарт. Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия.

131. Путилов, В. Я. Зависимость абразивного износа пылепроводов пневмотранспортных установок ТЭС от твердости материала трубы / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова** // Известия Академии Промышленной Экологии. – 2004. - №1. - С.32-37.

132. Bitter I.Y.A. A Study of Erosion Phenomena // Wear, 1963, V/6, pp/ 5-21, 169-190.

133. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // Wear, 1960, №3 pp 87-103.

134. Smeltver D., Gulden K. and Compton L. Mechanisms of metal erosion under the impact of dust // Theoretical foundations of engineering calculations, 1970, pp.225-238.

135. Neilson J.H., Gilkrist A. Erosion by a Stream of Solid Particles // Wear, 1968, V. 11, pp. 111-122.

136. Shimoda K., Yukawa T. Erosion of pipe in pneumatic conveyer // International Conference of Erosion by Solid and Liquid Impact, Cambridge, 1983, pp. 59-1-59-8.

137. Agarwal V., Mills D., Mason J.S. Some Aspects of Bend erosion in pneumatic conveying system pipelines // Bulk Solids Handling, 1985, V. 5, №5, pp. 1085-1090.

138. Путилов, В. Я. Технологии и оборудование обеспыливания воздуха для установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов / В. Я. Путилов, И. В. Путилова, А. Р. Хасяншина // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 2(88). – С. 62-65.

139. Догин М.Е., Кучма М.П. Пневматический транспорт абразивных материалов, М., Металлургия, 1965, 44 с. с ил.

140. Олесевич К.В., Попов Н.Н., Лавренюк В.Н. и др. «Металлургия чугуна», М., Металлургия, 1969 (ДонНИИЧермет, Сб. №8), С. 257 – 269 с ил.

141. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Гос. комитет СССР по стандартам, М., 1985.

142. Putilov, V. Y. Estimation of pipelines overhaul life duration of installations for pneumatic transport of ash and coal dust of TPPs and recommendations on its increase / V. Y. Putilov, **I. V. Putilova** // International Conference “World of Coal Ash 2007”, Covington, USA.

143. Putilov, V. Y. Measures to reduce erosion in pipelines of pneumatic conveying systems / V. Y. Putilov, **I. V. Putilova**, V.K. Agarwal // International Conference & Exhibition Bulk Solids India 2011, Mumbai.

144. **Путилова, И. В.** Рекомендации по снижению абразивного износа гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС / **И. В. Путилова** // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – №31-33. – С. 81-92.

145. Путилов, В. Я. Рекомендации по снижению износа пылепроводов при пневмотранспорте абразивных мелкодисперсных сыпучих материалов / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова**, В. Б. Прохоров // Вестник МЭИ. -2003. - № 3. - С.29-33.

146. Рекомендации по расчету гидроабразивного износа пульпопроводов и насосов систем гидрозолоудаления ТЭС: П 09-83/ВНИИГ / ВНИИ гидротехники

им. Б. Е. Веденеева, АН ГССР, Ин-т горн. механики им. Г. А. Цулукидзе. - Л.: ВНИИГ, 1984. - 82 с.: ил.

147. Угинчус, А. А. Гидравлика и гидравлические машины: учебник для машиностроит. специальностей вузов / А. А. Угинчус. – М.: Азбук., 2009. – 396 с.

148. Копченков, В. Г. Повышение долговечности пульпопроводов и трубопроводной арматуры методом гуммирования / В.Г. Копченков, Н. С. Пенкин, В. М. Сербин // Обогащение руд. 2009. № 4. С. 33-38.

149. Макароничев, А. Г. Защита пульпопроводов от гидроабразивного износа / А. Г. Макароничев, С. В. Беляева // Статья в сборнике трудов конференции Неделя науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 19-24 ноября 2018 г., с. 279-281.

150. Путилов, В. Я. Оценка межремонтного срока эксплуатации трубопроводов установок пневмотранспорта золы и угольной пыли ТЭС и рекомендации по его повышению / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова** // Материалы Международной конференции «Мир угольной золы», 7 – 10 мая 2007 г., Ковингтон, Кентукки, США.

151. Белошицкий, А. М. Износостойкие трубопроводы с алюмотермическим покрытием на основе корунда / А. М. Белошицкий, Е. Н. Ильин, А. С. Прокопьев и др. // Материалы V конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 24–25 апреля 2014 г. — М.: Полиграфический центр МЭИ, 2014. с. 103 – 106.

152. ТУ 197257-002-12606601-2016. Изделия стальные с износостойким керамическим покрытием. ООО «Энергохимкомплект», 2016 г.

153. Путилов, В. Я. Оптимизация параметров колен поворотов трубопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления и пылеприготовления ТЭС / В. Я. Путилов, **И. В. Путилова** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. - №1. - С.60-67.

154. **Путилова, И. В.** Абразивный износ трубопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления и

пылеприготовления ТЭС: автореферат диссертации на соискание степени к.т.н.: 05.14.14 / Путилова И.В. – Москва, 2004. – 20 с.

155. Markus R., Wear in freight pipelines - a limiting factor // South African Mechanical Engineer, 1984, V. 34, №3, pp. 80-86.

156. Утида Н. Основанные на накопленном опыте рекомендации по проектированию трубопроводов пневмотранспорта. // Хайкан гидзюцу, 1982, т. 24, №8, с. 51-59.

157. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел, М., Наука, 1970.

158. СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91.

159. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2.05.07-85), Москва, Стройиздат, 1988.

160. ТУ 197257-002-12606601-2016. Изделия стальные с износостойким керамическим покрытием. ООО «Энергохимкомплект», 2016 г.

161. ТУ 1462-001-88189979-2012 «Детали трубопроводов стальные сварные соединительные приварные из углеродистых и низколегированных сталей».

162. Чугунков, Д. В., Сейфельмлюкова, Г. А., Герасименко, А. Е., **Путилова, И. В.** Сварное колено поворота. Патент на полезную модель RU 198596 U1, 17.07.2020. Заявка № 2020110911 от 16.03.2020.

163. Чугунков, Д. В., Сейфельмлюкова, Г. А., Герасименко, А. Е., **Путилова, И. В.** Сборное колено поворота пульпопровода: патент RU 200900 U1, 17.11.2020. Заявка № 2020110913 от 16.03.2020.

164. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент.

165. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.

166. Электронный ресурс. – Режим доступа: http://www.diakont.ru/energy_services/robotic_inline_inspection.html.

167. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://topdialog.ru/2019/04/30/v-spbgu-predstavili-robota-dlja-diagnostiki-truboprovodov/>.

168. Постановление Правительства РФ от 31 мая 2023 г. № 881 “Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и отдельного положения акта Правительства Российской Федерации”.

169. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://rg.ru/2022/10/21/ispolzovanie-zoly-udeshevit-stroitelstvo-dorog.html>.

170. Чурсова, М. С. Обзор современных технологий переработки золы угольных станций / Чурсова М. С., Вальцева А. И. // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: ИП Русских А.В., 2022. – С. 39-41. – EDN GODTKX.

171. Соловьянов А. А. Анализ эколого-правовых и организационно-экономических аспектов переработки золошлаковых отходов в строительную и иную продукцию / Соловьянов А. А., Петров В.О. // Материалы к заседанию Секции НТС «Энергоэффективность и экология в электроэнергетике» 29 марта 2024 года. – Москва, 2024, 47 с.

172. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/zola-tets-perspektivnoe-syrie-dlya-promyshlennosti.pdf>.

173. Putilov, V. Editorial / V. Putilov, I. Putilova // Environmental Geotechnics. - 2018. – No 5(3). –pp. 131–133.

174. Отчет о НИР. Анализ существующего и оценка потенциального рынка сбыта ЗШМ в Московском регионе. Разработка рекомендаций по повышению уровня и увеличению объемов реализации золошлаков предприятиям стройиндустрии / Путилов В.Я., Путилова И.В. Москва, 2013, 56 с.

175. EN 197-1:2011 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.

176. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.

177. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии.

178. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия.

179. ГОСТ 379-2015. Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные. Общие технические условия.

180. ГОСТ 28013-98. Растворы строительные. Общие технические условия.

181. ГОСТ Р 56592-2015. Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия.

182. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://kislород.life/krskteplo2020/kalachev/>.

183. Tsuboi Izumi. Recovery of rare metals from coal fly ash. / Izumi Tsuboi / Int. Solv. Extr. Conf. Kyoto. 1990. P. 215.

184. Абишева З.С. Кислотно-экстракционная технология извлечения галлия из золы-уноса от сжигания энергетических углей / З.С. Абишева, И.А. Блайда, Е.И. Пономарева // Цветные металлы. 1994. № 3. С. 36–38.

185. Степанов С.И. Пат. № 2094374 РФ. МПК7 C01 F 17/00, В 09 В3/00. Способ извлечения скандия из кремнийсодержащих материалов / С.И. Степанов, А.А. Ильенок. Заявка № 96111651/25; заявл. 11.06.96; опубл. 27.10.97.

186. Clements J.L. Recovery of metals from coal fly ash /J.L.Clements. Recycle and Secondary Recovery. Metals. Proc. Int. Symp. And Fall Ext. and Process Met. Meet. Warrendale, 1985. P. 747–769.

187. Патент 184347 ВНР Способ извлечения редких металлов выщелачиванием из остатков сгорания каменного угля, особенно бурого, содержащего редкие металлы / Panto G. et al. № 2723/80; заявл. 14.11.80, опубл. 20.10.86.

188. Концевой А.А. Извлечение скандия и иттрия из золошлаковых отходов / А.А. Концевой, А.Д. Михнев, Г.Л. Пашков, Л.П. Колмакова. Журнал прикладной химии. 1995. Т. 68. № 7.

189. Распоряжение Правительства Приморского края от 30.11.2023 № 931-рп "Об утверждении региональной программы повышения объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности Приморского края".

Приложение А

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы от ТЭЦ-22
ПАО «Мосэнерго»



Публичное акционерное общество энергетики
и электрификации «Мосэнерго»
(ПАО «Мосэнерго»)

филиал
ТЭЦ-22 им. Н.И. Серебряникова

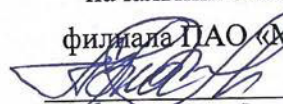
Энергетиков ул., д. 5, г. Дзержинский, Московская обл.,
Российская Федерация, 140091
тел.: (495) 551-34-11
e-mail: udotec-22@mosenergo.ru, www.mosenergo.ru
ОКПО 00102999, ОГРН 1027700302420, ИНН/КПП 7705035012/505603001

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного инженера,
начальник УОЭ ТЭЦ-22

филиала ПАО «Мосэнерго»

 Пахомов А.В.
«20» 03 2024 г.

АКТ

о внедрении научных результатов

докторской диссертационной работы заведующего НОЦ «Экология энергетики»
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» Ирины Вячеславовны Путиловой

Рассмотрев результаты диссертационной работы Путиловой И.В. «Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России» на соискание ученой степени доктора технических наук, подтверждаем, что основные положения работы были использованы при анализе существующего и оценке потенциального рынка сбыта золошлаковых материалов ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго» в Московском регионе, при разработке плана увеличения объемов реализации золошлаков предприятиям стройиндустрии, при анализе соответствия существующей системы обращения с золошлаками задаче увеличения доли сжигания углей в топливном балансе ТЭЦ-22.

ЗН УОЭ, начальник ССЭ





Холодков А.В.

Приложение Б

Патент на полезную модель 198596 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11)

198 596 (13) U1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ИЗВЕЩЕНИЯ К ПАТЕНТУ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

ТС9К Изменение сведений об авторе(ах)

(72) Автор(ы):

Чугунков Дмитрий Владимирович (RU),
Сейфельмлюкова Галина Анатольевна (RU),
Герасименко Анна Евгеньевна (RU),
Путилова Ирина Вячеславовна (RU)

Дата внесения записи в Государственный реестр: 25.05.2023

Дата публикации и номер бюллетеня: 25.05.2023 Бюл. №15

RU 198 596 U 1

RU 198 596 U 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

198 596⁽¹³⁾ U1(51) МПК
F16L 43/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F16L 43/001 (2020.02); F16L 43/002 (2020.02)(21)(22) Заявка: 2020110911, 16.03.2020
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.03.2020Дата регистрации:
17.07.2020Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 16.03.2020

(45) Опубликовано: 17.07.2020 Бюл. № 20

Адрес для переписки:
127006, Москва, ул. Малая Дмитровка, 7, ПАО
"РусГидро", Домнина Мария Алексеевна(72) Автор(ы):
Чугунков Дмитрий Владимирович (RU),
Сейфельмлюкова Галина Анатольевна (RU),
Богданова Анна Евгеньевна (RU)(73) Патентообладатель(и):
Акционерное общество "Дальневосточная
генерирующая компания" АО "ДГК" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: РД 153-34.1-27.512-2001
"Методические указания по расчету и
рекомендации по снижению абразивного
износа пневмотранспортных трубопроводов
систем пылеприготовления и
золошлакоудаления ТЭС" М.: ГОУВПО
"МЭИ (ТУ)", 2001. RU 80915 U1, 27.02.2009. SU
1289641 A1, 15.02.1987. US 3979809 A1,
14.09.1976. US 3977706 A1, 31.08.1976. US
20080134744 A1, (см. прод.)

(54) Сварное колено поворота

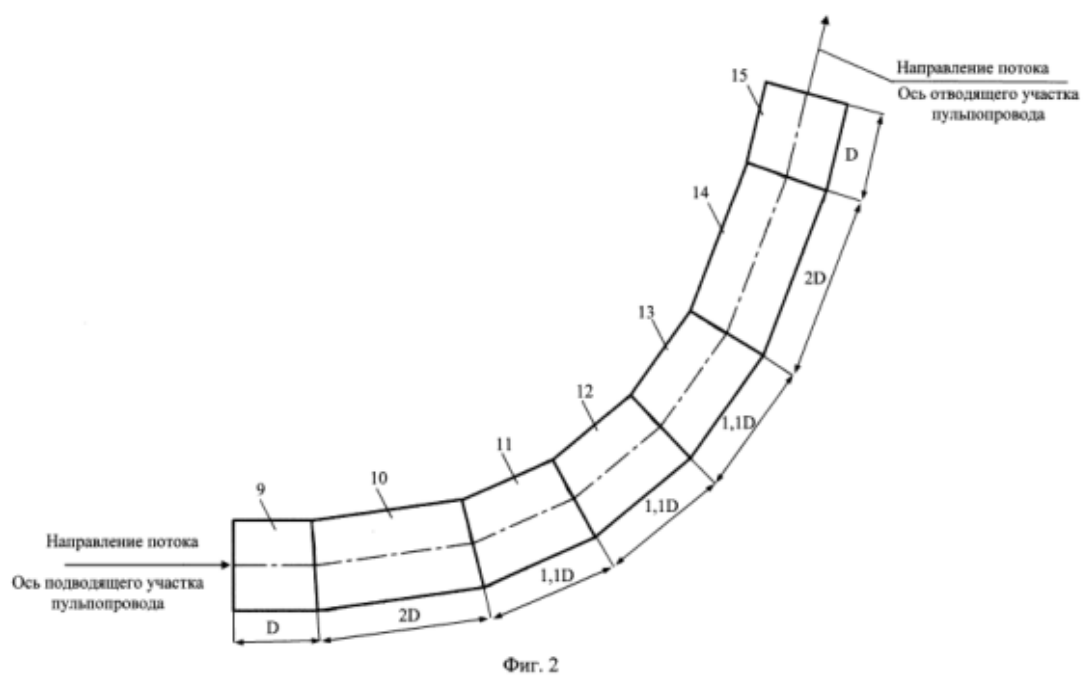
(57) Реферат:

Полезная модель относится к коленам поворота пульпопроводов и может быть использована в транспортных трубопроводах систем пылеприготовления и золошлакоудаления тепловых электростанций.

Технический результат полезной модели - снижение материалоемкости сварного колена поворота, повышение технологичности конструкции в части упрощения сопряжения сварного колена поворота с подводящим и отводящим участками пульпопровода при сохранении показателей абразивной износостойкости.

Заявленный технический результат достигается тем, что сварное колено поворота, включающее соединенные сваркой элементы трубы с алюмотермическим покрытием внутренней поверхности, содержит семь элементов трубы, при этом ось первого элемента

совпадает с осью подводящего участка пульпопровода, ось седьмого элемента совпадает с осью отводящего участка пульпопровода, угол поворота оси второго элемента относительно оси первого элемента составляет 7,5°, угол поворота оси шестого элемента относительно оси седьмого элемента составляет 7,5°, угол поворота осей третьего, четвертого и пятого элементов относительно осей предыдущих элементов составляет 15°, длина по внешней стороне сварного колена поворота первого и седьмого элементов равна внешнему диаметру трубы, длина по внешней стороне сварного колена поворота второго и шестого элементов равна двум внешним диаметрам трубы, а длина по внешней стороне сварного колена поворота третьего, четвертого и пятого элемента равна 1,1 от внешнего диаметра трубы. 2 фиг.



(56) (продолжение):
12.06.2008. RU 2014131112 A, 20.02.2016.

RU 198596 U1

RU 198596 U1

Область техники

Полезная модель относится к коленам поворота пульпопроводов и может быть использована в транспортных трубопроводах систем пылеприготовления и золошлакоудаления тепловых электростанций.

5 Уровень техники

В качестве прототипа заявляемого решения выбрана конструкция колена трубопровода, известная из руководящего документа РД 153-34.1-27.512-2001 «Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС».

10 Прототип содержит соединенные сваркой трапециевидные сегменты трубы, на внутреннюю поверхность которых нанесено алюмотермическое покрытие, размещенные между торцами подводящего и отводящего участков пульпопровода.

В состав прототипа входят шесть таких трапециевидных сегментов, размещенных 15 между торцами подводящего и отводящего участков пульпопровода. Оси первого и последнего (шестого) по потоку пульпы трапециевидных сегментов образуют угол $7,5^\circ$ с осями подводящего и отводящего участков пульпопровода соответственно. Угол поворота последнего и каждого из остальных сегментов относительно предыдущего составляет 15° . Длина по внешней образующей (внешняя длина) первого сегмента 20 составляет $3,83D$, а каждого из остальных трапециевидных сегментов равна $1,932D$, где D - минимальный диаметр изгиба трубы.

Недостаток прототипа - избыточная материалоемкость и низкая технологичность, обусловленная сложностью сопряжения с подводящим и отводящим пульпопроводами.

Сущность полезной модели

25 Технический результат полезной модели - снижение материалоемкости сварного колена поворота, повышение технологичности конструкции в части упрощения сопряжения сварного колена поворота с подводящим и отводящим участками пульпопровода при сохранении показателей абразивной износостойкости.

Заявленный технический результат достигается тем, что сварное колено поворота, 30 включающее соединенные сваркой элементы трубы с алюмотермическим покрытием внутренней поверхности, содержит семь элементов трубы, при этом ось первого элемента совпадает с осью подводящего участка пульпопровода, ось седьмого элемента совпадает с осью отводящего участка пульпопровода, угол поворота оси второго элемента относительно оси первого элемента составляет $7,5^\circ$, угол поворота оси шестого элемента 35 относительно оси седьмого элемента составляет $7,5^\circ$, угол поворота осей третьего, четвертого и пятого элементов относительно осей предыдущих элементов составляет 15° , длина по внешней стороне сварного колена поворота первого и седьмого элементов равна внешнему диаметру трубы, длина по внешней стороне сварного колена поворота второго и шестого элементов равна двум внешним диаметрам трубы, а длина по внешней 40 стороне сварного колена поворота третьего, четвертого и пятого элементов равна $1,1$ от внешнего диаметра трубы.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 изображен прототип заявленной полезной модели.

На фиг. 1 приняты следующие обозначения:

- 45 1 - первый элемент сварного колена поворота;
2, 3, 4, 5, 6, 7 - отдельные элементы сварного колена поворота;
8 - последний элемент сварного колена поворота;
 D_H - наружный диаметр пульпопровода;

$\alpha_1=7,5^\circ$ - угол между осями первого и второго элементов сборного колена поворота пульпопровода;

$\alpha_2=15^\circ$ - угол между осями элементов сборного колена поворота пульпопровода со второго по седьмой;

$\alpha_3=7,5^\circ$ - угол между осями седьмого и восьмого элементов сборного колена поворота пульпопровода;

$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$ - радиусы изгиба сборного колена поворота пульпопровода.

$R_1=6,875D_H$;

$R_2=7,450D_H$;

$R_3=7,730D_H$;

$R_4=8,209D_H$;

$R_5=8,419D_H$;

$R_6=8,541D_H$;

$R_7=8,575D_H$

На фиг. 2 изображена конструкция заявленного сборного колена поворота пульпопровода.

На фиг. 2 приняты следующие обозначения:

9 - первый элемент сварного колена поворота;

10, 11, 12, 13, 14 - отдельные элементы сварного колена поворота;

15 - седьмой элемент сварного колена поворота;

D - внешний диаметр трубы.

Осуществление полезной модели

На фиг. 2 представлен чертеж, иллюстрирующий конструкцию заявляемого сварного колена поворота.

Сварное колено поворота состоит из семи соединенных сваркой элементов 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 (фиг. 2). Каждый элементов 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 (фиг. 2) представляет собой отрезок трубы с внешним диаметром, равным D , у которого хотя бы один торец скошен. На внутреннюю поверхность каждого из элементов 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 (фиг. 2) нанесено алюмотермическое покрытие.

