

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург - 2025

Работа выполнена на кафедре тепловых электрических станций федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
Зройчиков Николай Алексеевич

Официальные оппоненты: **Зелинская Елена Валентиновна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический универ-
ситет», профессор кафедры обогащения
полезных ископаемых и охраны окружа-
ющей среды имени С.Б. Леонова;

Ксенофонтов Борис Семенович, доктор
технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Московский государственный тех-
нический университет имени Н.Э. Бау-
мана», профессор кафедры экологии и
промышленной безопасности;

Осинцев Константин Владимирович,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государ-
ственный университет (национальный
исследовательский университет)», г. Че-
лябинск, заведующий кафедрой про-
мышленной теплоэнергетики

Защита диссертации состоится «13» ноября 2025 года в 12-00 ч на за-
седании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620062, г. Ека-
теринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента Рос-
сии Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=7463>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из наиболее масштабных государственных задач, приведенных в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года (далее – Энергетическая стратегия), является уменьшение негативного воздействия объектов ТЭК на окружающую среду, включая угольные ТЭС.

В настоящее время в структуре установленной мощности электростанций электроэнергетической системы России угольные ТЭС составляют 15,1 %. Насчитывается 121 электростанция, в топливном балансе которой есть уголь. В соответствии с Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики к 2042 году планируется ввести в эксплуатацию 11,9 ГВт мощностей угольных ТЭС. В перспективе до 2050 г. уголь останется одним из основных источников энергии как в нашей стране, так и во всем мире. Однако, при эксплуатации угольных ТЭС наряду с выбросами и сбросами загрязняющих веществ образуются золошлаки, основная часть которых складывается на золошлакоотвалах ТЭС, приводя к загрязнению атмосферного воздуха, водоносного горизонта и к ухудшению состава почв в зоне расположения ТЭС. Средний возраст угольных ТЭС, который составляет более 50 лет, оказывает значительное влияние на технико-экономические и экологические показатели систем золошлакоудаления (ЗШУ) ТЭС.

В связи с этим, в настоящее время особое внимание уделяется проблеме обращения с золошлаками ТЭС, что усиливается ужесточением природоохранного законодательства с переходом на принципы наилучших доступных технологий, экологизацией угольной энергетики, исчерпанием емкостей золошлакоотвалов угольных ТЭС и др. Согласно ключевым показателям Энергетической стратегии увеличение доли утилизации золошлаков угольных ТЭС должно составить 40 % к 2030 г. с последующим увеличением до 90 % к 2050 г.

Ежегодно на угольных ТЭС России образуется около 20 млн т золошлаков, а используется менее 20% от этого количества. Основная часть золошлаков текущего выхода транспортируется на золошлакоотвалы системами гидрозолоудаления (ГЗУ). На золошлакоотвалах ТЭС накоплено около 1,7 млрд т золошлаков, и с каждым годом объемы накопления растут. Около 2/3 золошлакоотвалов ТЭС близки к проектному заполнению или уже переполнены. Невысокие показатели утилизации золошлаков ТЭС объясняются отсутствием в России комплексного подхода в решении проблемы обращения с золошлаками ТЭС.

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 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, 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 2050 года.

6. Разработать предложения по комплексному подходу при обращении с золошлаками угольных ТЭС для их максимального использования в производственных 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 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-

МАХ 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 крупность 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, что подтверждается актом ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго».

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). 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, что подтверждается актом от ООО «Энергохимкомплект». 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.

В акте, полученном от ООО «Энергохимкомплект», подтверждается, что результаты диссертационного исследования использованы при проекти-

ровании 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», 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. 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 2050 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», ООО «Интер РАО – Управление электрогенерацией».

Результаты диссертационной работы использованы при разработке раздела «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, что подтверждено почетной грамотой Федерального агентства по недропользованию.

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) (Poland), 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 "Popioly z energetiki", (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 "Popioly z energetiki" (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 “Eurocoalash 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 опубликовано 50 научных работ, включая 21 статью в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 7 статей в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus, Web of Science и Springer Nature; 2 патента, 1 свидетельство о регистрации базы данных; 26 докладов в сборниках трудов международных и всероссийских конференций, форумов, семинаров.