Ось первого элемента 9 (фиг. 2) совпадает с осью подводящего участка пульпопровода (фиг. 2), ось седьмого элемента 15 (фиг. 2) совпадает с осью отводящего участка пульпопровода (фиг. 2). Угол поворота оси второго элемента 10 (фиг. 2) относительно оси первого элемента 9 (фиг. 1) составляет $7,5^\circ$, угол поворота оси шестого элемента 14 (фиг. 2) относительно оси седьмого элемента 15 (фиг. 2) составляет $7,5^\circ$, угол поворота осей третьего 11 (фиг. 2), четвертого 12 (фиг. 2) и пятого 13 (фиг. 2) элементов относительно осей предыдущих элементов составляет 15° . Длина по внешней стороне сварного колена поворота первого 9 (фиг. 2) и седьмого 15 (фиг. 2) элементов равна внешнему диаметру трубы D , длина по внешней стороне сварного колена поворота второго 10 (фиг. 2) и шестого 14 (фиг. 2) элементов равна двум внешним диаметрам трубы D , а длина по внешней стороне сварного колена поворота третьего 11 (фиг. 2), четвертого 12 (фиг. 2) и пятого 13 (фиг. 2) элементов равна $1,1$ от внешнего диаметра трубы D .

Суммарная по внешней стороне сварного колена поворота элементов 9-15 (фиг. 2) определяет минимальную длину отрезка трубы диаметром D , из которой могут быть изготовлены элементы 9-15 (фиг. 2) сварного колена поворота.

При изготовлении сварного колена поворота в соответствии с прототипом (фиг. 1)

минимальная длина отрезка трубы диаметром D , из которой могут быть изготовлены элементы 1-8 (фиг. 1) составляет $11,559 D$. Минимальная длина отрезка трубы диаметром D , из которой могут быть изготовлены элементы 9-15 (фиг. 2) равна $9,3D$.

Заявленная полезная модель обеспечивает снижение материалоемкости сварного колена поворота и повышение технологичности конструкции в части упрощения сопряжения сварного колена поворота с подводящим и отводящим участками пульпопровода.

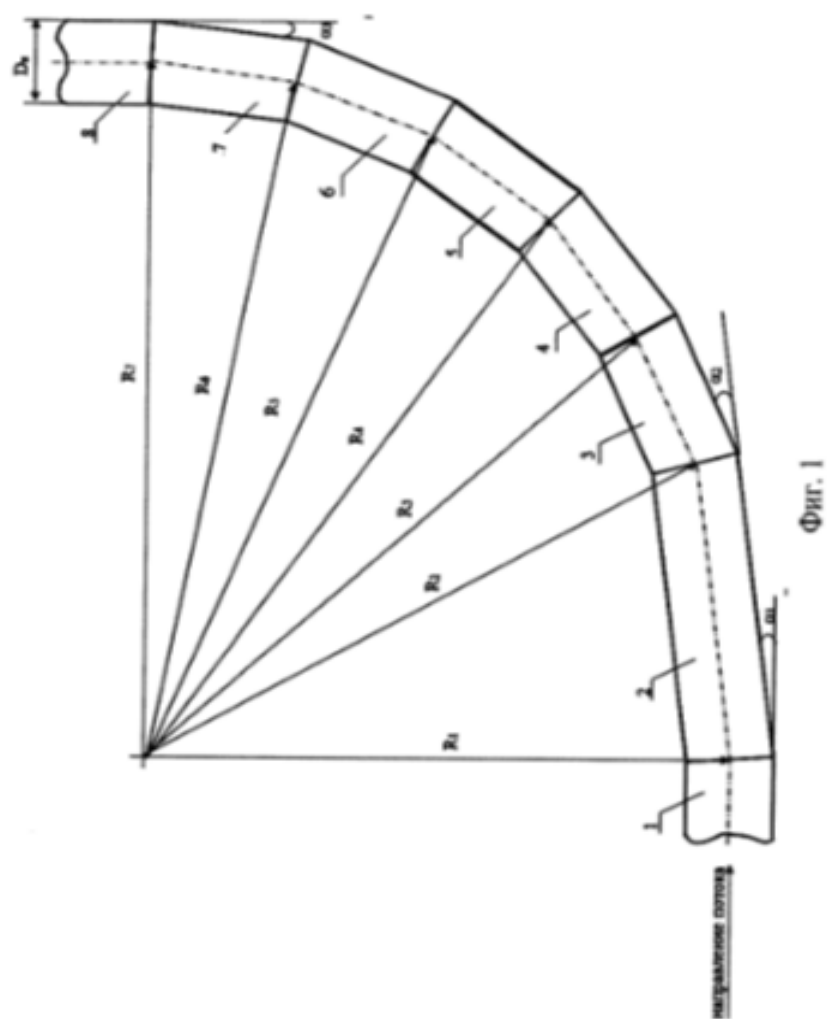
Сравнительные ускоренные испытания заявленного сварного колена поворота (фиг. 2) и прототипа (фиг. 1) на износостойкость (таблица 1), показали, что заявленное сварное колено поворота (фиг. 2) и прототип (фиг. 1) обладают практически одинаковой износостойкостью к абразивному износу.

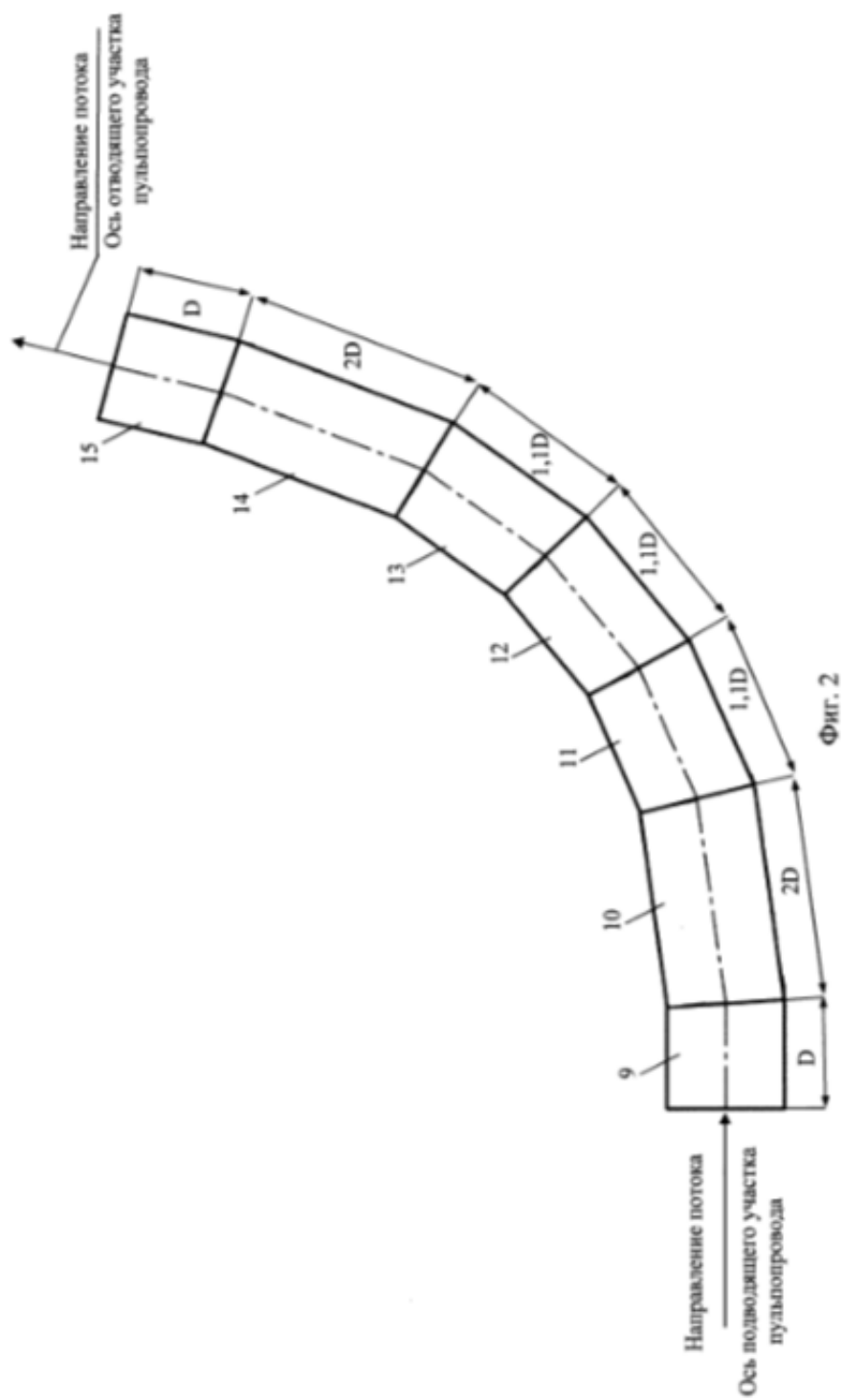
Таблица 1 - Сравнительные ускоренные испытания заявленного сварного колена поворота (фиг. 2) и прототипа (фиг. 1) на износостойкость

№ п/п	Абразивный материал	Материал колена пульпопровода		Внешний диаметр, D , м	Износостойкость, $г/м^2$
		Труба	Внутреннее покрытие		
1	Электрокорунд 14А	Сталь 20, толщина стенки 10 мм	Алюмотермическое, толщина покрытия 8 мм	0,53	0,022
2					0,021

(57) Формула полезной модели

Сварное колено поворота, включающее соединенные сваркой элементы трубы с алюмотермическим покрытием внутренней поверхности, отличающееся тем, что содержит семь элементов трубы, при этом ось первого элемента совпадает с осью подводящего участка пульпопровода, ось седьмого элемента совпадает с осью отводящего участка пульпопровода, угол поворота оси второго элемента относительно оси первого элемента составляет $7,5^\circ$, угол поворота оси шестого элемента относительно оси седьмого элемента составляет $7,5^\circ$, угол поворота осей третьего, четвертого и пятого элементов относительно осей предыдущих элементов составляет 15° , длина по внешней стороне сварного колена поворота первого и седьмого элементов равна внешнему диаметру трубы, длина по внешней стороне сварного колена поворота второго и шестого элементов равна двум внешним диаметрам трубы, а длина по внешней стороне сварного колена поворота третьего, четвертого и пятого элемента равна $1,1$ от внешнего диаметра трубы.





Приложение В

Патент на полезную модель 200900 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

200 900⁽¹³⁾ U1ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ИЗВЕЩЕНИЯ К ПАТЕНТУ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

ТС9К Изменение сведений об авторе(ах)

(72) Автор(ы):

Чугунков Дмитрий Владимирович (RU),
Сейфельмлюкова Галина Анатольевна (RU),
Герасименко Анна Евгеньевна (RU),
Путилова Ирина Вячеславовна (RU)

Дата внесения записи в Государственный реестр: 25.05.2023

Дата публикации и номер бюллетеня: 25.05.2023 Бюл. №15

RU 200900 U1

RU 200900 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11)

200 900 (13) U1

(51) МПК
F16L 43/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F16L 43/001 (2020.08); F16L 43/002 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020110913, 16.03.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.03.2020

Дата регистрации:
17.11.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.03.2020

(45) Опубликовано: 17.11.2020 Бюл. № 32

Адрес для переписки:

127006, Москва, ул. Малая Дмитровка, 7, ПАО
"РусГидро", Домнина Мария Алексеевна

(72) Автор(ы):

Чугунков Дмитрий Владимирович (RU),
Сейфельмлюкова Галина Анатольевна (RU),
Богданова Анна Евгеньевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Дальневосточная
генерирующая компания" АО "ДГК" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: РД 153-34.1-27.512-2001

"Методические указания по расчету и
рекомендации по снижению абразивного
износа пневмотранспортных трубопроводов
систем пылеприготовления и
золошлакоудаления ТЭС" М.: ГОУВПО
"МЭИ (ТУ)", 2001. RU 80915 U1, 27.02.2009. SU
1289641 A1, 15.02.1987. US 3979809 A1,
14.09.1976. US 3977706 A1, 31.08.1976. US
20080134744 A1, (см. прод.)

(54) Сборное колено поворота пульпопровода

(57) Реферат:

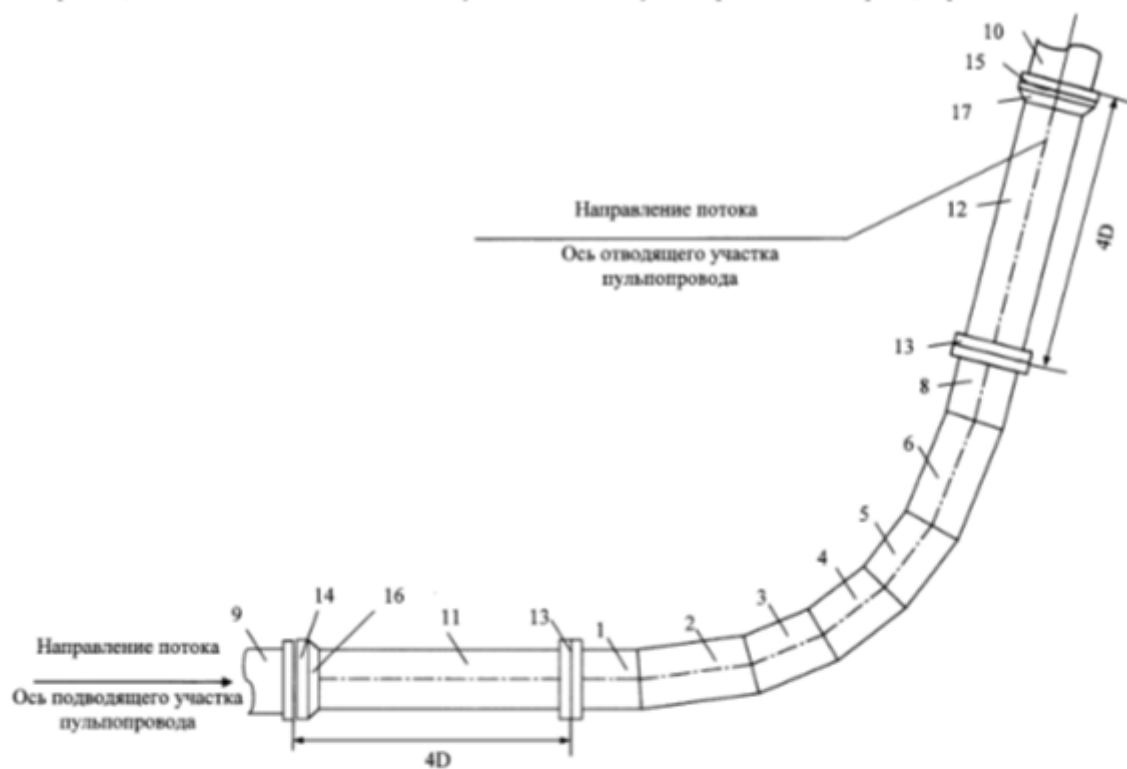
Полезная модель относится к коленам поворота пульпопроводов и может быть использована в транспортных трубопроводах систем пылеприготовления и золошлакоудаления тепловых электростанций.

Технический результат полезной модели направлен на повышение абразивной износостойкости, увеличение межремонтного периода эксплуатации, а также повышение технологичности сопряжения колена с подводящим и отводящим участками пульпопровода.

Сборное колено поворота пульпопровода содержит участок из соединенных сваркой элементов, которые выполнены в виде отрезка трубы, с внешним диаметром, равным наружному диаметру пульпопровода, при этом по меньшей мере один торец каждого элемента скошен, а у первого и последнего элементов скошен только

один торец, а торец, обращенный в сторону подводящего или отводящего участков пульпопровода, прямой и снабжен прямыми фланцами, объединенными болтовым соединением, через которые первый элемент соединен с входным элементом стабилизации потока так, что оси первого элемента, входного элемента стабилизации потока и подводящего участка пульпопровода совпадают, последний элемент соединен с выходным элементом стабилизации потока так, что оси последнего элемента, выходного элемента стабилизации потока и отводящего участка пульпопровода совпадают, причем входной элемент стабилизации потока оснащен конфузным раструбом, а выходной элемент стабилизации потока оснащен диффузным раструбом, конфузный раструб через фланец соединен с подводящим участком пульпопровода, а диффузный раструб через

фланец соединен с отводящим участком пультпровода. 2 з.п. ф-лы, 2 фиг.



Фиг. 2

(56) (продолжение):
12.06.2008. RU 2014131112 A, 20.02.2016.

RU 200900 U 1

RU 200900 U 1

Область техники

Полезная модель относится к коленам поворота пульпопроводов и может быть использована в транспортных трубопроводах систем пылеприготовления и золошлакоудаления тепловых электростанций.

5 Уровень техники

В качестве прототипа заявляемого решения выбрана конструкция колена поворота трубопровода, известная из руководящего документа РД 153-34.1-27.512-2001 «Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС».

Прототип содержит соединенные сваркой трапециевидные сегменты трубы, на внутреннюю поверхность которых нанесено алюмотермическое покрытие, размещенные между торцами подводящего и отводящего участков пульпопровода.

В состав прототипа входят шесть трапециевидных сегментов трубы, размещенных между торцами подводящего и отводящего участков пульпопровода. Оси первого и последнего (шестого) по потоку пульпы трапециевидных сегментов трубы образуют угол $7,5^\circ$ с осями подводящего и отводящего участков пульпопровода соответственно. Угол поворота остальных кроме первого и последнего сегментов относительно предыдущего составляет 15° . Длина по внешней образующей (внешняя длина) первого сегмента составляет $3,83D$, а каждого из остальных трапециевидных сегментов равна $1,932D$, где D - минимальный диаметр изгиба трубы.

Недостаток прототипа - низкая абразивная износостойкость, а также низкая технологичность сопряжения с подводящим и отводящим пульпопроводами. Для сопряжения с подводящим и отводящим пульпопроводами необходимо на торце каждого из указанных пульпопроводов выполнить скос на $3,75^\circ$.

Раскрытие сущности полезной модели

Технический результат полезной модели направлен на увеличение межремонтного периода эксплуатации за счет повышения абразивной износостойкости.

Заявленный технический результат достигается тем, что сборное колено поворота пульпопровода, содержащее участок из соединенных сваркой элементов, которые выполнены в виде отрезка трубы, с внешним диаметром, равным наружному диаметру пульпопровода, при этом по меньшей мере один торец каждого элемента скошен, а у первого и последнего элементов скошен только один торец, а торец, обращенный в сторону подводящего или отводящего участков пульпопровода, прямой и снабжен прямыми фланцами, объединенными болтовым соединением, через которые первый элемент соединен с входным элементом стабилизации потока так, что оси первого элемента, входного элемента стабилизации потока и подводящего участка пульпопровода совпадают, последний элемент соединен с выходным элементом стабилизации потока так, что оси последнего элемента, выходного элемента стабилизации потока и отводящего участка пульпопровода совпадают, причем входной элемент стабилизации потока оснащен конфузным раструбом, а выходной элемент стабилизации потока оснащен диффузным раструбом, конфузный раструб через фланец соединен с подводящим участком пульпопровода, а диффузный раструб через фланец соединен с отводящим участком пульпопровода.

В развитие полезной модели длина входного элемента стабилизации потока составляет четыре внешних диаметра трубы и выходного элемента стабилизации потока.

В развитие полезной модели участок из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода содержит семь соединенных сваркой элементов, при

этом угол поворота второго и шестого элемента относительно предыдущего элемента составляет $7,5^\circ$, углы поворота осей остальных элементов относительно предыдущего элемента составляют 15° , причем длина по внешней стороне сборного колена поворота пульпопровода первого и последнего элементов равна наружному диаметру

5 пульпопровода, длина по внешней стороне сборного колена поворота пульпопровода второго и шестого элементов равна двум наружным диаметрам пульпопровода, а длины по внешней стороне сборного колена поворота пульпопровода остальных элементов одинаковы и равны $1,1$ от наружного диаметра пульпопровода.

В развитие полезной модели элементы сборного колена поворота пульпопровода, входной элемент стабилизации потока и выходной элемент стабилизации выполнены с аллотермическим покрытием внутренней поверхности.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 изображен прототип заявленной полезной модели.

На фиг. 1 приняты следующие обозначения:

15 1 - первый элемент участка из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода;

2, 3, 4, 5, 6, 7 - отдельные элементы участка из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода;

8 - последний элемент участка из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода;

D_n - наружный диаметр пульпопровода;

$\alpha_1 = 7,5^\circ$ - угол между осями первого и второго элементов сборного колена поворота пульпопровода;

25 $\alpha_2 = 15^\circ$ - угол между осями элементов сборного колена поворота пульпопровода со второго по седьмой;

$\alpha_3 = 7,5^\circ$ - угол между осями седьмого и восьмого элементов сборного колена поворота пульпопровода;

$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$ - радиусы изгиба сборного колена поворота пульпопровода.

30 $R_1 = 6,875D_n$;

$R_2 = 7,450D_n$;

$R_3 = 7,730D_n$;

$R_4 = 8,209D_n$;

35 $R_5 = 8,419D_n$;

$R_6 = 8,541D_n$;

$R_7 = 8,575D_n$

На фиг. 2 изображена конструкция заявленного сборного колена поворота пульпопровода.

40 На фиг. 2 приняты следующие обозначения:

1 - первый элемент участка из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода;

2, 3, 4, 5, 6 - отдельные элементы участка из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода;

45 8 - последний элемент участка из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода;

9 - подводящий участок пульпопровода;

10 - отводящий участок пульпопровода;

11 - входной элемент стабилизации потока;
12 - выходной элемент стабилизации потока;
13 - прямые фланцы, объединенные болтовым соединением; 14, 15 - фланцы;
16 - конфузорный раструб;
17 - диффузорный раструб; D - внешний диаметр трубы.

Осуществление полезной модели

Сборное колено поворота пульпопровода (фиг. 2) содержит участок из соединенных сваркой элементов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 (фиг. 2), а также входной элемент стабилизации потока 11 (фиг. 2) и выходной элемент стабилизации потока 12 (фиг. 2), предназначенные для соединения с подводящим 9 (фиг. 2) и отводящим 10 (фиг. 2) участками пульпопровода соответственно.

Направление осей первого и последнего элементов сборного колена поворота пульпопровода 1 и 8 (фиг. 2), и соединенных с ними входным элементом стабилизации потока 11 (фиг. 2) и выходным элементом стабилизации потока 12 (фиг. 2) совпадают с направлением осей подводящего 9 (фиг. 2) и отводящего 10 (фиг. 2) участков пульпопровода.

Входной элемент стабилизации потока 11 (фиг. 2) выполнен в виде отрезка трубы и соединен прямыми фланцами 13 (фиг. 2) с первым элементом сборного колена поворота пульпопровода 1 (фиг. 2). Выходной элемент стабилизации потока 12 (фиг. 2) выполнен в виде отрезка трубы и соединен прямыми фланцами 13 (фиг. 2) с последним элементом сборного колена поворота пульпопровода 8 (фиг. 2).

Фланец 14 (фиг. 2) одной стороной соединен с конфузорным элементом 16 (фиг. 2), который присоединен к входу входного элемента стабилизации потока 11 (фиг. 2). Другой стороной фланец 14 (фиг. 2) соединен с подводящим участком пульпопровода 9 (фиг. 2).

Фланец 15 (фиг. 2) одной стороной соединен с диффузорным раструбом 17 (фиг. 2), который присоединен к выходу выходного элемента стабилизации потока 12 (фиг. 2). Другой стороной фланец 15 (фиг. 2) соединен с отводящим участком пульпопровода 10 (фиг. 2).

В развитие полезной модели участок из соединенных сваркой элементов сборного колена поворота пульпопровода (фиг. 2) может быть выполнен следующим образом: каждый элемент 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 (фиг. 2) выполнен в виде отрезка трубы, с внешним диаметром, равным D, у которого хотя бы один торец скошен. У элементов 1 и 8 (фиг. 2) скошен один торец, а торец, обращенный в сторону подводящего 9 (фиг. 2) или отводящего 10 (фиг. 2) участков пульпопровода - прямой и снабжен прямыми фланцами 13 (фиг. 2), объединенными болтовым соединением. У остальных элементов 2, 3, 4, 5, 6 (фиг. 2) скошены оба торца. Углы поворота осей элементов 2 и 6 (фиг. 2) относительно оси предыдущего элемента составляют $7,5^\circ$. Углы поворота осей каждого из элементов 3, 4, 5 (фиг. 2) относительно предыдущего элемента составляют 15° . Длина по внешней стороне сборного колена поворота пульпопровода элементов 1 и 8 (фиг. 2) равна наружному диаметру пульпопровода D_n . Длина по внешней стороне сборного колена поворота пульпопровода элементов 2 и 6 (фиг. 2) равна $2D_n$. Длины остальных трех элементов 3, 4, 5 (фиг. 2) одинаковы и равны $1,1D_n$.

В развитие полезной модели на внутреннюю поверхность каждого элемента 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 (фиг. 2), входного элемента стабилизации потока 11 (фиг. 2) и выходного элемента стабилизации потока 12 (фиг. 2) нанесено алюмотермическое покрытие.

Использование заявленной полезной модели обеспечивает оптимизацию

гидроаэродинамических характеристик потока в сборном колене поворота пульпопровода (фиг. 2), что обеспечивает падение статической составляющей давления потока, направленной на стенки сборного колена поворота пульпопровода, что обеспечивает заявленный технический результат: увеличение межремонтного периода эксплуатации за счет повышения абразивной износостойкости.

Сравнительные ускоренные испытания сборного колена поворота пульпопровода (фиг. 2) и прототипа заявленной полезной модели (фиг. 1) на износостойкость (таблица 1) показали, что заявленное сборное колено поворота пульпопровода (фиг. 2) обеспечивает трехкратное увеличение межремонтного периода эксплуатации заявляемого сборного колена поворота пульпопровода за счет снижения абразивного воздействия потока транспортируемой пульпы.

Таблица 1 - Сравнительные ускоренные испытания сборного колена поворота пульпопровода (фиг. 2) и прототипа заявленной полезной модели (фиг. 1) на износостойкость

№ п/п	Вариант	Абразивный материал	Материал колена пульпопровода		Внешний диаметр, D, м	Коэффициент относительной износостойкости
			Труба	Внутреннее покрытие		
1	Прототип	Электрокорунд 14А	Сталь 20, толщина стенки 10 мм	Алюмотермическое, толщина покрытия 8 мм	0,53	270-300
2.	Сварной участок колена					280-300
3.	Сборное колено					340-364

(57) Формула полезной модели

1. Сборное колено поворота пульпопровода, содержащее участок из соединенных сваркой элементов с алюмотермическим покрытием внутренней поверхности, отличающееся тем, что участок из соединенных сваркой элементов, которые выполнены в виде отрезка трубы, с внешним диаметром, равным наружному диаметру пульпопровода, при этом по меньшей мере один торец каждого элемента скошен, а у первого и последнего элементов скошен только один торец, а торец, обращенный в сторону подводящего или отводящего участков пульпопровода, прямой и снабжен прямыми фланцами, объединенными болтовым соединением, через которые первый элемент соединен с входным элементом стабилизации потока так, что оси первого элемента, входного элемента стабилизации потока и подводящего участка пульпопровода совпадают, последний элемент соединен с выходным элементом стабилизации потока так, что оси последнего элемента, выходного элемента стабилизации потока и отводящего участка пульпопровода совпадают, причем входной элемент стабилизации потока оснащен конфузным раструбом, а выходной элемент стабилизации потока оснащен диффузным раструбом, конфузный раструб через фланец соединен с подводящим участком пульпопровода, а диффузный раструб через фланец соединен с отводящим участком пульпопровода.

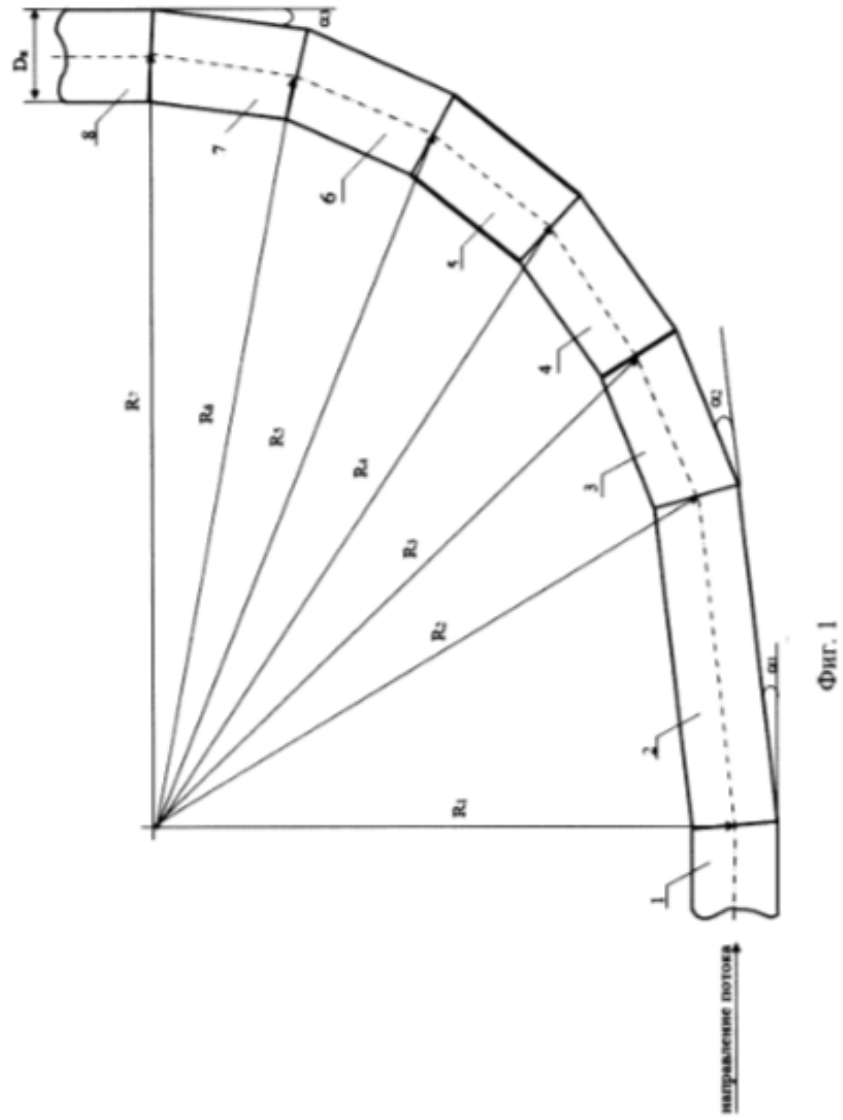
2. Сборное колено поворота пульпопровода по п. 1, отличающееся тем, что длина входного элемента стабилизации потока составляет четыре внешних диаметра трубы и выходного элемента стабилизации потока.

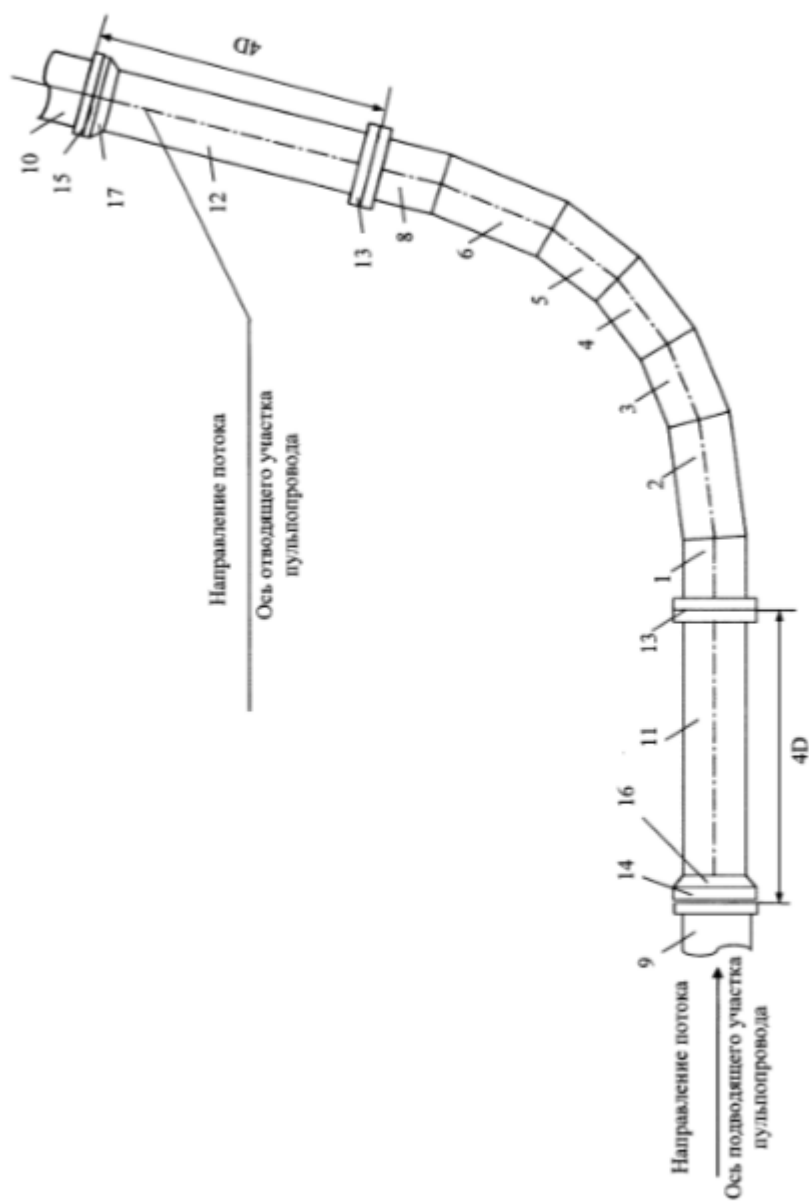
3. Сборное колено поворота пульпопровода по п. 1, отличающееся тем, что входной

RU 200 900 U1

элемент стабилизации потока и выходной элемент стабилизации потока выполнены с алюмотермическим покрытием внутренней поверхности.

*5**10**15**20**25**30**35**40**45*





Фиг. 2

Приложение Г

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от ООО «Энергохимкомплект»



Общество с ограниченной ответственностью
«Энергохимкомплект»

454128, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, дом 120, офис 23
ИНН 7447054785/КПП 744701001 Свидетельство ЕГРН № 1027402546632 ОКПО 12606601 ОКОНХ 80200
Факс: (351) 792-89-76 (авто); Отдел строительных материалов: (351) 795-82-04
Тел./факс: (351) 796-88-55, 792-89-70, 795-78-69
Web-site: www.ehk.ru e-mail: info@ehk.ru
Р/с 40702810572000000156 в Челябинском отделении № 8597 ПАО Сбербанк
К/с 30101810700000000602 БИК 047501602

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ЭХК»

Белошицкий Д. А.

« 16 » 12 2022 г.

АКТ

о внедрении научных результатов

докторской диссертационной работы заведующего НОЦ «Экология энергетики» ФГБОУ ВО
НИУ «МЭИ» Ирины Вячеславовны Путиловой

Комиссия в составе:

председатель: Ильин Евгений Николаевич,

члены комиссии: Зосим Вячеслав Валентинович

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Путиловой Ирины Вячеславовны «Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы при выполнении НИОКР «Разработка технологии защиты поверхностей пульпопроводов при работе на углях с повышенной зольностью. Изготовление опытно-промышленного образца» для Хабаровской ТЭЦ-3, по которой наша компания - ЭХК выполняла субподрядные работы в 2019 г.

В результате работы Путиловой И.В. был спроектирован криволинейный участок Ду 530 мм для создания опытно-промышленного образца на базе СП «Хабаровская ТЭЦ-3», для которого наша компания выполняла дополнительное керамическое усиление с целью минимизации абразивного износа. Таким образом, совместно с Путиловой И.В. компания ЭХК окончательно детализировала конструкцию отвода (О 530×490-г/д5-75°-Ф, чертеж приложен) с учетом керамического покрытия.

По договору с ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» №02/2019-061-ЭХК от 20.03.2019 г. отвод был изготовлен и в сентябре 2019 г. смонтирован на Хабаровской ТЭЦ-3. По сведениям, полученным от Хабаровской ТЭЦ-3, отвод успешно эксплуатируется более трех лет.

Закключение. Использование указанных результатов Путиловой И.В. позволило повысить ресурс и износостойкость пульпопроводов системы золошлакоудаления Хабаровской ТЭЦ-3 при работе на углях с повышенной зольностью, что, в свою очередь, привело к существенному сокращению затрат на проведение ремонтных работ в системе гидрозолоудаления станции.

Председатель комиссии:

Главный инженер

Ильин

Ильин Е. Н.

Члены комиссии:

Директор по гидроабразивному и
сварочному производству

Зосим

Зосим В. В.



Приложение Д

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от СП «Хабаровская ТЭЦ-3»

Акционерное общество «Дальневосточная генерирующая компания»
СП «Хабаровская ТЭЦ-3»



АКТ

о внедрении научных результатов
докторской диссертационной работы
заведующего Научно-образовательным Центром «Экология энергетики»
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» Путиловой Ирины Вячеславовны

Настоящим документом подтверждаем, что результаты, полученные в диссертационной работе «Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы при выполнении НИОКР «Разработка технологии защиты поверхностей пульпопроводов при работе на углях с повышенной зольностью. Изготовление опытно-промышленного образца» по договору №517/хГ-18 от 14.08.2018 г. между ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и АО «ДГК».

В раках выполнения упомянутой НИОКР в сентябре 2019 года изготовлен и смонтирован на участке системы гидрозолоудаления Хабаровской ТЭЦ-3 отвод, который успешно эксплуатируется до настоящего времени.

Технико-экономический эффект: срок службы исходного стального колена поворота пульпопровода при гидротранспорте золы нерюнгринского, кузнецкого и

ургальского угля при скоростях транспортирования пульпы от 1,2 до 1,8 м/с и массовой концентрации от 5 до 10% составляет от 3 до 17 лет. Ожидаемый срок службы спроектированного Путиловой И.В. криволинейного участка Ду 530 мм с учетом оптимизации его формы составит в 3-4 раза больше, чем исходного стального колена. При использовании труб с алюмотермическим покрытием без учета оптимизации формы колена ожидаемый срок службы отвода возрастет более, чем в 10 раз в зависимости от характеристик транспортирования пульпы. После внедрения комплексной технологии защиты пульпопровода от абразивного износа с учетом оптимизации формы криволинейного участка с нанесенным алюмотермическим покрытием ожидаемый срок службы отвода возрастет более, чем 14 раз в зависимости от характеристик транспортирования пульпы.

Начальник ПТО
СП «Хабаровская ТЭЦ-3»



Санычев В.В.

Приложение Е

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от ООО «Энергохимкомплект»



Общество с ограниченной ответственностью
«Энергохимкомплект»

454128, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, дом 120, офис 23
ИНН 7447054785/КПП 744701001 Свидетельство ЕГРН № 1027402546632 ОКПО 12606601 ОКОНХ 80200
Факс: (351) 792-89-76 (авто); Отдел строительных материалов: (351) 795-82-04
Тел./факс: (351) 796-88-55, 792-89-70, 795-78-69
Web-site: www.ehk.ru e-mail: info@ehk.ru
Р/с 40702810572000000156 в Челябинском отделении № 8597 ПАО Сбербанк
К/с 3010181070000000602 БИК 047501602

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ЭХК»

Белошицкий Д. А.

«26» Марта 2024 г.

АКТ

о внедрении научных результатов

докторской диссертационной работы заведующего НОЦ «Экология энергетики»
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» Ирины Вячеславовны Путиловой

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Путиловой И.В. «Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы при проектировании и запуске новой установки для нанесения алюмотермических покрытий на трубы большого диаметра (до 530 мм) по усовершенствованной технологии.

Данная технология позволяет существенно продлить ресурс трубопроводов из-за их абразивного износа при транспортировании угольной пыли, золы, золошлаковой смеси и других мелкодисперсных кремнесодержащих материалов.

Запуск новой установки позволил расширить номенклатуру выпускаемой продукции и удовлетворить спрос новых заказчиков.

Главный инженер

Ильин Е. Н.



Приложение Ж

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от ООО «Экометт-Луч»



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор


В.Р. Шевцов
«14» декабря 2022 г.


АКТ

об использовании результатов докторской диссертационной работы
ПУТИЛОВОЙ ИРИНЫ ВЯЧЕСЛАВОВНЫ,
выполненной на тему:

**«Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками
угольных ТЭС для их максимального использования в
производственных процессах предприятий России»**

настоящим подтверждаем, что научные и практические результаты, полученные
в диссертационной работе Путиловой И.В., использованы при разработке
стратегии развития компании ООО «Экометт-Луч», а также в НИР
«Теоретический анализ возможности использования угольного продукта
производства ООО «Экометт-Луч» на котлах Приморской ГРЭС», выполненной
по заказу ООО «Экометт-Луч» в 2020 г.

Помощник председателя совета директоров



И.П. Калитина

Приложение 3

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от Минэнерго России



**МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНЭНЕРГО РОССИИ)**

ул. Щепкина, д. 42, стр. 1, стр. 2,
г. Москва, ГСП - 6, 107996
Телефон (495) 631-98-58, факс (495) 631-83-64
E-mail: minenergo@minenergo.gov.ru
<http://www.minenergo.gov.ru>

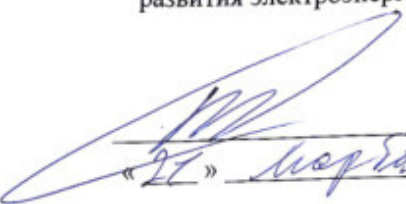
22.03.2024 № 07-1035

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель

Заместитель директора Департамента
развития электроэнергетики, к.э.н.

 Попов Г.Э.
«22» марта 2024 г.

АКТ

о внедрении научных результатов

докторской диссертационной работы заведующего НОЦ «Экология энергетики»
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» Ирины Вячеславовны Путиловой

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Путиловой И.В. «РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ЗОЛОШЛАКАМИ УГОЛЬНЫХ ТЭС ДЛЯ ИХ МАКСИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы при подготовке Информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» с последующей актуализацией в 2022 г.

Ведущий советник отдела
теплосетевой деятельности и
нормирования Департамента
развития электроэнергетики, к.т.н.



Горячих Н.В.

Приложение К

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от ПАО «Мосэнерго»



Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Мосэнерго»
(ПАО «Мосэнерго»)

«___» _____ 20__ г.

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Начальник инженерного управления
ПАО «Мосэнерго»



А.Н. Вивچار

« 19 » D3 2024 г.