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:

Во введении изложена актуальность диссертационной работы, обозначены цель и задачи научного исследования, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость и обоснована достоверность основных положений, выносимых на защиту. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе и публикациях автора, структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена обзору и анализу современного состояния проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России и за рубежом.

Из анализа текущих и прогнозных данных по потреблению энергоносителей в энергетическом секторе в мировом масштабе следует, что роль угля в глобальном энергетическом балансе в настоящий период и в обозримом будущем остается существенной.

В энергетическом секторе всего мира ежегодно образуется около 1,1 млрд т побочных продуктов сжигания угля, основными из которых являются золошлаки ТЭС.

Существует два альтернативных пути обращения с золошлаками энергетики: использование или размещение на золошлакохранилищах, чаще всего являющихся гидрозолоотвалами.

В США, ЕС и других промышленно развитых странах уровень переработки золошлаков энергетики составляет более 60 %. В России полезное применение золошлаков составляет не более 20 % объема их образования, что обусловлено, прежде всего, применением на электростанциях систем ГЗУ и складирования золошлаков в отвалы в виде золошлаковой смеси. Крупнейшими странами-производителями побочных продуктов сгорания угля являются: Китай, Индия, Европа и США. 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.

Рассмотрен обширный опыт использования летучей золы в различных направлениях экономики США, Индии, Канады, Германии, Франции, Греции, Бельгии, Испании, Нидерландах, Дании, ЮАР, России. Выполнен обзор и анализ технологий переработки золошлаков с целью получения полезных компонентов и продуктов. Проведен обзор и анализ нормативно-технической документации в области обращения с золошлаками ТЭС в России и за рубежом.

В результате проведенного обзора и анализа терминологии, статуса, статистических данных по образованию и утилизации золошлаков в России

и различных странах, технологий, направлений и проектов с использованием золошлаков ТЭС, нормативно-технической базы, а также барьеров, препятствующих повышению уровня утилизации золошлаков в РФ, выявлено, что низкие показатели их использования объясняются отсутствием комплексного подхода в решении проблемы обращения с золошлаками ТЭС.

Во второй главе на основании анализа традиционных и перспективных схем и оборудования систем ЗШУ ТЭС приведены рекомендации по эксплуатации существующих систем ГЗУ ТЭС, а также рекомендации по созданию перспективных надежных, экономичных и экологичных 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.

В результате оценки технических и финансовых показателей существующей системы ЗШУ ТЭЦ-22 выявлено, что концентрация пульпы в системе составляла 1:25 – 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 % продажей 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.

Проблема абразивного износа трубопроводов является актуальной как в системах ГЗУ, так и в системах пневмотранспортирования. Для обеспечения максимальной долговечности трубопроводов необходимо выбирать минимально допустимые скорости транспортирования потока и оптимальные концентрации на наиболее изношенных участках. Для нормальной работы напорного транспортного трубопровода мелкодисперсных материалов необходимо, чтобы скорость движения транспортируемой среды была равна

или несколько превышала критическую. При пневмотранспорте золы оптимальную скорость рекомендуется определять через критическую скорость воздуха.

В результате проведения экспериментальных и аналитических исследований характеристик пневмотранспорта выведена 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:

$$U_{кр} = 0,317 \left(\frac{\rho_m}{\rho_g} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \cdot \frac{k_f}{k_d}, \quad (1)$$

где ρ_m – агрегатная плотность материала, кг/м³, ρ_B – 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_0 – средневзвешенный эквивалентный диаметр частиц материала (средневзвешенная крупность), м, k_f – коэффициент формы, k_d – коэффициент полидисперсности материала.

Произведено сравнение погрешности расчета критических скоростей по формуле (1) и по существующей формуле $U_{кр} = k \sqrt{\frac{(\rho_m - \rho_B)}{\rho_B} g D m}$, в результате чего установлено, что погрешность расчета по предложенной формуле в 4 раза меньше, чем при существующей, и составляет 7,9 %.

Средневзвешенный диаметр предлагается определять по формуле:

$$d_{ср.вз} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot m_i}{100}, \quad (2)$$

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).