АКТ

о внедрении научных результатов

докторской диссертационной работы заведующего НОЦ «Экология энергетики»
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» Ирины Вячеславовны Путиловой

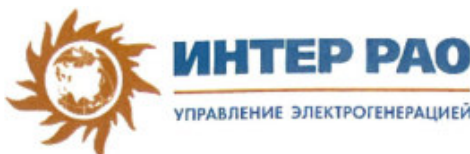
Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Путиловой И.В. «Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, были использованы при выполнении дипломных работ сотрудниками Генеральной дирекции, ТЭЦ-22 и ТЭЦ-17 – филиалов ПАО «Мосэнерго», обучавшимися по программе профессиональной переподготовки по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

Руководитель проектов службы
экспертизы и технического развития

К.С. Никишов

Приложение Л

Акт о внедрении научных результатов диссертационной работы
от ООО «Интер РАО - Управление электрогенерацией»



Большая Пироговская ул., д. 27, стр. 2., г. Москва, Россия, 119435
Телефон: +7 (495) 664-76-80 Факс: +7 (495) 664-76-84
www.ira-generacion.com

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора —
Главный инженер

ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией»,
управляющей компании АО «Интер РАО – Электрогенерация»



Миляев Р.Г.

МАРТА 20 24 г.

АКТ**о внедрении научных результатов**

докторской диссертационной работы заведующего НОЦ «Экология энергетики»
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» Ирины Вячеславовны Путиловой

Настоящим документом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Путиловой И.В. «Разработка комплексного подхода при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы сотрудниками АО «Интер РАО – Электрогенерация», обучавшимися по программе профессиональной переподготовки по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», при выполнении дипломных работ по проблеме обращения с золошлаками филиалов «Каширская ГРЭС», «Черепетская ГРЭС им. Д.Г. Жимерина» АО «Интер РАО – Электрогенерация».

Начальник ПТО

ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией»

А.А. Поляков

Приложение М

Почетная грамота Федерального агентства по недропользованию



Приложение Н

Информация о реализованных проектах с использованием летучей золы при
строительстве различных объектов

Строительство зданий и сооружений с использованием летучей золы

США. В 2018 г. в г. Денвере, штат Колорадо, США было завершено строительство офисного 42-этажного здания высотой 184 м. Здание является пятым по высоте в городе и представляет собой стеклянную башню. Состоит из двух уровней подземной и двенадцати уровней наземной парковки, двадцати семи этажей офисного пространства и двухуровневого пентхауса. Строительство офисного здания (рисунок Н.1) потребовало решения ряда проектных задач, одна из которых состояла в надежном закреплении тяжелого небоскреба на сравнительно небольшом участке фундамента. Применение летучей золы до 40 % позволило повысить прочность строительной конструкции и минимизировать объемы цемента и бетона, необходимые для фундамента, при одновременном снижении затрат на строительство.

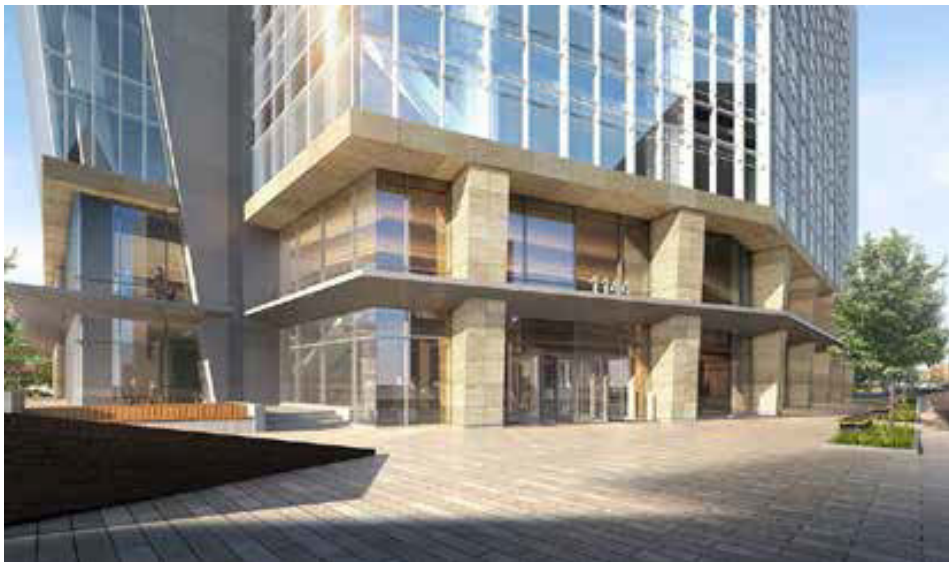


Рисунок Н.1 - Офисное здание в г. Денвер, штат Колорадо

В 2011 г. в г. Дентон, штат Техас, США завершен проект по строительству нового футбольного стадиона Апогей (рисунок Н.2). Для трибун был использован железобетонный каркас, изготовленный с применением летучей золы. Зола использовалась для замещения 2,8 тыс. т портландцемента для изготовления бетонных конструкций. В общей сложности для замещения портландцемента использовалось 35 % летучей золы, что привело к сокращению выбросов парниковых газов.

Стадион Апогей получил множество наград за экологичное строительство, в том числе был признан лучшим зеленым проектом в 2012 г.

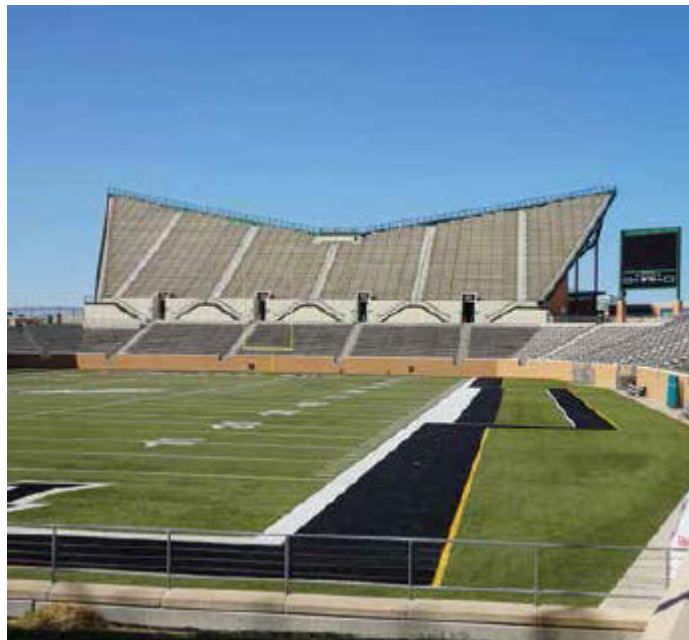


Рисунок Н.2 - Футбольный стадион Апогей, г. Дентон, штат Техас, построенный с использованием летучей золы

В 2021 г. в г. Темпе, штат Аризона, США завершен проект строительства Междисциплинарного научно-технического корпуса Государственного университета Аризоны (рисунок Н.3). Цель проекта – строительство пятиэтажного корпуса для выполнения научных исследований в области устойчивого развития. При этом, проектом предусмотрено нулевое загрязнение окружающей среды, связанное с использованием строительных материалов и процессов. Существенным при выполнении проекта, для реализации которого требуется около 15 тыс.

м³ бетона, является применение вторичных материалов, а также строительных материалов, при производстве которых выброс парниковых газов минимален. Использование летучей золы для замещения портландцемента составило 40 %, что позволило повысить прочностные и экологические характеристики элементов конструкции – плит перекрытий, кессонов, стен, колонн, опалубки.



Рисунок Н.3 - Научно-технический корпус Государственного университета Аризоны

Канада. Башни Ниагарской ветряной электростанции (ВЭС) в Онтарио (Канада) сделаны из бетона, произведенного с использованием летучей золы ТЭС (рисунок Н.4). Установленная мощность ВЭС - 230 МВт. Высота башен - 130 м, что превышает более, чем на 30 м среднюю высоту ветроустановок. Работы по возведению 77 башен длились 16 месяцев. За это время было использовано 11 000 т летучей золы, которая смешивалась с портландцементом в соотношении 1:1. ВЭС была признана одним из 10 лучших проектов Бетонной премии Онтарио в 2017 г.



Рисунок Н.4 - Ниагарская ВЭС в Онтарио

Индия. Долгие годы в Индии при строительстве зданий использовался зольный кирпич. Для производства высококачественного кирпича из летучей золы применялся специально разработанный гидравлический кирпичный пресс двойного действия.

Текущее производство глиняного кирпича в Индии превышает 100 млрд кирпичей в год. Существенное повышение спроса связано с ростом населения и инфраструктурных потребностей. Параллельно с этим экологическая осведомленность приведет к увеличению спроса на зольный кирпич с одновременным уменьшением спроса на глиняный кирпич. В таких условиях, когда зольный кирпич технически приемлем, экономически жизнеспособен и безопасен для окружающей среды, его производство могло бы составить не менее 2 млрд т зольных кирпичей в год. При этом будет использоваться около 5 млн т летучей золы в год, принося чистую экономию около 4 млн долл. США в год.

На рисунках Н.5 и Н.6 приведены фотографии зданий, построенных из зольного кирпича.



Рисунок Н.5 - Четырехэтажное здание Индийского института технологий Дели, построенное с использованием зольных кирпичей



Рисунок Н.6 - Здание, построенное из зольного кирпича в Калькутте, Западная Бенгалия, Индия

В Индии в настоящее время производится около 110 млн т цемента ежегодно. Установлено, что строительные растворы и цементы с использованием золы обладают лучшими прочностными характеристиками и являются более надежными. В соответствии с требованиями Индийского бюро стандартов при производстве цементов может быть использовано до 35 % летучей золы, в то время как существуют примеры в разных странах с замещением цемента летучей золой до 55 %.

Применение золы в легких бетонах позволяет снизить использование цемента на 30 %, делает структуру более легкой, что приводит к снижению затрат

и энергосбережению; увеличивает прочность бетона; улучшает липкость и вязкость готового материала; бетон быстрее высыхает, меньше трескается и крошится. Зола успешно применяется при производстве кровельных материалов (рисунок Н.7).



Рисунок Н.7 - Кровельные материалы с использованием летучей золы, Ченнаи, Индия

Гидравлические структуры. Технология разработана Центральной научно-исследовательской станцией по почвам и материалам (CSMRS) Нью-Дели и Университетом Рурки для строительства гидравлических структур из бетона, уплотненного катками с использованием большого количества летучей золы. В результате применения такой технологии возможна экономия до 60...70 % цемента и уменьшение периода выполнения строительных работ от 1/2 до 2/3 времени, необходимого для обычной практики строительства. Кроме того, отсутствие теплоты гидратации позволяет избежать применения охлаждающих установок, что позволяет проводить строительные работы более быстрыми темпами. Меньшее время, требуемое для строительства, позволяет применять строительное оборудование для проведения других строительных работ и, таким образом, существенно повысить экономическую составляющую строительства.

Департаментом ирригации Правительства штата Махараштра было построено три дамбы по технологии бетонирования уплотняющими катками с использованием летучей золы. При поддержке индийской Миссии по проблеме летучей золы и в соответствии с ее проектом были разработаны составы смеси, инструментарии, другие аспекты реализации проекта и программы курсов обучения с участием ученых и инженеров. Эти инициативы привели к началу выполнения последующих НИОКР в этой области в Университете Рурки, Техническом научно-исследовательском институте Махараштра (MERI) Насик и др.

Германия. Башни Кастор и Поллюкс во Франкфурте, Германия представляют собой классические бетонные здания (рисунок Н.8). Самая высокая башня этого ансамбля имеет высоту 130 м. Они построены на единой бетонной плите из массивного бетона, которая содержит 180 кг цемента и 120 кг летучей золы на куб. м для снижения теплоты гидратации. Верхний слой фундаментной плиты имеет высокую стойкость к истиранию, содержит 280 кг портландцемента и 70 кг летучей золы на куб. м. Для увеличения арендуемой площади для внутренних стен башен был использован высокопрочный бетон В65, содержащий 400 кг цемента и 100 кг летучей золы на куб. м. Колонны были изготовлены из высокопрочного бетона В115 с использованием 470 кг цемента, 120 кг летучей золы и 35 кг микрокремнезема на м³. Прочность колон через 90 дней достигла 130 Н/мм².



Рисунок Н.8 - Башни Кастор и Поллюкс, г. Франкфурт, Германия

Для строительства градирни новой ТЭС мощностью 950 МВт в Нидраусе, Германия, использовался высокоэффективный бетон с высокой устойчивостью к кислотному воздействию (рисунок Н.9). При высоте 200 м, диаметре верхней части 86 м и диаметре нижней части 136 м, эта градирня на данный момент является самой большой в мире. Для строительства было использовано 32 000 м³ бетона, из которых 17650 м³ составлял высокопрочный бетон. Этот специальный кислотостойкий бетон является очень плотным и достигает прочности на сжатие более 85 МПа через 28 дней. Плотная матрица получается в результате оптимального распределения зерен по размерам, особенно в мелкой фракции, состоящей из цемента, летучей золы и диоксида кремния. Для производства 1 м³ этого бетона было использовано около 230 кг обычного портландцемента, 65 кг летучей золы и 33 кг диоксида кремния в качестве вяжущего, а также 3,2 т наполнителей с размером зерна до 16 мм и 120 л воды, а также пластификатор нового поколения на основе поликарбоксилата.



Рисунок Н.9 - Градирня ТЭС в г. Нидераусем, Германия

Испания. Для строительства башни Пикассо высотой 171 м в Мадриде, которая является самым высоким зданием, был использован бетон с добавлением летучей золы (рисунок Н.10). Всего использовано 11000 м³ бетона, и его состав менялся в зависимости от высоты здания. Были опробованы различные рецепты с использованием разных типов легких заполнителей, цемента, летучей золы и

добавок. Результаты испытаний, проведенных перед началом строительства, показали, что наиболее важными параметрами, которые необходимо учитывать для обеспечения требуемой прочности бетона, были: количество летучей золы, специфические добавки и степень насыщения легких заполнителей. Количество цемента оказало незначительное влияние.

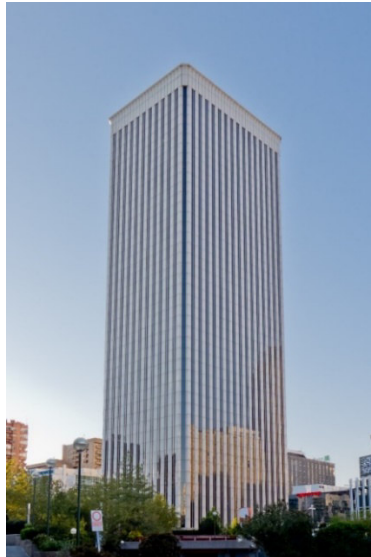


Рисунок Н.10 - Башня Пикассо, Мадрид

Нидерланды. Самоуплотняющийся бетон хорошо известен в Японии. Такой бетон также применяется в Нидерландах с 1995 г. для изготовления сборных железобетонных изделий и при производстве строительных работ. Первый технический опыт с применением нового бетона имел место при строительстве нового театра в г. Ден Хааг (рисунок Н.11). По архитектурным соображениям в фасаде имеется много горизонтальных профилей V-образного типа, которые не могут быть изготовлены из обычного бетона. При изготовлении самоуплотняющегося бетона был использован новый вид пластификаторов, так называемых суперпластификаторов, которые регулируют удобоукладываемость бетона в отношении как текучести и пластичности, так и сцепления и вязкости. Кроме того, количество наполнителей уменьшается по сравнению с обычным бетоном, а доля мелких зерен в виде цемента и летучей золы увеличивается. Желаемая удобо-

укладываемость достигается как действием нового пластификатора, так и полной инкапсуляцией агрегатных зерен пастой, состоящей из смеси мелких зерен и воды.



Рисунок П1.11 - Театр в г. Ден Хааг, Нидерланды

Еще один пример использования летучей золы в крупных бетонных конструкциях - ветровое стекло вдоль канала Каланд вблизи Роттердама, Нидерланды (рисунок Н.12). Назначение ветрового стекла - предотвратить дрейф крупных морских судов в канале в результате сильных ветров. Сооружение расположено недалеко от Северного моря и поэтому подвержено суровым условиям, таким как истирание песком, соленая вода и т. д. Ветровое стекло было отформовано в начале 1980-х годов и теперь стало местной достопримечательностью.



Рисунок Н.12 - Ветровое стекло вдоль канала Каланд, Роттердам.

Франция. Плотина Пуйлаурент - одна из крупнейших арочных плотин, построенных во Франции в 1995 г. (рисунок Н.13). Ее максимальная высота над фундаментом составляет 73 м, а длина гребня - 220 м. Эффект добавления летучей золы в бетон хорошо известен. Это ограничивает экзотермичность бетона во время твердения и снижает риск образования трещин из-за термического напряжения. При строительстве плотины использовано специальное вяжущее, состоящее на 60% из шлакопортландцемента и на 40 % из гидратированной золы из золошлакоотвала французской ТЭС. Содержание цемента составляло 250 кг/м^3 . Количество золы, использованной во всем строительстве, составило 10 000 т.



Рисунок Н.13 - Плотина Пуйлаурент, Франция

Греция. В 1992 г. началось строительство плотины Планатоврисси с применением технологии роликового уплотнения бетона и использованием летучей золы бурых углей в качестве основного цементирующего материала (рисунок Н.14). Строительство плотины завершено в 1996 г. Плотина высотой 95 м с длиной гребня 270 м является самой высокой плотиной в Европе. Бетон, используемый в строительстве, содержал 50 кг/м^3 обычного портландцемента и 225 кг/м^3 измельченной и предварительно гидратированной золы бурых углей, смесь для облицовки содержала 140 кг/м^3 портландцемента и 175 кг/м^3 летучей золы.



Рисунок Н.14 - Плотина Планатоврисси, Греция

Бельгия. Электростанция Генк-Лангерло оснащена пятью бетонными силосными башнями для хранения летучей золы (рисунок Н.15). Высота каждой башни составила 43,6 м, диаметр - 13 м, толщина стен - 0,45 м. Бетон содержал летучую золу в количестве 80 кг/м^3 . Через 28 дней испытываемые образцы достигли прочности на сжатие $34,9 \text{ Н/мм}^2$. Количество золобетона для возведения стен одного силоса, включая верхний и нижний этажи, составило около 1500 м^3 ; при этом, было добавлено 20 т летучей золы, что обеспечило гладкую и ровную поверхность бетону. Использование золы не требовало особых мер предосторожности во время строительства. С тех пор этот метод внедрен на нескольких других генерирующих станциях.



Рисунок Н.15 - Силосные башни ТЭС Генк-Лангерло

Дания. Для соединения Копенгагена с материком в Центральной Европе был осуществлен проект строительства Восточного моста, связывающего датский остров Фюн и Зеландию (рисунок Н.16). Этот мост - самый длинный в мире подвесной мост со свободным пролетом длиной 1624 м. Опорные стойки, на которых подвешен основной пролет, поднимаются на высоту 254 м. Они построены из монолитного железобетона и опираются на сборные железобетонные кессоны.

Высокопрочный бетон, используемый на Восточном мосту, изготовлен с применением трехкомпонентной порошковой смеси, состоящей из портландцемента, летучей золы (47 кг/м^3 для пилонов) и микрокремнезема, использованных в качестве цементирующего компонента. Уникальной характеристикой бетона является исключительно низкий процент цементного раствора. Конструкция спроектирована с ожидаемым сроком службы 100 лет.



Рисунок Н.16 - Мост Большой Белт

Англия. Основание морской гравитационной платформы ВР (рисунок Н.17) было построено для хранения до 570 тыс. баррелей сырой нефти. Эта платформа весом 85 тыс. т предназначена для размещения бурового оборудования, производственных сооружений и жилищно-бытового комплекса общим весом 23 тыс. т. При изготовлении платформы было использовано 36 тыс. м^3 бетона. Впоследствии она была отбуксирована на расстояние 540 морских миль в Северное

море и погружена на глубину 100 м. Для морской среды нужен был очень прочный бетон, а согласно техническим требованиям самой конструкции необходим был легкий бетон высокой прочности. Бетон необходимого качества представлял собой смесь легкого заполнителя из спекшейся летучей золы с цементирующим вяжущим, содержащим 30% летучей золы. Использование летучей золы в качестве вяжущего вещества помогло контролировать теплоту гидратации и обеспечить набор прочности при длительной нагрузке.



Рисунок П1.17 - Морская гравитационная платформа

Германия. Благодаря своим особым свойствам силикатный кирпич может играть важную роль в строительстве домов. В Германии такие кирпичи производятся с использованием смеси шлака котлов с жидким шлакоудалением, летучей золы, извести и воды, которая прессуется в форму для изготовления кирпича (рисунок Н.18). Отверждение кирпичей осуществляется в автоклавах при температуре 190 °С и давлении около 14 бар. Возможен широкий выбор кирпичей различных форм и размеров. Побочные продукты сжигания угля могут составлять до 95 % смеси, используемой при производстве кирпича.



Рисунок Н.18 - Производство силикатного кирпича, Бохум, Германия

ЮАР. Угольная ТЭС Медупи (рисунок Н.19), ЮАР построена с использованием летучей золы, произведенной на ТЭС Матла. Для строительства ТЭС Медупи требовалось более 650 000 м³ бетона. Для контроля теплоты гидратации в бетоне было решено летучую золу электростанции Матла, расположенную в 450 км от ТЭС Медупи. Всего было использовано более 75 000 т летучей золы в ходе реализации проекта за 5 лет. Электростанция является 4-й крупнейшей угольной ТЭС в мире с установленной мощностью в 4,8 ГВт. Проект был удостоен международной строительной премии - Construction World 2013 Best Projects Award.



Рисунок Н.19 - ТЭС Медупи, Лимпопо, ЮАР

Россия. В России в Свердловской обл. с 2009 г. на Рефтинском заводе начали производить блоки I категории (Твинблок™), которые представляют собой газобетонные блоки автоклавного твердения (рисунок Н.20). В качестве наполнителя используется летучая зола Рефтинской ГРЭС. Из таких блоков строят загородные дома и многоэтажки, производственные цеха и гаражи, административные и торговые здания (рисунки Н.21 и Н.22). По сравнению с пеноблоками неавтоклавного твердения и газобетоном Твинблоки обладают повышенными прочностными характеристиками, являются более долговечными и более теплыми материалами, дают меньшую усадку при использовании, что предотвращает появление трещин и разломов, а также являются экологичными. По радиационному фону Твинблоки превосходят кирпич и гранит, не говоря об аналогах, в составе которых есть кварцевый песок, что подтверждает их экологичность.



Рисунок Н.20 - Изделия из ячеистого бетона автоклавного твердения по ГОСТ 31360-2007-Твинблок

Теплоизоляционные свойства Твинблоков обусловлены пористой структурой. Ограждающие конструкции из Твинблоков в 3...5 раз теплее кирпичных. Зимой они предотвращают значительные потери тепла, а летом позволяют избежать слишком высоких температур, то есть создают благоприятный микроклимат. В процессе эксплуатации таких конструкций энергозатраты на отопление уменьшаются на 25...30 %. Использование клеевого состава, а не строительного раствора для кладки Твинблоков повышает термическое сопротивление конструкции на 20 %.



Рисунок Н.21 - Жилой дом в пгт Рефтинский, построенный
ООО «ПСО «Теплит»



Рисунок Н.22 - 25-этажный дом из Твинблоков в г. Екатеринбург

В России с 2007 г. завод «Технофлекс» производит рулонные гидроизоляционные материалы с использованием летучей золы в качестве минерального порошка взамен природным минералам (известняк, доломит, мел).

Кроме упомянутых направлений использования золошлаков в строительных проектах, зола эффективно применяется при производстве искусственной

пористой древесины и керамической плитки (рисунки Н.23, Н.24). Такой опыт успешно реализован в различных странах, в т.ч. Индии, Китае и России. Ниже приведены продукты из искусственной пористой древесины, произведенной из летучей золы и отходов ПВХ.



Рисунок Н.23 - Двери из искусственной пористой древесины



Рисунок Н.24 - Панели из искусственной пористой древесины

Преимущества применения продукции из искусственной пористой древесины:

- 100 %-ное замещение древесины;
- в 5...7 раз прочнее изготовленных из натуральной древесины;
- атмосферостойкие, стойкие к термитам, грибкам и пожаробезопасные;
- повышение срока службы;
- существенно меньшая себестоимость производства по сравнению с аналогами в связи с тем, что сырьем являются отходы ПВХ и зола; отходы ПВХ используются в качестве вяжущего (самого дорогого компонента), а зола - в качестве бесплатного или дешевого наполнителя.

Использование золошлаков в дорожном строительстве

Индия. Дороги и насыпи. Исследования по утилизации летучей золы, шлака котлов с твердым шлакоудалением и золы из гидрозолоотвалов проводилась в научно-исследовательских и академических учреждениях Индии более 40 лет. Участки дорог, которые были построены в эти годы, свидетельствуют о результатах научно-исследовательской деятельности и опыте реализации подобных проектов, направленных на дальнейшее развитие масштабной утилизации золошлаков.

Это направление использования летучей золы показало успешность ее применения в качестве структурного наполнителя при возведении насыпей для висячих мостов в Дели и строительстве дороги вблизи Райчура. При строительстве дорожной насыпи длиной 1,7 км и высотой 6...8 м для Низаммуддинского моста (рисунок Н.25), в Нью-Дели было использовано 150 тыс. м³ летучей золы.



Рисунок Н.25 - Насыпь подъездной дороги к Низамуддинскому мосту в Нью-Дели (в зоне затопления реки Ямуна)

Электроснабжающая компания Калькутты и Индийская энергетическая компания (NTPC) построили дороги с использованием летучей золы на своих электростанциях.

Висячий мост Охла в Нью-Дели — первый проект, в котором использовалась летучая зола для возведения насыпи — был открыт в 1996 г. Инженеры Департамента общественных работ Дели и власти убедились в преимуществах применения летучей золы для технологии строительства насыпи Хануман Сету Дели по сравнению с использованием для этих целей природных грунтов.

В результате выполнения экстакад с использованием летучей золы в Охле (рисунок Н.26), Хануман Сету, при строительстве моста Низамуддин в Дели и дороги в Райчуре, Калькутте, Дадри и т.д. было установлено, что благодаря использованию летучей золы в среднем экономия затрат может быть эквивалентна сумме, потраченной на выемку и транспорт от 50 до 75 млн т грунта.



Рисунок Н.26 - Эстакада в Охле, Индия

Ввиду растущей потребности в развитии дорожной инфраструктуры в стране, по самым скромным подсчетам, около 15...20 т золы в год можно использовать при строительстве дорог и насыпей эстакад вблизи ТЭС. Это даст экономию около 20 млн долл. США в год.

Летучая зола, используемая как структурный наполнитель, является лучшим геотехническим материалом, чем природные грунты, особенно вследствие фракционного состава, плотности, характеристик уплотнения, прочностных характеристик, проницаемости и удобства при проведении работ. Кроме того, летучую золу обычно можно получить бесплатно и ее использование приводит к сбережению ценной плодородной земли, которая бы в противном случае использовалась для таких целей.

Великобритания. Летучая зола каменного угля использовалась в зольных смесях для основания дорог, подосновы и верхнего слоя в дорожном строительстве в Великобритании. Зольные смеси могут быть изготовлены в трех формах: золоцементные смеси; смеси гранулированного материала с золой и известью и дорожная одежда толщиной 230 мм, состоящая из 7 % цемента и 93 % золы. В 1997 г. трасса А52 протяженностью 1 км в дер. Фрогхолл вблизи Стаффордшира

была реконструирована с использованием золоцементных смесей (рисунок Н.27). Согласно проекту, существующий материал дорожного покрытия глубиной 400 мм был изъят, переработан за пределами площадки с добавлением 12 % золы, 3 % извести, 27 % песка и 58 % переработанного наполнителя (с размерами зерен от 5 до 20 мм) и повторно уложен в качестве золоцементного слоя толщиной 300 мм под 100-миллиметровый слой нового битумного покрытия. Золоцементная смесь, используемая в данном проекте, представляет собой смесь измельченного крупнозернистого материала, песка, золы, извести и воды, в которой комбинация золы и извести выступает в качестве вяжущего.



Рисунок Н.27 - Применение летучей золы в дорожной одежде,
г. Стаффордшир

Франция. Использование летучей золы при строительстве дорог давно практикуется во Франции. В Ланс-ла-Бассе на севере Франции было построено уширение дороги РН 47 протяженностью 7,5 км с использованием около 50 000 т летучей золы (рисунок Н.28). Профиль улицы представляет собой слой грунта из натуральных наполнителей толщиной 40-50 см, слоя толщиной 22 см, содержащего 91 % золы, слоя толщиной 28 см, содержащего 13 % золы, покрытого двумя битумными слоями высотой 7 и 5 см.



Рисунок Н.28 - Применение летучей золы в дорожной одежде, Ланс-ла-Басс,
Франция

Приложение П

Протокол проведения экспериментальных исследований в ИИТ Дели по определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов

Time	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P9	P10	Gauge	
Nov 16 12:38:17	-0.008	-0.008	0.782	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.478	1.306	0.167	
Nov 16 12:38:18	-0.008	-0.008	0.780	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.482	1.301	0.168	
Nov 16 12:38:19	-0.008	-0.008	0.780	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.486	1.304	0.166	
Nov 16 12:38:20	-0.008	-0.008	0.779	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.484	1.297	0.172	
Nov 16 12:38:21	-0.008	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.477	1.312	0.160	
Nov 16 12:38:22	-0.007	-0.008	0.776	-0.023	-0.028	-0.047	-0.015	-0.024	0.474	1.299	0.160	
Nov 16 12:38:23	0.008	-0.008	0.786	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.481	1.301	0.166	
Nov 16 12:38:24	0.078	-0.008	0.782	-0.023	-0.028	-0.049	-0.015	-0.024	0.478	1.304	0.166	
Nov 16 12:38:25	0.123	-0.008	0.786	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.479	1.297	0.162	
Nov 16 12:38:26	0.101	-0.008	0.784	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.481	1.295	0.164	
Nov 16 12:38:27	-0.007	-0.008	0.783	-0.023	-0.028	-0.049	-0.015	-0.024	0.486	1.309	0.169	
Nov 16 12:38:28	-0.008	-0.008	0.791	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.480	1.301	0.168	
Nov 16 12:38:29	-0.008	-0.008	0.792	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.483	1.306	0.164	
Nov 16 12:38:30	-0.008	-0.008	0.790	-0.023	-0.028	-0.047	-0.015	-0.024	0.490	1.296	0.168	
Nov 16 12:38:31	-0.008	-0.008	0.792	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.481	1.309	0.168	
Nov 16 12:38:32	-0.008	-0.008	0.790	-0.023	-0.028	-0.049	-0.015	-0.024	0.486	1.306	0.163	
Nov 16 12:38:33	-0.008	-0.008	0.787	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.480	1.288	0.163	
Nov 16 12:38:34	-0.008	-0.008	0.790	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.484	1.300	0.171	
Nov 16 12:38:35	-0.009	-0.008	0.788	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.483	1.285	0.169	
Nov 16 12:38:36	-0.008	-0.008	0.786	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.473	1.287	0.167	
Nov 16 12:38:37	-0.008	-0.008	0.780	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.475	1.299	0.169	
Nov 16 12:38:38	-0.009	-0.008	0.780	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.482	1.294	0.164	
Nov 16 12:38:39	-0.008	-0.008	0.782	-0.023	-0.028	-0.049	-0.015	-0.024	0.479	1.291	0.169	
Nov 16 12:38:40	-0.008	-0.008	0.781	-0.023	-0.028	-0.052	-0.015	-0.024	0.474	1.294	0.171	
Nov 16 12:38:41	-0.009	-0.008	0.782	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.479	1.302	0.167	
Nov 16 12:38:42	-0.009	-0.008	0.781	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.473	1.302	0.164	
Nov 16 12:38:43	-0.009	-0.008	0.784	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.473	1.304	0.171	
Nov 16 12:38:44	-0.009	-0.008	0.782	-0.023	-0.028	-0.049	-0.015	-0.024	0.480	1.302	0.168	
Nov 16 12:38:45	-0.009	-0.008	0.780	-0.023	-0.028	-0.052	-0.015	-0.024	0.476	1.303	0.164	
Nov 16 12:38:46	-0.009	-0.008	0.783	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.480	1.303	0.169	
Nov 16 12:38:47	-0.009	-0.008	0.790	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.484	1.303	0.169	
Nov 16 12:38:48	-0.010	-0.008	0.800	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.484	1.296	0.169	
Nov 16 12:38:49	-0.008	-0.008	0.801	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.481	1.283	0.169	
Nov 16 12:38:50	-0.009	-0.008	0.789	-0.023	-0.028	-0.052	-0.015	-0.024	0.486	1.294	0.171	
Nov 16 12:38:51	-0.009	-0.008	0.791	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.482	1.286	0.163	
Nov 16 12:38:52	-0.010	-0.008	0.789	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.480	1.290	0.176	
Nov 16 12:38:53	-0.009	-0.008	0.787	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.475	1.289	0.168	
Nov 16 12:38:54	-0.010	-0.008	0.787	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.479	1.296	0.167	
Nov 16 12:38:55	-0.010	-0.008	0.788	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.479	1.301	0.169	
Nov 16 12:38:56	-0.010	-0.008	0.789	-0.023	-0.028	-0.052	-0.015	-0.024	0.480	1.301	0.160	
Nov 16 12:38:57	-0.010	-0.008	0.788	-0.023	-0.028	-0.049	-0.015	-0.024	0.481	1.306	0.166	
Nov 16 12:38:58	-0.010	-0.008	0.790	-0.023	-0.028	-0.053	-0.015	-0.024	0.482	1.303	0.175	
Nov 16 12:38:59	-0.010	-0.008	0.790	-0.023	-0.028	-0.048	-0.015	-0.024	0.471	1.297	0.172	
Nov 16 12:39:00	-0.010	-0.008	0.791	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.478	1.301	0.166	
Nov 16 12:39:01	-0.010	-0.008	0.785	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.473	1.290	0.162	
Nov 16 12:39:02	-0.010	-0.008	0.786	-0.023	-0.028	-0.050	-0.015	-0.024	0.475	1.300	0.168	
Nov 16 12:39:03	-0.010	-0.008	0.784	-0.023	-0.028	-0.051	-0.015	-0.024	0.473	1.293	0.173	
Nov 16 12:39:04	-0.010	-0.008	0.786	-0.023	-0.027	-0.052	-0.015	-0.024	0.479	1.293	0.168	
Nov 16 12:39:05	-0.010	-0.008	0.785	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.476	1.288	0.163	
Nov 16 12:39:06	-0.010	-0.008	0.785	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.474	1.284	0.173	
Nov 16 12:39:07	-0.010	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.470	1.277	0.159	
Nov 16 12:39:08	-0.010	-0.008	0.783	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.473	1.272	0.169	
Nov 16 12:39:09	-0.010	-0.008	0.783	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.474	1.285	0.159	
Nov 16 12:39:10	-0.010	-0.008	0.783	-0.023	-0.027	-0.047	-0.015	-0.024	0.471	1.285	0.169	
Nov 16 12:39:11	-0.011	-0.008	0.785	-0.023	-0.027	-0.054	-0.015	-0.024	0.467	1.292	0.171	
Nov 16 12:39:12	-0.011	-0.008	0.788	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.473	1.290	0.171	
Nov 16 12:39:13	-0.010	-0.008	0.787	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.477	1.301	0.160	
Nov 16 12:39:14	-0.011	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.470	1.297	0.172	
Nov 16 12:39:15	-0.010	-0.008	0.782	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.471	1.293	0.168	
Nov 16 12:39:16	-0.011	-0.008	0.782	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.474	1.295	0.163	
Nov 16 12:39:17	-0.011	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.466	1.289	0.160	

Nov 16 12:39:18	-0.011	-0.008	0.781	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.464	1.277	0.164
Nov 16 12:39:19	-0.011	-0.008	0.785	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.469	1.277	0.160
Nov 16 12:39:20	-0.011	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.461	1.273	0.168
Nov 16 12:39:21	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.467	1.266	0.166
Nov 16 12:39:22	-0.011	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.459	1.249	0.169
Nov 16 12:39:23	-0.011	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.454	1.270	0.167
Nov 16 12:39:24	-0.011	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.456	1.265	0.167
Nov 16 12:39:25	-0.011	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.455	1.270	0.169
Nov 16 12:39:26	-0.011	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.445	1.280	0.166
Nov 16 12:39:27	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.446	1.279	0.167
Nov 16 12:39:28	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.451	1.272	0.164
Nov 16 12:39:29	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.268	0.163
Nov 16 12:39:30	-0.011	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.444	1.261	0.172
Nov 16 12:39:31	-0.011	-0.008	0.769	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.443	1.265	0.169
Nov 16 12:39:32	-0.011	-0.008	0.778	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.446	1.257	0.171
Nov 16 12:39:33	-0.011	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.247	0.171
Nov 16 12:39:34	-0.011	-0.008	0.769	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.441	1.258	0.166
Nov 16 12:39:35	-0.012	-0.008	0.778	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.446	1.250	0.166
Nov 16 12:39:36	-0.012	-0.008	0.777	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.439	1.250	0.167
Nov 16 12:39:37	-0.012	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.443	1.252	0.163
Nov 16 12:39:38	-0.011	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.438	1.260	0.173
Nov 16 12:39:39	-0.012	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.446	1.251	0.167
Nov 16 12:39:40	-0.012	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.048	-0.015	-0.024	0.442	1.268	0.168
Nov 16 12:39:41	-0.012	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.443	1.268	0.171
Nov 16 12:39:42	-0.012	-0.008	0.781	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.445	1.272	0.159
Nov 16 12:39:43	-0.012	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.444	1.261	0.167
Nov 16 12:39:44	-0.012	-0.008	0.780	-0.023	-0.027	-0.052	-0.015	-0.024	0.449	1.264	0.166
Nov 16 12:39:45	-0.012	-0.008	0.780	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.446	1.272	0.164
Nov 16 12:39:46	-0.012	-0.008	0.782	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.447	1.260	0.168
Nov 16 12:39:47	-0.012	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.441	1.265	0.164
Nov 16 12:39:48	0.170	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.440	1.262	0.166
Nov 16 12:39:49	2.287	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.437	1.260	0.167
Nov 16 12:39:50	2.230	-0.008	0.777	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.445	1.257	0.167
Nov 16 12:39:51	2.208	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.445	1.254	0.160
Nov 16 12:39:52	2.201	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.445	1.257	0.164
Nov 16 12:39:53	2.248	-0.008	0.778	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.441	1.252	0.166
Nov 16 12:39:54	2.227	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.441	1.261	0.168
Nov 16 12:39:55	-0.010	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.442	1.246	0.167
Nov 16 12:39:56	-0.011	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.436	1.254	0.164
Nov 16 12:39:57	-0.011	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.441	1.267	0.169
Nov 16 12:39:58	-0.011	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.443	1.268	0.168
Nov 16 12:39:59	0.275	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.441	1.266	0.168
Nov 16 12:40:00	1.996	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.263	0.169
Nov 16 12:40:01	1.988	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.436	1.264	0.168
Nov 16 12:40:02	2.004	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.446	1.249	0.163
Nov 16 12:40:03	-0.011	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.445	1.266	0.177
Nov 16 12:40:04	-0.011	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.448	1.271	0.162
Nov 16 12:40:05	-0.011	-0.008	0.768	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.444	1.269	0.169
Nov 16 12:40:06	-0.011	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.448	1.276	0.166
Nov 16 12:40:07	-0.011	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.446	1.269	0.166
Nov 16 12:40:08	0.254	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.450	1.267	0.171
Nov 16 12:40:09	1.910	-0.008	0.782	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.452	1.268	0.168
Nov 16 12:40:10	1.800	-0.008	0.780	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.451	1.269	0.164
Nov 16 12:40:11	1.705	-0.008	0.777	-0.023	-0.027	-0.051	-0.015	-0.024	0.446	1.261	0.173
Nov 16 12:40:12	1.858	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.450	1.253	0.166
Nov 16 12:40:13	1.721	-0.008	0.769	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.447	1.257	0.166
Nov 16 12:40:14	1.419	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.049	-0.015	-0.024	0.447	1.258	0.166
Nov 16 12:40:15	1.581	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.440	1.258	0.168
Nov 16 12:40:16	-0.011	-0.008	0.778	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.453	1.250	0.168
Nov 16 12:40:17	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.444	1.263	0.168
Nov 16 12:40:18	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.050	-0.015	-0.024	0.447	1.272	0.169
Nov 16 12:40:19	-0.011	-0.008	0.777	-0.023	-0.027	-0.052	-0.015	-0.024	0.444	1.272	0.168
Nov 16 12:40:20	-0.011	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.451	1.269	0.162
Nov 16 12:40:21	-0.011	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.439	1.268	0.171
Nov 16 12:40:22	-0.011	-0.008	0.778	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.447	1.268	0.175
Nov 16 12:40:23	-0.011	-0.008	0.781	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.445	1.263	0.169