По результатам обзора научно-технических источников считая, что усредненная скорость в потоке аэросмеси за исключением случая транспортирования материалов без подстилающего слоя $1,0 \leq U \leq 1,7 \cdot U_{кр}$, определен возможный диапазон изменения оптимальных скоростей для различных мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов при разных условиях транспортирования, который составил от 15 до 35 м/с.

В третьей главе приведены результаты исследований в области надежности пневмотранспортных систем ЗШУ ТЭС, а также разработанный математический аппарат для расчета абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов систем золошлакоудаления.

При пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов абразивный износ является более интенсивным, чем при гидравлическом транспорте золошлаков.

Существующая зависимость для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов имеет вид:

$$\delta_h = \frac{6,13 \cdot 10^{-8} \cdot U^2}{m^{0.4} \cdot D^2}, \quad (3)$$

где U – экспериментальная скорость транспортирования материала, равная 80 м/с; D – внутренний диаметр трубы, м; m – массовая концентрация смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха.

Зависимость (3) разработана на основе экспериментальных исследований характеристик пневмотранспортных установок для частных случаев, не учитывает все значимые факторы, влияющие на абразивный износ.

Разработаны формулы для определения абразивного износа прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов, учитывающие абразивные свойства транспортируемых материалов, износостойкость трубопроводов, влияние критерия аэродинамической легкости K_p , коэффициентов формы k_f и полидисперсности частиц k_d , коэффициента, учитывающего угол атаки k_a , и коэффициента, учитывающего соотношение радиуса поворота к диаметру трубы $k_{R/D}$.

Формулы для определения коэффициентов формы и полидисперсности материалов были выведены на основании проведенных экспериментальных исследований крупности, фракционного состава, формы, удельной поверхности частиц семи проб: зола ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»; зола эстонского сланца электрофилтровая; зола эстонского сланца циклонная; зола Хабаровской ТЭЦ-3; зола Приморской ГРЭС; чистый кремний; микросфера алюмосиликатная. Проведены микрофотографические исследования проб золы и кремния для оценки структуры и формы частиц. Результаты исследований одной из проб золы представлены на рисунках 1-3. На основании данных исследований фракционного состава проб №№1–7 выполнен расчет усредненных коэффициентов формы материалов с использованием зависимости (8), а также полидисперсности материалов, результаты приведены в таблице 1. Средневзвешенная крупность определена на основе измерений фракционного состава материалов. Величины медианных диаметров частиц получены при выполнении экспериментов с помощью анализатора Kamika.