Nov 16 12:40:24	-0.011	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.266	0.162
Nov 16 12:40:25	-0.011	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.440	1.255	0.172
Nov 16 12:40:26	-0.011	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.444	1.257	0.172
Nov 16 12:40:27	-0.011	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.434	1.244	0.169
Nov 16 12:40:28	-0.011	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.434	1.229	0.172
Nov 16 12:40:29	-0.011	-0.008	0.768	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.432	1.246	0.160
Nov 16 12:40:30	-0.011	-0.008	0.777	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.433	1.246	0.163
Nov 16 12:40:31	-0.012	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.433	1.245	0.175
Nov 16 12:40:32	-0.012	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.440	1.252	0.169
Nov 16 12:40:33	-0.012	-0.008	0.779	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.437	1.262	0.166
Nov 16 12:40:34	-0.011	-0.008	0.777	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.439	1.263	0.162
Nov 16 12:40:35	-0.012	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.443	1.261	0.169
Nov 16 12:40:36	-0.012	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.439	1.272	0.172
Nov 16 12:40:37	-0.012	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.439	1.260	0.173
Nov 16 12:40:38	1.583	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.446	1.260	0.173
Nov 16 12:40:39	1.632	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.445	1.263	0.172
Nov 16 12:40:40	0.621	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.443	1.261	0.168
Nov 16 12:40:41	1.708	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.445	1.261	0.166
Nov 16 12:40:42	1.421	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.446	1.247	0.172
Nov 16 12:40:43	1.488	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.053	-0.016	-0.024	0.441	1.253	0.169
Nov 16 12:40:44	1.436	-0.008	0.769	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.446	1.249	0.173
Nov 16 12:40:45	-0.010	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.443	1.255	0.175
Nov 16 12:40:46	-0.010	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.442	1.259	0.166
Nov 16 12:40:47	-0.005	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.448	1.269	0.167
Nov 16 12:40:48	0.077	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.449	1.266	0.168
Nov 16 12:40:49	-0.010	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.446	1.273	0.160
Nov 16 12:40:50	-0.010	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.442	1.267	0.167
Nov 16 12:40:51	-0.010	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.447	1.272	0.167
Nov 16 12:40:52	0.140	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.447	1.269	0.166
Nov 16 12:40:53	1.141	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.446	1.268	0.169
Nov 16 12:40:54	2.382	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.451	1.265	0.167
Nov 16 12:40:55	2.409	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.437	1.261	0.169
Nov 16 12:40:56	2.432	-0.008	0.775	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.453	1.263	0.168
Nov 16 12:40:57	2.444	-0.008	0.769	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.447	1.250	0.171
Nov 16 12:40:58	2.443	-0.008	0.768	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.443	1.256	0.166
Nov 16 12:40:59	2.452	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.448	1.255	0.163
Nov 16 12:41:00	1.919	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.445	1.253	0.166
Nov 16 12:41:01	-0.009	-0.008	0.763	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.439	1.250	0.160
Nov 16 12:41:02	-0.010	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.438	1.267	0.168
Nov 16 12:41:03	-0.010	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.443	1.256	0.171
Nov 16 12:41:04	-0.010	-0.008	0.763	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.439	1.266	0.162
Nov 16 12:41:05	-0.010	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.435	1.274	0.167
Nov 16 12:41:06	-0.010	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.271	0.168
Nov 16 12:41:07	-0.010	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.449	1.263	0.169
Nov 16 12:41:08	-0.010	-0.008	0.772	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.445	1.265	0.171
Nov 16 12:41:09	-0.010	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.446	1.254	0.166
Nov 16 12:41:10	-0.010	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.442	1.257	0.171
Nov 16 12:41:11	-0.010	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.439	1.252	0.175
Nov 16 12:41:12	-0.010	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.441	1.245	0.175
Nov 16 12:41:13	-0.010	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.446	1.252	0.167
Nov 16 12:41:14	-0.010	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.250	0.168
Nov 16 12:41:15	-0.010	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.442	1.247	0.166
Nov 16 12:41:16	-0.010	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.436	1.256	0.159
Nov 16 12:41:17	-0.010	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.443	1.257	0.166
Nov 16 12:41:18	-0.010	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.445	1.267	0.171
Nov 16 12:41:19	-0.010	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.442	1.265	0.166
Nov 16 12:41:20	0.685	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.438	1.267	0.172
Nov 16 12:41:21	1.165	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.445	1.271	0.168
Nov 16 12:41:22	2.394	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.440	1.271	0.159
Nov 16 12:41:23	2.485	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.442	1.265	0.168
Nov 16 12:41:24	2.505	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.441	1.260	0.164
Nov 16 12:41:25	2.528	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.263	0.167
Nov 16 12:41:26	2.569	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.449	1.254	0.159
Nov 16 12:41:27	-0.008	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.440	1.265	0.173
Nov 16 12:41:28	-0.008	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.441	1.250	0.171
Nov 16 12:41:29	-0.009	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.448	1.258	0.168

Nov 16 12:41:30	0.035	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.443	1.252	0.176
Nov 16 12:41:31	2.575	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.444	1.257	0.164
Nov 16 12:41:32	2.577	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.445	1.254	0.163
Nov 16 12:41:33	2.585	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.446	1.258	0.159
Nov 16 12:41:34	2.601	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.447	1.267	0.166
Nov 16 12:41:35	-0.008	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.449	1.275	0.162
Nov 16 12:41:36	-0.008	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.443	1.271	0.166
Nov 16 12:41:37	-0.009	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.451	1.271	0.173
Nov 16 12:41:38	-0.009	-0.008	0.776	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.448	1.264	0.166
Nov 16 12:41:39	-0.009	-0.008	0.773	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.443	1.279	0.164
Nov 16 12:41:40	-0.003	-0.008	0.774	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.450	1.262	0.164
Nov 16 12:41:41	1.229	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.449	1.278	0.164
Nov 16 12:41:42	2.589	-0.008	0.770	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.445	1.276	0.168
Nov 16 12:41:43	2.603	-0.008	0.771	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.453	1.274	0.166
Nov 16 12:41:44	2.613	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.443	1.262	0.160
Nov 16 12:41:45	2.625	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.447	1.261	0.173
Nov 16 12:41:46	2.636	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.450	1.257	0.167
Nov 16 12:41:47	2.647	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.441	1.263	0.169
Nov 16 12:41:48	2.657	-0.008	0.763	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.450	1.262	0.173
Nov 16 12:41:49	2.664	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.447	1.241	0.162
Nov 16 12:41:50	2.673	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.441	1.258	0.163
Nov 16 12:41:51	2.640	-0.008	0.763	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.441	1.243	0.172
Nov 16 12:41:52	2.662	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.443	1.257	0.164
Nov 16 12:41:53	2.671	-0.008	0.760	-0.023	-0.027	-0.053	-0.016	-0.024	0.444	1.256	0.166
Nov 16 12:41:54	2.682	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.447	1.259	0.164
Nov 16 12:41:55	-0.007	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.440	1.266	0.168
Nov 16 12:41:56	-0.007	-0.008	0.766	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.444	1.272	0.171
Nov 16 12:41:57	-0.007	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.447	1.270	0.175
Nov 16 12:41:58	-0.007	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.441	1.268	0.167
Nov 16 12:41:59	-0.008	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.054	-0.016	-0.024	0.441	1.272	0.166
Nov 16 12:42:00	-0.008	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.440	1.264	0.166
Nov 16 12:42:01	-0.009	-0.008	0.760	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.440	1.256	0.167
Nov 16 12:42:02	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.440	1.257	0.169
Nov 16 12:42:03	-0.009	-0.008	0.767	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.444	1.252	0.166
Nov 16 12:42:04	-0.009	-0.009	0.767	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.438	1.253	0.175
Nov 16 12:42:05	-0.009	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.438	1.243	0.169
Nov 16 12:42:06	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.435	1.232	0.164
Nov 16 12:42:07	-0.009	-0.008	0.752	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.436	1.256	0.171
Nov 16 12:42:08	-0.009	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.430	1.250	0.171
Nov 16 12:42:09	-0.009	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.435	1.246	0.159
Nov 16 12:42:10	-0.010	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.441	1.247	0.177
Nov 16 12:42:11	-0.009	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.434	1.257	0.173
Nov 16 12:42:12	-0.009	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.435	1.253	0.175
Nov 16 12:42:13	-0.009	-0.008	0.752	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.432	1.252	0.167
Nov 16 12:42:14	-0.009	-0.008	0.752	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.434	1.249	0.164
Nov 16 12:42:15	-0.009	-0.008	0.753	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.438	1.249	0.172
Nov 16 12:42:16	-0.009	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.431	1.247	0.177
Nov 16 12:42:17	-0.009	-0.008	0.756	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.430	1.249	0.173
Nov 16 12:42:18	-0.009	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.427	1.244	0.153
Nov 16 12:42:19	-0.009	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.435	1.237	0.166
Nov 16 12:42:20	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.429	1.241	0.164
Nov 16 12:42:21	-0.009	-0.008	0.754	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.427	1.239	0.162
Nov 16 12:42:22	-0.009	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.057	-0.016	-0.024	0.428	1.248	0.162
Nov 16 12:42:23	-0.009	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.056	-0.016	-0.024	0.427	1.246	0.159
Nov 16 12:42:24	-0.009	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.425	1.238	0.167
Nov 16 12:42:25	-0.009	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.423	1.251	0.166
Nov 16 12:42:26	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.427	1.257	0.159
Nov 16 12:42:27	-0.009	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.427	1.255	0.168
Nov 16 12:42:28	-0.009	-0.008	0.753	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.424	1.258	0.154
Nov 16 12:42:29	-0.009	-0.008	0.754	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.429	1.247	0.163
Nov 16 12:42:30	-0.009	-0.008	0.749	-0.023	-0.027	-0.053	-0.016	-0.024	0.420	1.236	0.164
Nov 16 12:42:31	-0.009	-0.008	0.751	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.432	1.242	0.164
Nov 16 12:42:32	-0.009	-0.008	0.756	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.424	1.241	0.171
Nov 16 12:42:33	-0.009	-0.008	0.751	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.429	1.230	0.172
Nov 16 12:42:34	-0.009	-0.008	0.751	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.422	1.232	0.171
Nov 16 12:42:35	-0.009	-0.008	0.750	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.025	0.428	1.224	0.169

Nov 16 12:42:36	-0.009	-0.008	0.756	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.421	1.237	0.166
Nov 16 12:42:37	-0.009	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.428	1.228	0.173
Nov 16 12:42:38	-0.009	-0.008	0.753	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.422	1.237	0.169
Nov 16 12:42:39	-0.009	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.428	1.248	0.169
Nov 16 12:42:40	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.426	1.243	0.171
Nov 16 12:42:41	-0.009	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.426	1.246	0.163
Nov 16 12:42:42	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.424	1.242	0.169
Nov 16 12:42:43	-0.009	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.054	-0.016	-0.024	0.428	1.241	0.164
Nov 16 12:42:44	-0.009	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.427	1.243	0.181
Nov 16 12:42:45	-0.009	-0.008	0.754	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.424	1.243	0.171
Nov 16 12:42:46	-0.009	-0.008	0.751	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.420	1.237	0.173
Nov 16 12:42:47	-0.009	-0.008	0.749	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.420	1.235	0.171
Nov 16 12:42:48	-0.009	-0.008	0.753	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.424	1.235	0.160
Nov 16 12:42:49	-0.009	-0.008	0.756	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.425	1.227	0.168
Nov 16 12:42:50	-0.009	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.421	1.233	0.169
Nov 16 12:42:51	-0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.422	1.237	0.162
Nov 16 12:42:52	-0.009	-0.008	0.753	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.429	1.238	0.173
Nov 16 12:42:53	-0.009	-0.009	0.756	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.420	1.250	0.171
Nov 16 12:42:54	-0.009	-0.008	0.750	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.432	1.248	0.167
Nov 16 12:42:55	-0.008	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.430	1.240	0.173
Nov 16 12:42:56	0.044	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.429	1.250	0.163
Nov 16 12:42:57	0.008	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.432	1.254	0.167
Nov 16 12:42:58	0.008	-0.008	0.756	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.433	1.251	0.173
Nov 16 12:42:59	0.008	-0.008	0.760	-0.023	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.424	1.255	0.167
Nov 16 12:43:00	0.009	-0.008	0.757	-0.023	-0.027	-0.053	-0.016	-0.024	0.430	1.254	0.166
Nov 16 12:43:01	0.010	-0.008	0.760	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.025	0.436	1.256	0.168
Nov 16 12:43:02	0.011	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.440	1.248	0.160
Nov 16 12:43:03	0.011	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.437	1.254	0.166
Nov 16 12:43:04	0.011	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.433	1.246	0.169
Nov 16 12:43:05	0.012	-0.008	0.753	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.437	1.239	0.173
Nov 16 12:43:06	0.012	-0.008	0.753	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.433	1.245	0.162
Nov 16 12:43:07	0.012	-0.008	0.752	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.439	1.246	0.163
Nov 16 12:43:08	0.013	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.443	1.250	0.168
Nov 16 12:43:09	0.013	-0.008	0.757	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.440	1.257	0.171
Nov 16 12:43:10	0.013	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.445	1.263	0.166
Nov 16 12:43:11	0.012	-0.008	0.758	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.440	1.265	0.172
Nov 16 12:43:12	0.011	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.443	1.266	0.167
Nov 16 12:43:13	0.011	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.444	1.262	0.171
Nov 16 12:43:14	0.011	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.442	1.264	0.164
Nov 16 12:43:15	0.011	-0.008	0.760	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.438	1.257	0.169
Nov 16 12:43:16	0.011	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.438	1.260	0.172
Nov 16 12:43:17	0.011	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.053	-0.016	-0.024	0.444	1.256	0.172
Nov 16 12:43:18	0.011	-0.008	0.764	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.435	1.270	0.168
Nov 16 12:43:19	0.010	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.446	1.262	0.167
Nov 16 12:43:20	0.009	-0.008	0.761	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.439	1.258	0.175
Nov 16 12:43:21	0.004	-0.008	0.755	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.437	1.261	0.172
Nov 16 12:43:22	-0.004	-0.008	0.760	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.435	1.263	0.162
Nov 16 12:43:23	-0.008	-0.008	0.759	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.437	1.263	0.173
Nov 16 12:43:24	-0.009	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.052	-0.016	-0.024	0.435	1.257	0.175
Nov 16 12:43:25	-0.008	-0.008	0.769	-0.024	-0.027	-0.043	-0.016	-0.024	0.445	1.259	0.172
Nov 16 12:43:26	-0.064	-0.008	0.764	-0.024	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.447	1.244	0.166
Nov 16 12:43:27	-0.072	-0.008	0.770	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.438	1.250	0.166
Nov 16 12:43:28	-0.077	-0.008	0.768	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.445	1.255	0.163
Nov 16 12:43:29	-0.074	-0.008	0.762	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.444	1.255	0.169
Nov 16 12:43:30	-0.074	-0.008	0.768	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.440	1.256	0.166
Nov 16 12:43:31	-0.074	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.447	1.267	0.169
Nov 16 12:43:32	-0.076	-0.008	0.764	-0.023	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.447	1.273	0.171
Nov 16 12:43:33	-0.073	-0.008	0.768	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.441	1.275	0.171
Nov 16 12:43:34	-0.073	-0.008	0.763	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.445	1.269	0.166
Nov 16 12:43:35	-0.074	-0.008	0.767	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.449	1.269	0.164
Nov 16 12:43:36	-0.075	-0.008	0.768	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.024	0.447	1.268	0.166
Nov 16 12:43:37	-0.079	-0.008	0.766	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.447	1.269	0.166
Nov 16 12:43:38	-0.075	-0.008	0.767	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.025	0.448	1.257	0.169
Nov 16 12:43:39	-0.075	-0.008	0.765	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.447	1.267	0.175
Nov 16 12:43:40	-0.512	-0.008	0.764	-0.024	-0.027	-0.049	-0.017	-0.024	0.453	1.261	0.169
Nov 16 12:43:41	-0.516	-0.008	0.766	-0.024	-0.027	-0.046	-0.016	-0.024	0.449	1.264	0.171

Nov 16 12:43:42	-0.515	-0.008	0.764	-0.024	-0.026	-0.050	-0.016	-0.025	0.445	1.264	0.167
Nov 16 12:43:43	-0.516	-0.008	0.769	-0.024	-0.027	-0.047	-0.016	-0.024	0.448	1.258	0.173
Nov 16 12:43:44	-0.516	-0.008	0.763	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.452	1.254	0.166
Nov 16 12:43:45	-0.516	-0.008	0.766	-0.024	-0.026	-0.051	-0.016	-0.024	0.449	1.260	0.158
Nov 16 12:43:46	-0.516	-0.008	0.766	-0.024	-0.026	-0.049	-0.016	-0.024	0.456	1.271	0.168
Nov 16 12:43:47	-0.516	-0.008	0.765	-0.023	-0.027	-0.049	-0.016	-0.025	0.443	1.266	0.162
Nov 16 12:43:48	-0.516	-0.008	0.762	-0.024	-0.026	-0.048	-0.016	-0.024	0.448	1.273	0.168
Nov 16 12:43:49	-0.516	-0.008	0.764	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.025	0.452	1.265	0.177
Nov 16 12:43:50	-0.516	-0.008	0.764	-0.024	-0.026	-0.049	-0.016	-0.025	0.450	1.268	0.175
Nov 16 12:43:51	-0.516	-0.008	0.755	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.024	0.447	1.262	0.163
Nov 16 12:43:52	-0.516	-0.008	0.756	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.025	0.441	1.264	0.168
Nov 16 12:43:53	-0.516	-0.008	0.756	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.025	0.448	1.263	0.169
Nov 16 12:43:54	-0.516	-0.008	0.757	-0.024	-0.027	-0.048	-0.016	-0.025	0.446	1.257	0.164
Nov 16 12:43:55	-0.516	-0.008	0.759	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.024	0.445	1.251	0.169
Nov 16 12:43:56	-0.516	-0.008	0.761	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.025	0.446	1.247	0.163
Nov 16 12:43:57	-0.516	-0.008	0.763	-0.024	-0.027	-0.048	-0.016	-0.024	0.448	1.257	0.169
Nov 16 12:43:58	-0.516	-0.008	0.761	-0.024	-0.027	-0.048	-0.016	-0.025	0.445	1.251	0.172
Nov 16 12:43:59	-0.516	-0.008	0.768	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.025	0.448	1.256	0.169
Nov 16 12:44:00	-0.516	-0.008	0.765	-0.024	-0.027	-0.051	-0.016	-0.025	0.447	1.254	0.172
Nov 16 12:44:01	-0.516	-0.008	0.764	-0.024	-0.027	-0.050	-0.017	-0.024	0.451	1.271	0.159
Nov 16 12:44:02	-0.516	-0.008	0.766	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.025	0.445	1.265	0.167
Nov 16 12:44:03	-0.516	-0.008	0.759	-0.024	-0.027	-0.049	-0.016	-0.025	0.445	1.274	0.162
Nov 16 12:44:04	-0.516	-0.008	0.769	-0.024	-0.027	-0.050	-0.016	-0.025	0.447	1.264	0.173
Nov 16 12:44:05	-0.516	-0.008	0.763	-0.024	-0.027	-0.048	-0.016	-0.025	0.443	1.272	0.162

Приложение Р

Методика проведения совместных экспериментальных исследований по абразивному износу трубопроводов и определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов

Первый этап выполнения работ и реконструкции установки

1. **Основание для проведения исследований:** Индо-российский проект «Выполнение совместных научных исследований по абразивному износу трубопроводов пневмотранспортных установок и определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов в Центре промышленной трибологии, динамики машин и инженерного обеспечения технического обслуживания Индийского института технологий».
2. **Цель исследований:** получение экспериментальных данных по абразивному износу трубопроводов установок напорного пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов.
3. **Измеряемые и определяемые исходные параметры:** расход воздуха, расход кварцевого песка, фракционный и химико-минералогический составы кварцевого песка, давление аэросмеси в пылепроводе, температура аэросмеси в пылепроводе, диаметр и толщина стенок трубопровода, материал прямых и криволинейных участков трубопровода (марка стали, твердость стали HB, HV или HR), относительный радиус колен поворотов трубопроводов (R/D).
4. **Краткое описание реконструированной экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов Индийского института технологий, Дели.** Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке Р.1. Схема установки роторного питателя, расходного и приемного бункеров представлена на рисунке Р.2. Схема пылепровода от смешительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер представлена на рисунке Р.3. Схема узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку представлена на рисунке Р.4. Перечень и основные

характеристики технологического оборудования экспериментальной установки представлены в таблицах Р.1, Р.2. Перечень и основные характеристики приборов и средств измерений и протоколирования параметров представлены в таблице Р.3.

5. Измерение и регулирование параметров пневмотранспортной установки.

- *Регулирование и контроль расхода воздуха перед роторным питателем.* Регулирование расхода воздуха осуществляется с помощью узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку 12. Расход воздуха измеряется расходомером 15. Показания расходомера после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 20 передаются на компьютер 21.

- *Регулирование расхода и контроль давления воздуха перед роторным питателем.* Регулирование давления воздуха осуществляется с помощью узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку 12. Давление сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха контролируется стрелочным манометром 14. Давление сжатого воздуха после узла регулирования контролируется датчиком давления 16, показания которого передаются через АЦП 20 на компьютер 21.

- *Расход кварцевого песка.* Подача кварцевого песка из расходного бункера 1 в смесительную камеру 4 обеспечивается и регулируется роторным питателем с частотно-регулируемым приводом 3. Необходимый расход кварцевого песка обеспечивается путем установки соответствующего числа оборотов роторного питателя. До начала проведения исследований снимаются расходные характеристики роторного питателя при различных оборотах привода и давлении сжатого воздуха. При этом давление сжатого воздуха перед роторным питателем не должно превышать 2 кг/см^2 .

- *Фракционный состав кварцевого песка.* Анализ фракционного состава кварцевого песка выполняют сотрудники ИИТД методом ситового анализа пробы массой 200 грамм. Максимальный размер сита устанавливается из расчета того, что на сите следующего большего размера остается не более 1 % материала

пробы. В случае превышения остатка на сите, эта часть пробы просеивается на сите следующего большего размера. Минимальный размер ячейки сита 43 мкм. В случае наличия частиц менее 43 мкм массой более 10 % пробы донный остаток песка просеивочной машины подвергается исследованию на лазерном анализаторе.

- *Химико-минералогический состав кварцевого песка.* Анализ химико-минералогического состава выполняет ИИТД.
- *Давление аэросмеси и чистого воздуха в пылепроводе.* Давление аэросмеси и чистого воздуха в пылепроводе измеряется датчиками давления 18 в количестве 8 штук, сигналы от которых передаются через АЦП 20 на компьютер 21.
- *Температура аэросмеси и чистого сжатого воздуха в пылепроводе.* Температура аэросмеси и чистого сжатого воздуха в пылепроводе измеряется переносным лазерным прибором измерения температуры 17 типа Quicktemp 860-T3 и фиксируется в отдельном протоколе.
- *Диаметр и толщина стенок трубопровода.* Диаметр и толщина стенок трубопровода и колен поворотов измеряются штангенциркулем.
- *Материал прямых и криволинейных участков трубопровода.* Характеристики материала участков трубопровода (марку и стали твердость по Виккерсу) представляют сотрудники ИИТД.
- *Относительный радиус колен поворотов трубопроводов (R/D).* Относительный радиус колен поворотов определяется путем замера в лаборатории.