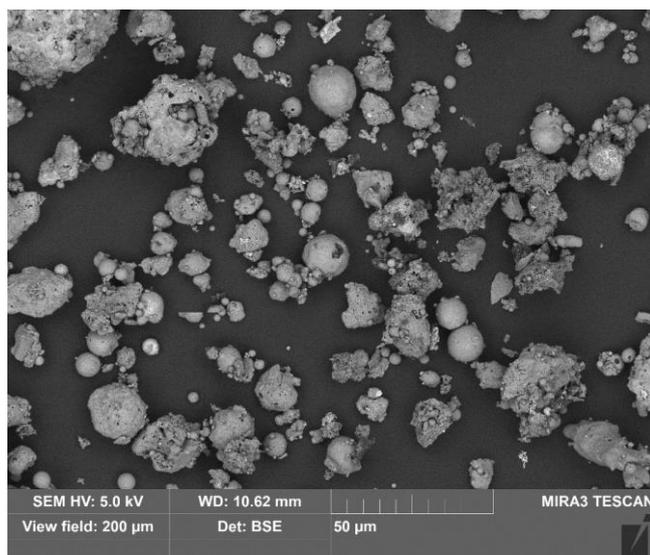


Рисунок 1 – Микрофотография пробы золы Приморской ГРЭС в диапазоне 200 мкм

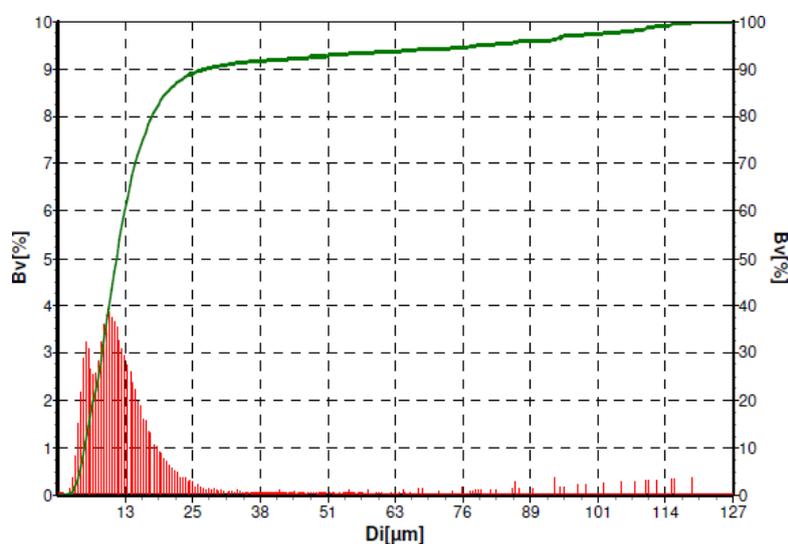


Рисунок 2 – Зависимость содержания частиц от их размера в пробе золы Приморской

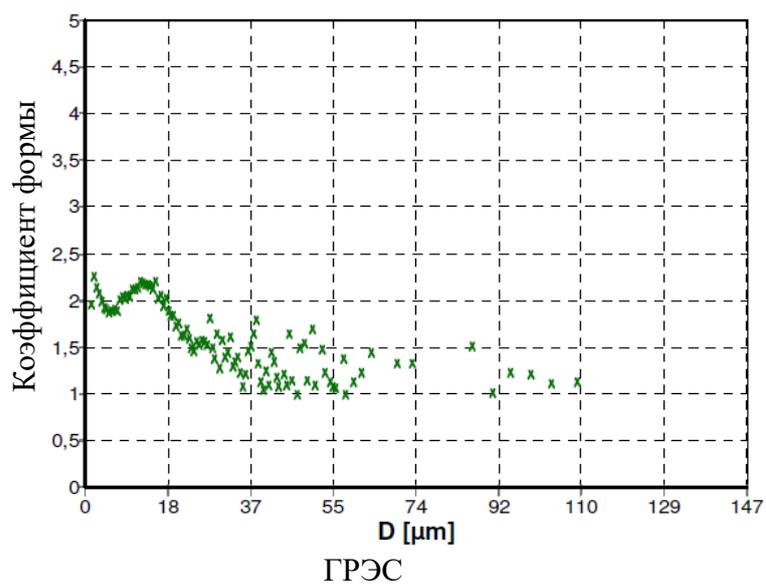


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента формы частиц от их диаметра в пробе ГРЭС

Таблица 1 – Коэффициенты формы и полидисперсности для проб №№1–7

№ пробы	Материал	k_f	d_{cp} вз, МКМ	d_{med} , МКМ	k_d
1	Зола ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»	1,55	40,02	40,9	0,98
2	Зола эстонского сланца электро-фильтровая	1,66	23,92	5,7	4,20
3	Зола эстонского сланца циклонная	1,19	76,83	64,4	1,19
4	Зола Хабаровской ТЭЦ-3	1,21	83,57	79,6	1,05
5	Зола Приморской ГРЭС	2,12	19,42	11,2	1,73
6	Чистый кремний	1,33	34,90	18,7	1,87
7	Микросфера алюмосиликатная	1,13	48,89	48,3	1,01

Для определения среднего коэффициента формы пробы частиц k_f автором разработана формула:

$$k_f = \frac{k_{f1} \cdot m_1 + k_{f2} \cdot m_2 + \dots + k_{fi} \cdot m_i}{100\%}, \quad (4)$$

где $m_1 \dots m_i$ – содержание 1...i фракций частиц, % по массе, $k_{f1} \dots k_{fn}$ – коэффициенты формы частиц по группам фракций.

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

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

При определении коэффициента полидисперсности материала предложено учитывать средневзвешенную крупность частиц $d_{cp,вз}$, а также медианный диаметр частиц d_{med} :

$$k_d = \frac{d_{cp,вз}}{d_{med}}, \quad (6)$$

где d_{med} – медианный диаметр, который соответствует диаметру 50 %-ного отсева.

Без учета формы и полидисперсности материала зависимость для расчета абразивного износа прямолинейных и наклонных участков трубопроводов пневмотранспортных установок имеет вид:

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

С учетом коэффициентов формы и полидисперсности абразивных материалов зависимость (7) приобретает вид:

$$\delta_h = 5,55 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн} \cdot k_f^{0,25} \cdot k_d^{0,25}}, \text{ мм/т}, \quad (8)$$

где U_M – средняя по сечению скорость потока частиц материала, м/с; K_{II} – критерий аэродинамической легкости частиц при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов, 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 мате-

риала/кг воздуха; $k_{изн}$ – коэффициент относительной износостойкости материала трубопровода, k_f – коэффициент формы частиц, k_d – коэффициент полидисперсности материала.

Для вертикальных трубопроводов следует применять зависимость (9), которая по существу отличается только уменьшенным в 4 раза числовым коэффициентом:

$$\delta_h = 1,39 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн} \cdot k_f^{0,25} \cdot k_d^{0,25}}, \text{ мм/т} \quad (9)$$

Для проверки качества зависимости (8) были произведены расчеты удельного линейного абразивного износа при пневмотранспорте золы эстонского сланца, золы березовского и ирша-бородинского угля, и произведено сравнение полученных расчетных данных и результатов натуральных экспериментов (таблица 2).

Полученная зависимость имеет хорошую сходимость с результатами натуральных экспериментов и может быть использована для расчета и оценки абразивного износа прямолинейных и наклонных участков трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов.

Таблица 2 – Величины удельного износа прямолинейных участков трубопроводов при пневмотранспорте золы по расчетной зависимости и по результатам натуральных экспериментов

№ п/п	Транспортируемый материал	Экспериментальные данные по износу трубопроводов, $\delta_h \cdot 10^6$, мм/т	Величина износа $\delta_h \cdot 10^6$, мм/т			Относительная погрешность расчета, %		
			формула (3)	формула (10)	формула (11)	формула (3)	формула (10)	формула (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
Среднеарифметическая погрешность, %						3158,2	7,65	4,03

Выполнена реконструкция экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов (рисунок 4); разработаны Программа и Методика проведения научных исследований по абразивному износу трубопроводов установок пневмотранспорта и по определению критических скоростей при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов; проведены научные исследования в ИИТ Дели, результаты которых обработаны и проанализированы.

При разработке зависимости для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС за основу была взята зависимость (8), которая доработана с учетом влияния угла атаки пылевоздушных потоков k_a и отношения радиуса поворота трубы к внутреннему ее

диаметру $k_{R/D}$. Исследовалась сходимость результатов расчетов по полученным зависимостям с фактическими данными по абразивному износу криволинейных участков трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов.

Зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с учетом k_f , k_d , k_α и $k_{R/D}$ имеет вид:

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

Коэффициент k_α определяется по предложенным формулам:

$$k_\alpha = 0,0065 \cdot \alpha^2 - 0,0385 \cdot \alpha + 1,033 \text{ при } 0 < \alpha \leq 28,3^\circ \quad (11)$$

$$k_\alpha = 5e^{4,57} \cdot \alpha^{-1,39} \text{ при } 28,3 < \alpha \leq 90^\circ \quad (12)$$

Коэффициент $k_{R/D}$ определяется по предложенному выражению:

$$k_{R/D} = 1,448 \cdot R/D^{-0,384} \quad (13)$$

Качество полученной зависимости для расчета криволинейных участков трубопроводов систем ЗШУ ТЭС (таблица 3) оценивалась в сравнении с результатами расчета по существующим зависимостям:

$$\delta_h = U^{2,8} \cdot d_0 \cdot m^{-0,6} \cdot HV^{-0,4} \quad (14)$$

$$\delta_h = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot U^{2,65}}{m^{0,26} \cdot D^2 \cdot \rho_m} \quad (15)$$

Таблица 3 – Оценка погрешности расчета величины абразивного износа криволинейных участков трубопроводов пневмотранспортных установок

№ п/п	Транспортируемый материал	$\delta_h \cdot 10^6$, мм/т, эксперимент	По формуле (14)		По формуле (15)		По формуле (10)	
			$\delta_h \cdot 10^6$, 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 результате сопоставления предлагаемой формулы для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов выявлено ее качественное превосходство над существующими зависимостями.