6. **Включение информационно-измерительной системы (ИИС).** Включается ИИС в составе:

- Датчика давления сжатого воздуха до узла регулирования подачи чистого воздуха 14;
- Прибора контроля давления сжатого воздуха после узла регулирования подачи чистого воздуха 16;
- восьми датчиков давления пылевоздушных потоков в пылепроводе 181 - 188;
- аналого-цифрового преобразователя 20;

- компьютера 21.

Кроме того, проверяются:

- включение импульсной линии к стрелочному манометру 141;
- подача электропитания на тензодатчики и подключение вторичного прибора
- вольтметра к коммутационному блоку от комплекта тензодатчиков 19;
- проверка функционирования лазерного термометра 17 путем включения и измерения температуры стенки помещения рядом со стеклянным лабораторным термометром.

7. Определение сопротивления пылепровода при движении чистого воздуха. До начала проведения экспериментальных исследований определяется сопротивление пылепровода 5 при движении чистого воздуха до и после шлифовки. Шлифовка пылепровода будет происходить при определении расходной характеристики роторного питателя 3.

8. Определение расходной характеристики роторного питателя. Алгоритм определения расходной характеристики роторного питателя 3:

- Установка и фиксация максимального расхода чистого воздуха при давлении 2 кг/см^2 или ниже.
- Установка числа оборотов роторного питателя без нагрузки 5 об/мин (33 % шкалы стрелочного прибора блока управления частотно-регулируемого привода ЧРП) при закрытой пластинчатой задвижке 2 между расходным бункером 1 и роторным питателем 3.
- Проверка на закрытие поворотных шиберов 7 и 8 между расходным 1 и приемным 6 бункерами.
- Открытие полностью пластинчатой задвижки 2.
- Наблюдение за давлением сжатого воздуха после узла регулирования подачи сжатого воздуха (перед роторным питателем). Фиксируется время установления постоянного давления перед роторным питателем и снимается расходная характеристика роторного питателя при данном числе оборотов. При этом ведется наблюдение за изменением массы песка в приемном бункере. Минимальное

время для снятия характеристики при данном числе оборотов роторного питателя составляет 5 минут.

- Если в расходном бункере осталось не менее половины загруженного песка, то устанавливается следующее число оборотов равное 10 (66 % прибора ЧРП). Последовательность операций аналогична изложенным в этом пункте выше.
- Если в расходном бункере осталось менее половины загруженного песка, то:
 - полностью закрывается пластинчатая задвижка 2;
 - останавливается питатель 3;
 - открываются поворотные шиберы 7 и 8 и сбрасывается весь песок из приемного бункера 6 в расходный бункер 1;
 - закрываются поворотные шиберы 7 и 8;
 - устанавливается следующее число оборотов равное 15 (100 % ЧРП) и включается питатель без нагрузки;
 - полностью открывается пластинчатая задвижка и выполняются все действия, описанные в п.8.5.
- В случае длительного превышения давления сжатого воздуха перед роторным питателем более 2 кг/см² экстренно выполняются следующие действия:
 - полностью закрывается пластинчатая задвижка 2;
 - останавливается питатель;
 - уменьшается расход воздуха через роторный питатель на 30 %;
 - продувается пылепровод до давления по чистому воздуху;
 - повторяются операции, описанные в п.8.2 – 8.6.
- После снятия характеристики с расходом воздуха, равным 70 % от максимального, расход воздуха уменьшается еще на 30 % и повторяются все операции, описанные п.8.2 – 8.7.
- Общие указания:
 - при автоматическом снятии параметров стабильных потоков на компьютере необходимо также измерять температуру пылепровода в местах установки датчиков давления;

- постоянно ведутся наблюдения за отсутствием свищей в коленах поворотов. Особое внимание следует уделять последним поворотам на экспериментальной части пылепровода.
- В случае появления свища в колена поворота пылепровода выполняются следующие действия:
 - полностью закрывается пластинчатая задвижка 2;
 - останавливается питатель;
 - продувается пылепровод до давления по чистому воздуху;
 - демонтируется колено со свищем и устанавливается новое колено;
 - завершается снятие расходной характеристики питателя.

9. Исследование абразивного износа пылепровода

- Максимальные расходы воздуха и сыпучего материала
- Устанавливаются максимальный расход воздуха и максимальное число оборотов питателя, при котором не образуется завал трубопровода;
 - полностью открывается пластинчатая задвижка 2;
 - открываются поворотные шиберы 7 и 8;
 - ведется наблюдение за давлением перед роторным питателем;
 - если давление перед роторным питателем будет меньше, чем при определении его расходной характеристики, то нужно установить то наибольшее число оборотов роторного питателя, при котором давление будет максимально разрешенным;
- исследования заканчиваются после образования свищей в трех коленах поворотов трубопроводов.
- Минимальные расходы воздуха и сыпучего материала
 - устанавливается минимальный расход воздуха и минимальное число оборотов питателя в соответствии с расходной характеристикой роторного питателя, при которых наблюдается устойчивый режим пневмотранспортирования;
 - полностью открывается пластинчатая задвижка 2;
 - открываются поворотные шиберы 7 и 8;
 - ведется наблюдение за давлением перед роторным питателем;

- исследования заканчиваются после образования свищей в трех коленах поворотов трубопроводов.
- Средние расходы воздуха и сыпучего материала;
- Устанавливаются среднеарифметические расходы воздуха и число оборотов роторного питателя;
- полностью открывается пластинчатая задвижка 2;
- открываются поворотные шиберы 7 и 8;
- ведется наблюдение за давлением перед роторным питателем;
- исследования заканчиваются после образования свищей в трех коленах поворотов трубопроводов.

Примечание: Методика проведения экспериментальных исследований может дополняться и изменяться в процессе их проведения. Все изменения и дополнения должны вноситься в текст Методики. До проведения исследований все участники проведения исследований должны быть ознакомлены с Методикой и иметь при себе ее печатный экземпляр.

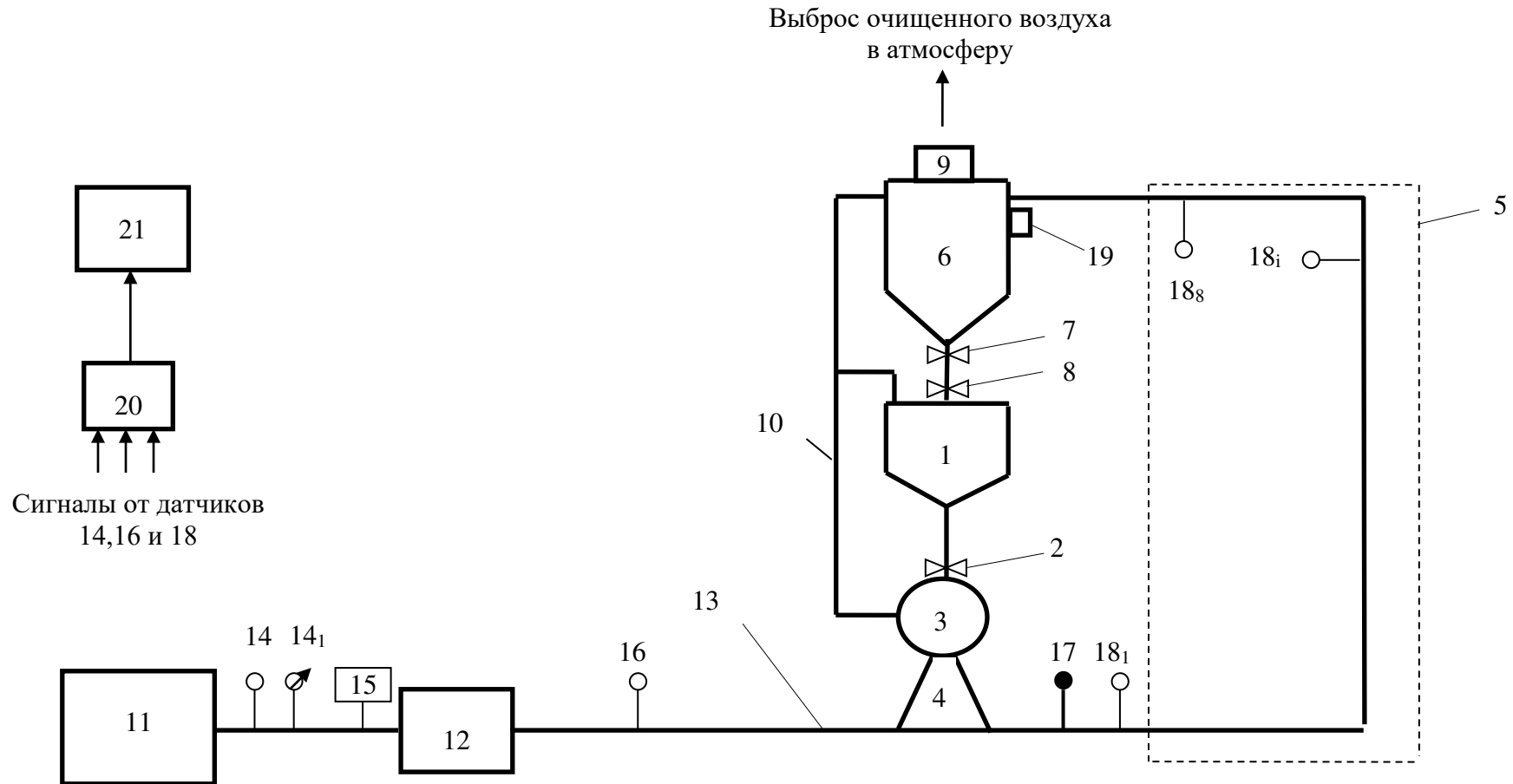


Рисунок Р.1 - Блок-схема экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов ИИТ Дели после первого этапа реконструкции: 1 - расходный бункер; 2 - пластинчатая задвижка; 3 - роторный питатель; 4 - смесительная камера роторного питателя; 5 - экспериментальная часть пылепровода; 6 - приемный бункер; 7, 8 - поворотные шиберы; 9 - фильтр очистки запыленного воздуха; 10 - трубопровод сброса воздуха протечек через роторный питатель; 11 - компрессор; 12 - узел регулирования подачи сжатого воздуха; 13 - трубопровод сжатого воздуха к роторному питателю; 14 - датчик давления сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха; 14₁ - стрелочный манометр перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха; 15 - расходомер воздуха; 16 - прибор контроля давления сжатого воздуха после узла регулирования подачи сжатого воздуха; 17 - переносной лазерный датчик температуры потоков воздуха и аэросмеси в трубопроводах сжатого воздуха и в пылепроводе; 18 - датчики давления аэросмеси в пылепроводе (№№1 - 8); 19 - комплект тензометрических датчиков из 3 штук; 20 - аналогово-цифровой преобразователь сигналов от датчиков; 21 - компьютер.

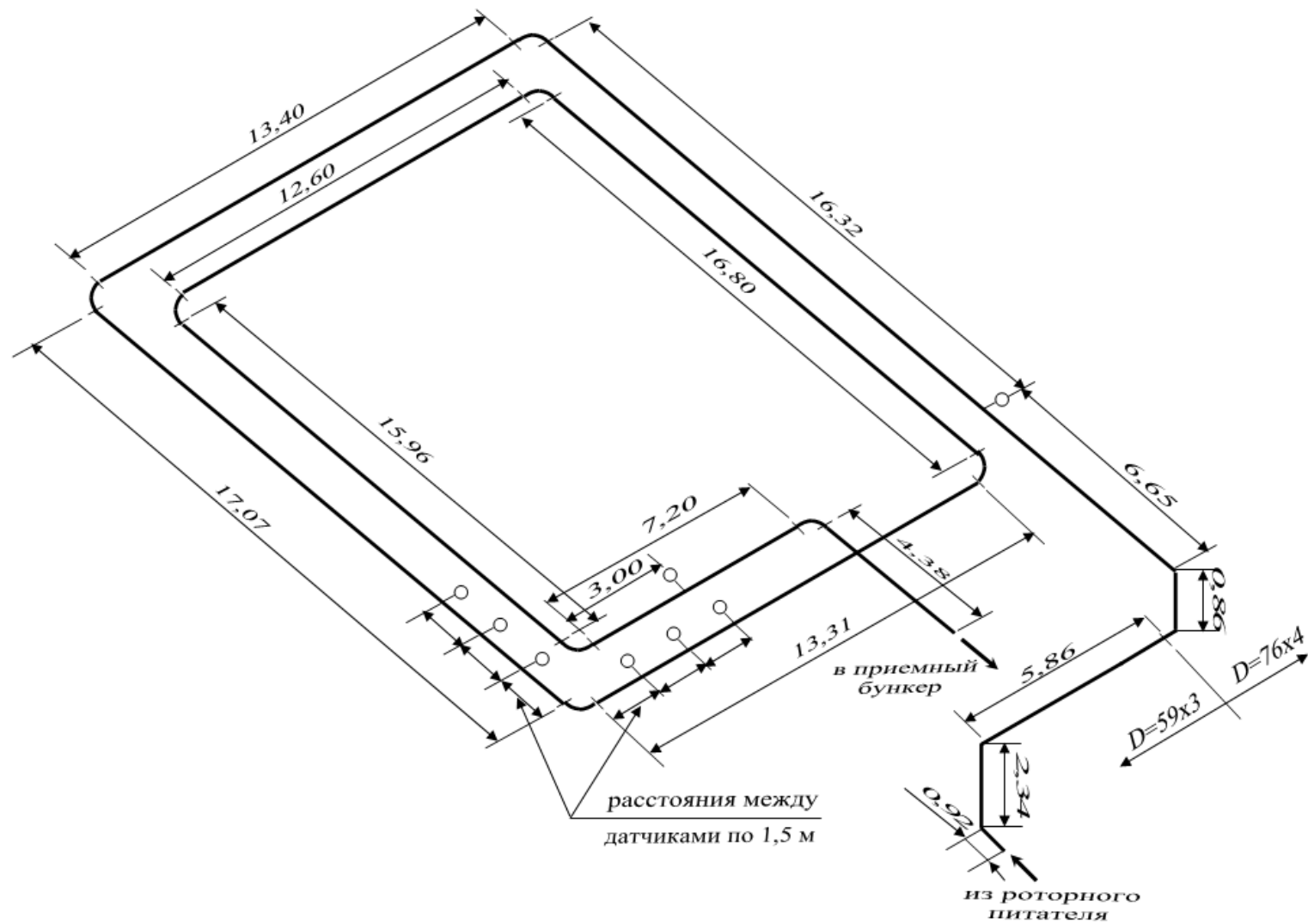


Рисунок Р.3 - Схема пылепровода от смесительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер

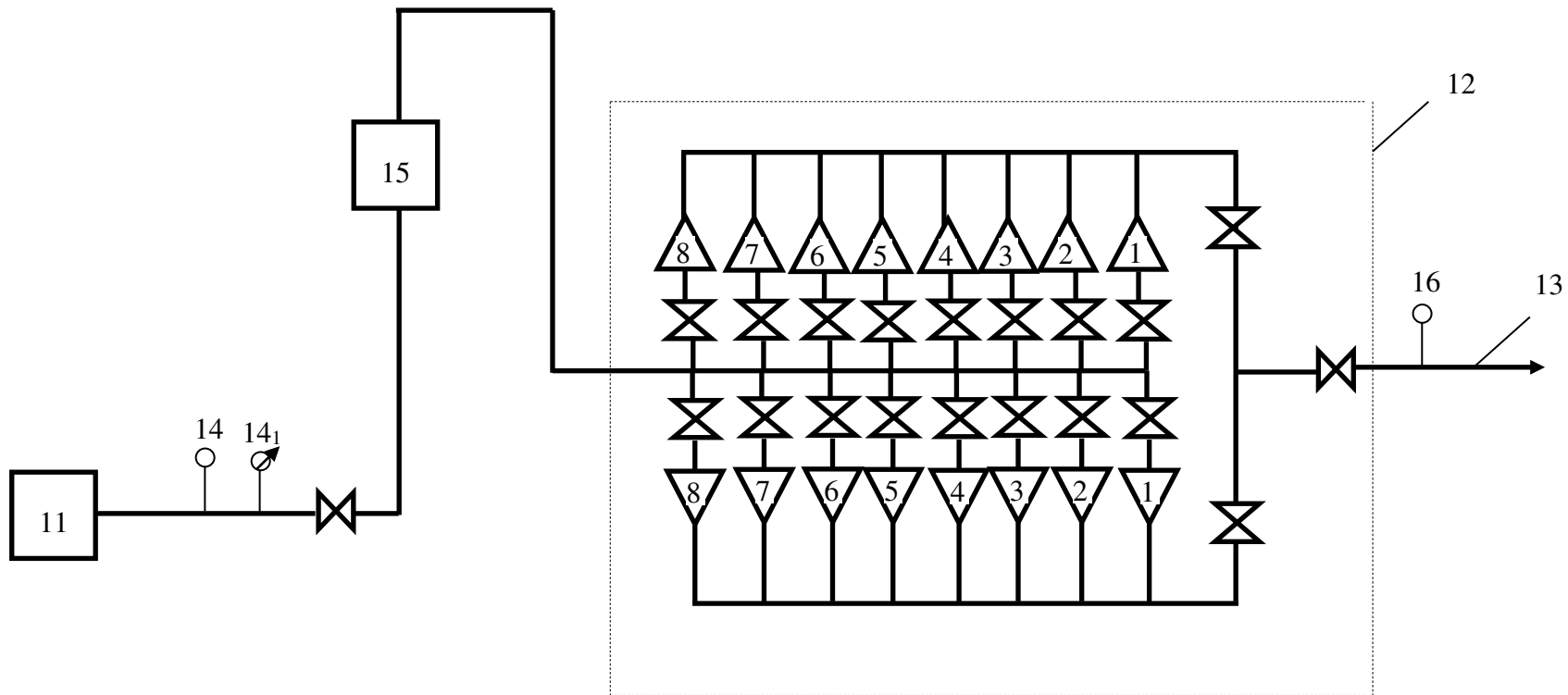


Рисунок Р.4 - Схема узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку: 11 - компрессор; 12 - узел регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку, где 1 - 8 - калиброванные сопла; 13 - трубопровод сжатого воздуха к роторному питателю; 14 - датчик давления сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха; 14₁ - стрелочный манометр перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха; 15 - расходомер воздуха; 16 - прибор контроля давления сжатого воздуха после узла регулирования подачи сжатого воздуха.

Таблица Р.1 - Технологическое оборудование экспериментальной установки

№ на схеме	Наименование оборудования	Назначение	Технические характеристики (марка, производительность, диапазон регулирования, погрешность регулирования, ограничения по применению и др.)
1.	Расходный бункер	Бункер для подачи материала в роторный питатель	Сварной бункер из листовой стали толщиной 4 мм. Вместимость бункера – 0,625 м ³
2.	Пластинчатая задвижка	Регулирование или перекрытие подачи сыпучих материалов	Пластинчатая задвижка с ручным винтовым приводом. Тип задвижки: VGH 150. D _y = 150 мм
3.	Роторный питатель	Регулируемая подача сыпучего материала в пылепровод	Тип питателя: ZVN 200 1-4-SS. Максимальное рабочее давление: 3,5 кг/см ² . Мощность электропривода: 0,55 кВт. $n_{э.д.макс}/n_{р.п.макс} = 1365/25$ об/мин. Способ регулирования числа оборотов роторного питателя: электродвигатель с переменной частотой вращения. Расчетная производительность питателя определяется по формуле: $G_m = V_k * n_k * k_3 * n_{р.п.} * \rho_n$, кг/мин.
4.	Смесительная камера роторного питателя	Образование аэросмеси для транспортирования сыпучих материалов под давлением	Составная часть роторного питателя. Фланцевое присоединение к корпусу роторного узла
5.	Пылепровод	Трубопровод для исследования параметров пылегазовых потоков	Трубопровод Ø = 76×4 мм. Материал трубопровода и поворотов: St37. Схема пылепровода от смесительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер представлена на рис. Р.5.
6.	Приемный бункер	Бункер приема аэросмеси из пылепровода	Сварной бункер из листовой стали толщиной 4 мм. Вместимость бункера – 1 м ³
7.	Поворотный шибер	Регулирование или перекрытие подачи сыпучих материалов из приемного бункера	D _y = 150 мм.
8.	Поворотный шибер	Регулирование или перекрытие подачи сыпучих материалов в расходный бункер	D _y = 150 мм.
9.	Фильтр очистки запыленного воздуха	Очистка сбросного воздуха из приемного бункера от пыли	Тип фильтра: UMA 70V. Площадь фильтрации: 6,23 м ² . Габаритные размеры: 575×575×680 мм. Масса фильтра: 75 кг.
10.	Трубопровод сброса воздуха протечек через роторный питатель	Сброс воздуха протечек через роторный питатель в фильтр очистки запыленного воздуха	Резино-брезентовый шланг с металлокордом, D _{внутр.} = 60 мм
11.	Компрессор	Производство сжатого воздуха	Тип компрессора: роторный, двухступенчатый марки WR600. Производство сжатого воздуха с избыточным (рабочим) давлением до 7 кг/см ² . Минимальное рабочее давление сжатого воздуха: 4,2 кг/см ² . Максимальный расход сжатого воздуха: 14,48 м ³ /мин. Температура сжатого воздуха (паспортная): 80°C.