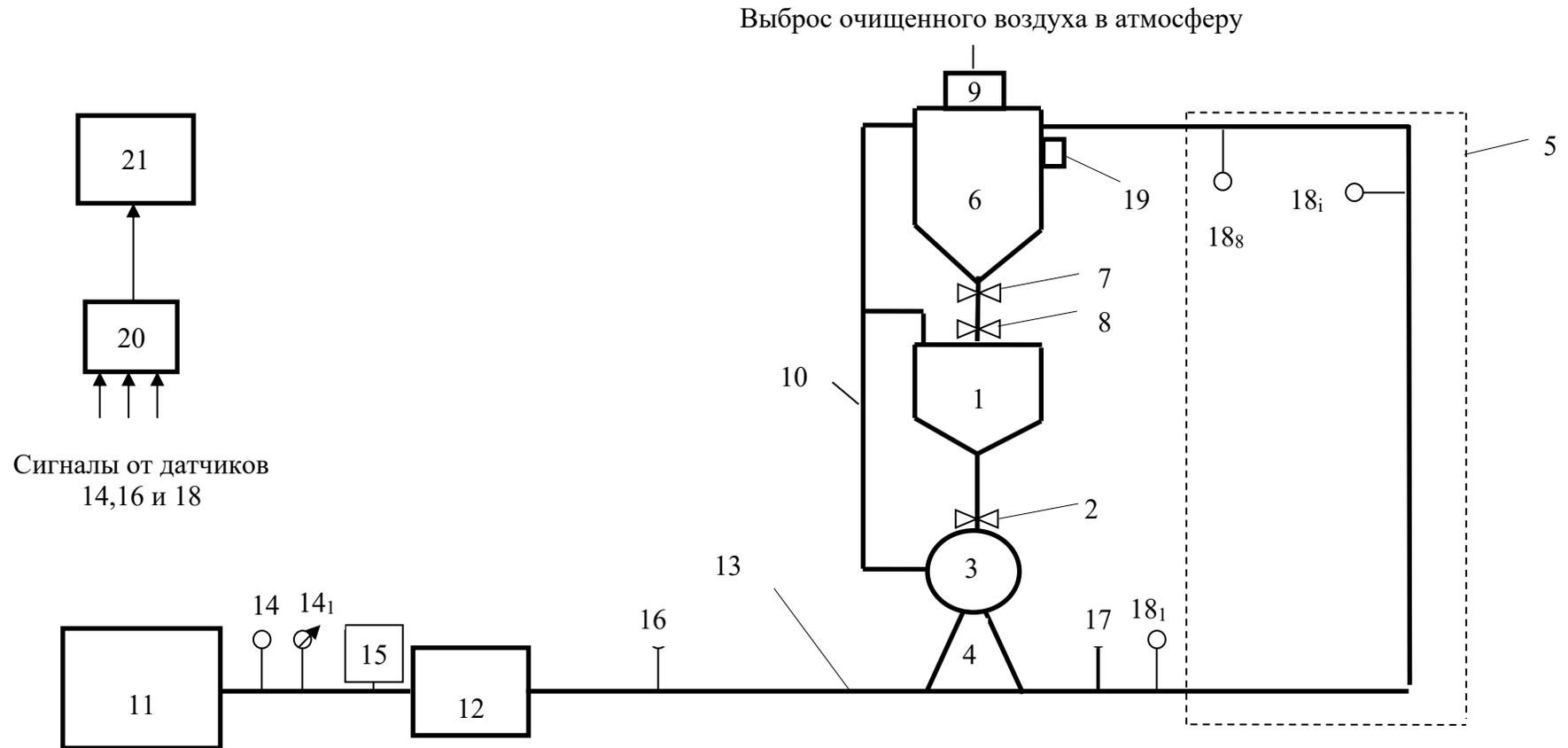


Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов ИИТ Дели:
 1 – расходный бункер; 2 – пластинчатая задвижка; 3 – роторный питатель; 4 – смесительная камера роторного питателя; 5 – экспериментальная часть пылепровода; 6 – приемный бункер; 7, 8 – поворотные 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 аэроосеси в трубопроводах сжатого воздуха и в пылепроводе; 18 – датчики давления аэроосеси в пылепроводе (№№1-8); 19 – комплект тензометрических датчиков из 3 штук; 20 – аналогово-цифровой преобразователь сигналов от датчиков; 21 – компьютер

В четвертой главе приведены результаты внедрения мероприятий по защите трубопроводов систем ЗШУ ТЭС от абразивного