Продолжение таблицы Р.1

№ на схеме	Наименование оборудования	Назначение	Технические характеристики (марка, производительность, диапазон регулирования, погрешность регулирования, ограничения по применению и др.)
12.	Узел регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку	Ступенчатое регулирование подачи сжатого воздуха в роторный питатель	Схема узла регулирования подачи сжатого воздуха. Сопло №1 (1,180); сопло №2 (1,702); сопло №3 (2,438); сопло №4 (3,454); сопло №5 (4,915); сопло №6 (5,909); сопло №7 (9,804); сопло №8 (13,891). Тарировочная характеристика узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку представлена в табл. Р.2.
13.	Трубопровод сжатого воздуха к роторному питателю	Подача сжатого воздуха к роторному питателю	Трубопровод $\varnothing = 59 \times 3$ мм.

Таблица Р.2 - Тарировочная характеристика узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортные установки

Номер сопла	Массовый расход воздуха при давлении сжатого воздуха на входе в узел регулирования подачи сжатого воздуха в роторный питатель, кг/с										
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
1	0,0005	0,0006	0,0008	0,0009	0,0010	0,0012	0,0013	0,0014	0,0016	0,0017	0,0018
2	0,0011	0,0013	0,0016	0,0019	0,0021	0,0024	0,0027	0,0029	0,0032	0,0035	0,0038
3	0,0022	0,0027	0,0033	0,0038	0,0044	0,0049	0,0055	0,0060	0,0066	0,0071	0,0077
4	0,0044	0,0055	0,0066	0,0077	0,0088	0,0099	0,0110	0,0121	0,0132	0,0143	0,0154
5	0,0089	0,0111	0,0134	0,0156	0,0178	0,0200	0,0223	0,0245	0,0267	0,0290	0,0312
6	0,0176	0,0220	0,0264	0,0308	0,0352	0,0396	0,0400	0,0484	0,0528	0,0572	0,0616
7	0,0354	0,0443	0,0531	0,0620	0,0700	0,0797	0,0886	0,0975	0,1063	0,1152	0,1241
8	0,0711	0,0889	0,1067	0,1245	0,1423	0,1601	0,1779	0,1957	0,2135	0,2313	0,2491

Таблица Р.3 - Приборы и средства измерений и протоколирования параметров

№ на схеме	Наименование средств измерений	Марка, тип	Измеряемый параметр	Единица измерений	Шкала измерений	Диапазон измерений	Погрешность измерений	Ограничения по применению	Примечание
14.	Датчик давления пылегазовых потоков	P15RVA1	Давление сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха	В	$0 \dots 10 \pm 0,2$ В $V_0 = 0,4 \pm 0,3$ В	$0 \dots 10$ кг/см ²	1 %	$P_{\max} = 10$ кг/см ²	Характеристика линейная
14 ₁	Манометр	Стрелочный манометр	Давление сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха	кг/см ²	$0 \dots 14$	$0 \dots 14$	1 %; цена деления 0,2 кг/см ²	$P_{\max} = 14$ кг/см ²	
15.	Расходомер воздуха	F0214	Расход воздуха	фут ³ /мин (м ³ /мин)	$0 \dots 300$ ($0 \dots 8,5$)	$30 \dots 300$ ($0,85 \dots 8,5$)	1 %	$P_{\max} = 5$ кг/см ² ; $Q_{\min} = 0,85$ м ³ /мин	1 фут = 0,3048 м.
16.	Прибор контроля давления сжатого воздуха	PE200-215.15*N1-K-R-0.5-SO-4	Давление сжатого воздуха после узла регулирования подачи сжатого воздуха	мА	$4 \dots 20$	$0 \dots 5$ кг/см ²	1 %	$P_{\max} = 5$ кг/см ²	Характеристика линейная. Аналоговый выход.
17.	Прибор для измерения температуры (переносной)	Quicktemp 860-T3	Температура пылегазовых потоков	°С	$-30 \dots +900$	$-30 \dots +900$	0,1 °С	нет	Лазерный датчик темп-ры
18.	Датчик давления пылегазовых потоков	P15RVA1	Давление пылегазовых потоков в пылепроводе (№№1-10)	В	$0 \dots 10 \pm 0,2$ В $V_0 = 0,4 \pm 0,3$ В	$0 \dots 10$ кг/см ²	1 %	$P_{\max} = 10$ кг/см ²	Характеристика линейная
19.	Комплект тензометрических датчиков из трех штук	Cap 1000	Масса приемного бункера	В	$0 \dots 10$ В	$0 \dots 1$ т	1 %	Нагрузка не более 1 т	Характеристика линейная. Коэф. крутизны хар-ки = 0,8
20.	Аналогово-цифровой преобразователь сигналов		Аналогово-цифровое преобразование сигналов от датчиков 14, 16, 18 с дистанционной передачей сигналов						
21.	Компьютер		Для визуального наблюдения, протоколирования и обработки информации от датчиков с дистанционной передачей сигналов 14, 16 и 18.						
22.	Манометр	Стрелочный манометр	Давление в приемном бункере	кг/см ²	$0 \dots 1$	$0 \dots 1$	1 %; цена деления 0,02 кг/см ²	$P_{\max} = 1,0$ кг/см ²	

Второй этап выполнения работ и реконструкции установки

1. **Основание для проведения исследований:** Индо-российский проект «Выполнение совместных научных исследований по абразивному износу трубопроводов пневмотранспортных установок и определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов в Центре промышленной трибологии, динамики машин и инженерного обеспечения технического обслуживания Индийского института технологий».
2. **Цель исследований:** получение экспериментальных данных по величине критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих кремнесодержащих материалов.
3. **Место проведения экспериментальных исследований:** Центр промышленной трибологии, динамики машин и инженерного обеспечения технического обслуживания Индийского института технологий.
4. **Сроки проведения экспериментальных исследований:** 2 - 21 ноября 2009 г.
5. **Измеряемые и определяемые исходные параметры:** расход воздуха, расход кварцевого песка, фракционный и химико-минералогический составы кварцевого песка, давление аэросмеси в пылепроводе, температура аэросмеси в пылепроводе, диаметр и толщина стенок трубопровода, наличие и толщина подстилающего слоя транспортируемого материала в пылепроводе.
6. **Краткое описание экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов после второго этапа реконструкции.** Блок-схема экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов ИИТ Дели после второго этапа реконструкции существенно не отличается от блок-схемы установки после первого этапа реконструкции, и по этой причине не приводится. Схема установки роторного питателя, расходного и приемного бункеров, также осталась без изменений. На рисунке Р.5 представлена схема ступенчатого трубопровода от смесительной камеры роторного питателя до входа в приемный бункер после второго этапа реконструкции. Наружный диаметр экспериментальных участков пылепровода составляет 2", 2½" и 3". На участках

пылепровода одного диаметра смонтировано по одной стеклянной вставке для визуализации процессов движения пылевоздушных потоков. Кроме того, увеличено количество датчиков давления аэросмеси в пылепроводе до 10 штук и изменены места их врезки в пылепровод.

7. Измерение и регулирование параметров пневмотранспортной установки

- *Регулирование и контроль расхода воздуха перед роторным питателем.* Регулирование расхода воздуха осуществляется с помощью узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку 12. Расход воздуха измеряется расходомером 15. Показания расходомера после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 20 поступают на компьютер 21.

- *Регулирование расхода и контроль давления воздуха перед роторным питателем.* Регулирование давления воздуха осуществляется с помощью узла регулирования подачи сжатого воздуха в пневмотранспортную установку 12. Давление сжатого воздуха перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха визуальное контролируется по стрелочному манометру 14. Давление сжатого воздуха после узла регулирования контролируется датчиком давления 16, показания которого передаются через АЦП 20 на компьютер 21.

- *Расход кварцевого песка.* Подача кварцевого песка из расходного бункера 1 в смесительную камеру 4 обеспечивается и регулируется роторным питателем с частотно-регулируемым приводом 3. Необходимый расход кварцевого песка обеспечивается путем установки соответствующего числа оборотов роторного питателя. До начала проведения исследований снимаются расходные характеристики роторного питателя при различных оборотах привода и давлении сжатого воздуха. При этом рабочее (избыточное) давление сжатого воздуха перед роторным питателем не должно превышать 2 кг/см^2 .

- *Фракционный состав кварцевого песка.* Анализ фракционного состава кварцевого песка выполняют сотрудники ИИТД методом ситового анализа пробы массой 200 грамм. Максимальный размер сита устанавливается из расчета того, что на сите следующего большего размера остается не более 1 % материала про-

бы. В случае превышения остатка на сите, эта часть пробы просеивается на сите следующего большего размера. Минимальный размер ячейки сита 43 мкм. В случае наличия частиц менее 43 мкм массой более 10 % пробы донный остаток песка просеивочной машины подвергается исследованию на лазерном анализаторе.

- *Химико-минералогический состав кварцевого песка.* Сведения о химико-минералогическом составе кварцевого песка представляют сотрудники ИИТ Дели.

- *Давление аэросмеси и чистого воздуха в пылепроводе.* Давление аэросмеси и чистого воздуха в пылепроводе измеряется датчиками давления 18 в количестве 10 штук, сигналы от которых передаются через АЦП 20 на компьютер 21.

- *Температура аэросмеси и чистого сжатого воздуха в пылепроводе.* Температура аэросмеси и чистого сжатого воздуха в пылепроводе измеряется переносным лазерным прибором измерения температуры 17 типа Quicktemp 860-T3 и фиксируется в отдельном протоколе.

- *Диаметр, толщина и материал стенок трубопровода.* Диаметр и толщина стенок трубопровода и колен поворотов измеряются штангенциркулем. Сведения о материале трубопровода и колен поворотов представляют сотрудники ИИТ Дели.

8. Включение информационно-измерительной системы (ИИС) в составе:

- Датчика давления сжатого воздуха до узла регулирования подачи чистого воздуха 14;

- Прибора контроля давления сжатого воздуха после узла регулирования подачи чистого воздуха 16;

- десяти датчиков давления пылевоздушных потоков в пылепроводе 18₁ — 18₁₀;

- аналого-цифрового преобразователя 20;

- компьютера 21.

Кроме того, проверяются:

- включение импульсной линии к стрелочному манометру 14₁;

- подача электропитания на тензодатчики и подключение вторичного прибора
- вольтметра к коммутационному блоку от комплекта тензодатчиков 19;
- проверка функционирования лазерного термометра 17 путем включения и измерения температуры стенки помещения рядом со стеклянным лабораторным термометром.

9. Определение сопротивления пылепровода при движении чистого воздуха. До начала проведения экспериментальных исследований определяется сопротивление пылепровода 5 при движении чистого воздуха до и после шлифовки. Шлифовка пылепровода будет происходить при определении расходной характеристики роторного питателя 3.

10. Определение расходной характеристики роторного питателя. Алгоритм определения расходной характеристики роторного питателя 3.

10.1 Проверка на закрытие:

- пластинчатой задвижки 2 между расходным бункером 1 и роторным питателем 3;
- поворотных шиберов 7 и 8 между расходным бункером 1 и приемным бункером 6.

10.2. Установка и фиксация максимального расхода чистого воздуха при давлении 2 кг/см² или ниже перед роторным питателем.

10.3. Установка числа оборотов роторного питателя без нагрузки 5 об/мин (33 % шкалы стрелочного прибора блока управления частотно-регулируемого привода ЧРП).

10.4. Открытие полностью пластинчатой задвижки 2.

10.5. Визуальное наблюдение за давлением сжатого воздуха по манометру 14₁ перед узлом регулирования подачи сжатого воздуха. Фиксируется время установления постоянного давления перед роторным питателем и снимается расходная характеристика роторного питателя при данном числе оборотов. При этом ведется наблюдение за изменением массы песка в приемном бункере по показаниям тензодатчиков 19. Минимальное время для снятия расходной характеристики при

данном числе оборотов роторного питателя и постоянном давлении в пылепроводе составляет 5 минут.

10.6. Если в расходном бункере осталось не менее половины загруженного песка, то устанавливается следующее число оборотов равное 10 (66 % прибора ЧРП). Последовательность действий аналогична изложенным в пункте 10.5.

Если в расходном бункере осталось менее половины загруженного песка, то:

- полностью закрывается пластинчатая задвижка 2;
- останавливается питатель 3;
- открываются поворотные шиберы 7 и 8 и сбрасывается весь песок из приемного бункера 6 в расходный бункер 1;
- закрываются поворотные шиберы 7 и 8;
- устанавливается следующее число оборотов равное 15 (100 % ЧРП) и включается питатель без нагрузки;
- полностью открывается пластинчатая задвижка 2 и выполняются действия, описанные в п.10.5.

10.7. В случае длительного превышения давления сжатого воздуха перед роторным питателем более 2 кг/см² экстренно выполняются следующие действия:

- полностью закрывается пластинчатая задвижка 2;
- останавливается роторный питатель 3;
- продувается пылепровод 5 до снижения давления на входе в роторный питатель 3 до величины, равной давлению пылепровода при движении чистого воздуха.

10.8. После продувки пылепровода расход воздуха через роторный питатель 3 уменьшается на 30 % и повторяются действия, описанные в п.п. 10.3 — 10.7.

10.9. После снятия характеристики с расходом воздуха, равным 70 % от максимального, расход воздуха уменьшается еще на 30 % и повторяются все операции описанные п.10.3 — 10.7.

10.10. Общие указания

При автоматической фиксации параметров стабильных потоков на компьютере необходимо также измерять температуру пылепровода в местах установки датчиков давления в пылепроводе 18₁, 18₅ и 18₁₀;

Необходимо постоянно вести наблюдения за отсутствием свищей в коленах поворотов. Особое внимание следует уделять последним поворотам на экспериментальной части пылепровода. В случае появления свища в колена поворота пылепровода выполняются следующие действия:

- полностью закрывается пластинчатая задвижка 2;
- останавливается роторный питатель 3;
- продувается пылепровод 5 до давления по чистому воздуху;
- демонтируется колено со свищем и устанавливается новое колено;
- завершается снятие расходной характеристики питателя.

11.Определение критических скоростей пылегазовых потоков и исследование абразивного износа пылепроводов.

11.1. Установить осветительные приборы с внешней стороны трубопроводов напротив прозрачных вставок для лучшей визуализации характера движения пылегазового потока.

11.2. Установить максимальный расход воздуха и число оборотов роторного питателя сыпучего материала равное 5 и произвести следующие действия:

- полностью открыть пластинчатую задвижку 2;
- открыть поворотные шиберы 7 и 8;
- вести наблюдение за давлением перед роторным питателем и отсутствием свищей в коленах поворотов;
- вести наблюдение через прозрачные вставки за характером движения пылевоздушного потока. После стабилизации режима пневмотранспортирования должно наблюдаться равномерное заполнение потоком всего сечения труб на всех участках пылепровода;
- снять показания всех приборов и описать характер движения пылевоздушного потока.

11.3. Увеличить число оборотов роторного питателя на 2:

- вести наблюдение за давлением перед роторным питателем и отсутствием свищей в коленях поворотов;
- вести наблюдение через прозрачные вставки за характером движения пылевоздушного потока. После стабилизации режима пневмотранспортирования должно наблюдаться равномерное заполнение потоком всего сечения труб на всех участках пылепровода;
- снять показания всех приборов и описать характер движения пылевоздушного потока.

11.4. Увеличивая число оборотов роторного питателя каждый раз на 2, повторять действия, описанные в п.п. 11.3. При образовании подстилающего слоя в трубопроводах на участках пылепровода измеряется его высота. При достижении высоты подстилающего слоя более $\frac{3}{4}$ внутреннего диаметра трубопровода подача сыпучего материала прекращается, пылепровод продувается до чистого состояния.

11.5. Устанавливается расход воздуха, равный 75 % от максимального и повторяются действия, описанные в п.п. 11.2 – 11.4.

11.6. Устанавливается расход воздуха, равный 50 % от максимального и повторяются действия, описанные в п.п. 11.2 – 11.4.

11.7. Устанавливается расход воздуха, равный 25 % от максимального и повторяются действия, описанные в п.п. 11.2 – 11.4.

11.8. Общие указания

При выполнении экспериментов необходимо особенно внимательно следить за характером движения пылевоздушных потоков и соответственно регулировать подачу воздуха во избежание завалов трубопровода. Экспериментальные исследования заканчиваются при минимальном расходе транспортирующего воздуха, при котором в трубопроводе наименьшего диаметра устанавливается режим транспортирования материала, близкий к завалу трубы.

В случае образования свища в колене поворота трубопровода производятся следующие действия:

- эксперимент прекращается;

- колено поворота заменяется на новое, а снятое колено поворота маркируется и его марка заносится в журнал наблюдений с комментариями к соответствующему режиму эксперимента;
- восстанавливаются условия прерванного эксперимента, и он продолжается.

Все события во время проведения исследований на экспериментальной установке фиксируются в журнале наблюдений. После завершения экспериментальной части исследований в журнале наблюдений необходимо сделать подробное описание колен поворотов со свищами и условиями их получения.

Примечание: Методика проведения экспериментальных исследований может дополняться и изменяться в процессе их проведения. Все изменения и дополнения должны вноситься в текст Методики. До проведения исследований все участники проведения исследований должны быть ознакомлены с Методикой и иметь при себе ее печатный экземпляр.

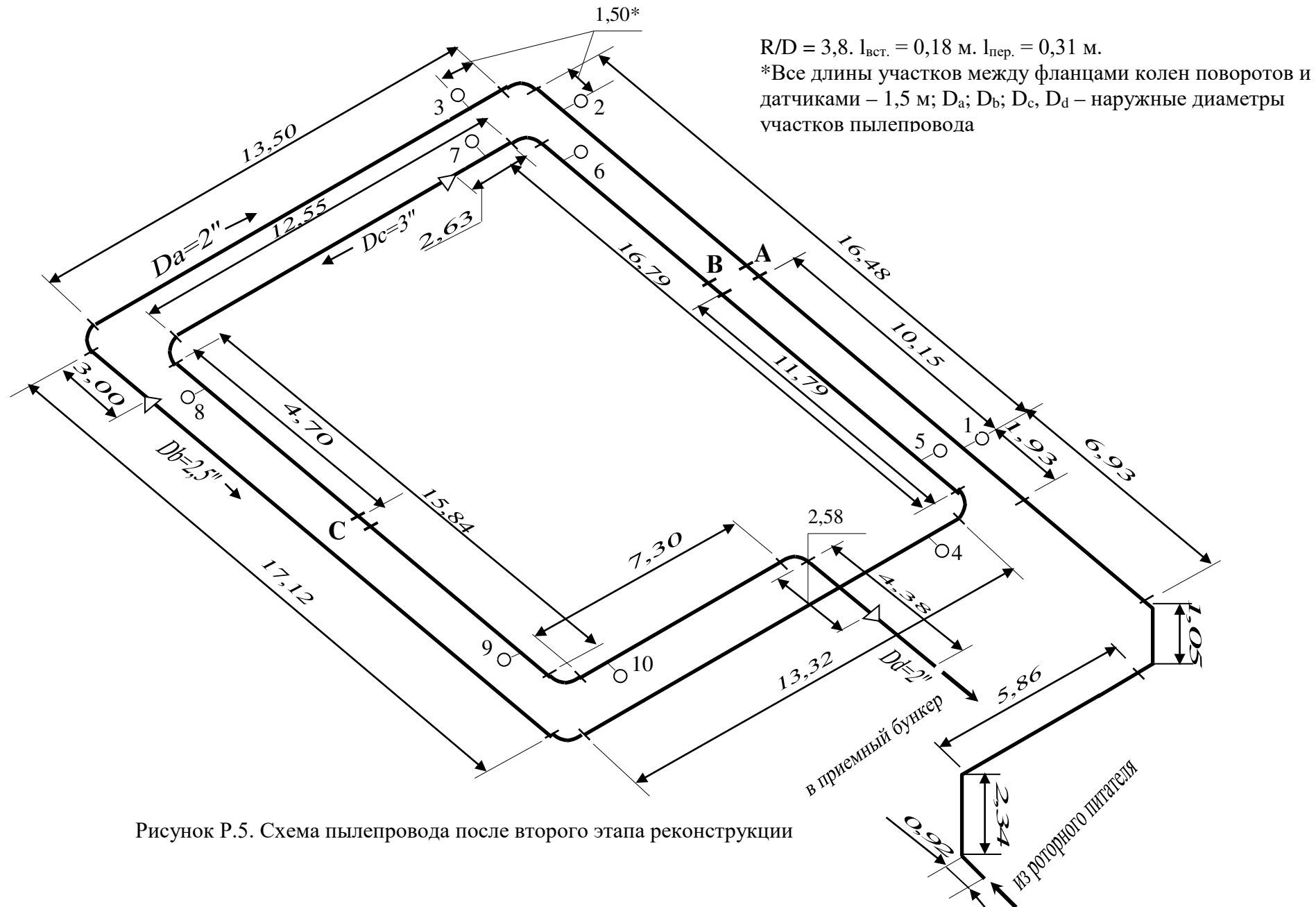


Рисунок Р.5. Схема пылепровода после второго этапа реконструкции