износа, включающей разработку оптимальной формы поворотов трубопроводов с углом отклонения потока на 90, 75, 60 градусов с учетом участков стабилизации потока и нанесением на выбранный отвод алюмотермического покрытия. Эскизы отводов приведены на рисунках 5 и 6.

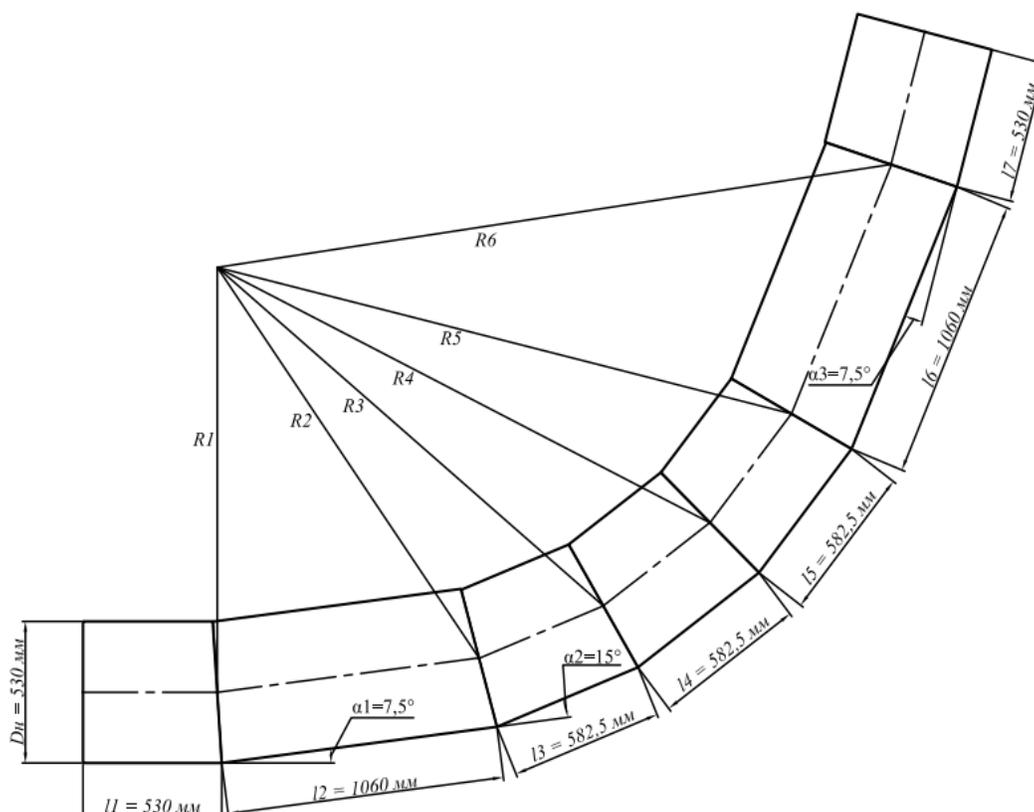


Рисунок 5 – Эскиз поворота пульпопровода на 75° с отношением $R/D=3$

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, на которые нанесено алюмотермическое покрытие. 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.

По результатам внедрения технических решений по продлению ресурса поворотов пульпопроводов системы ГЗУ Хабаровской ТЭЦ-3 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.

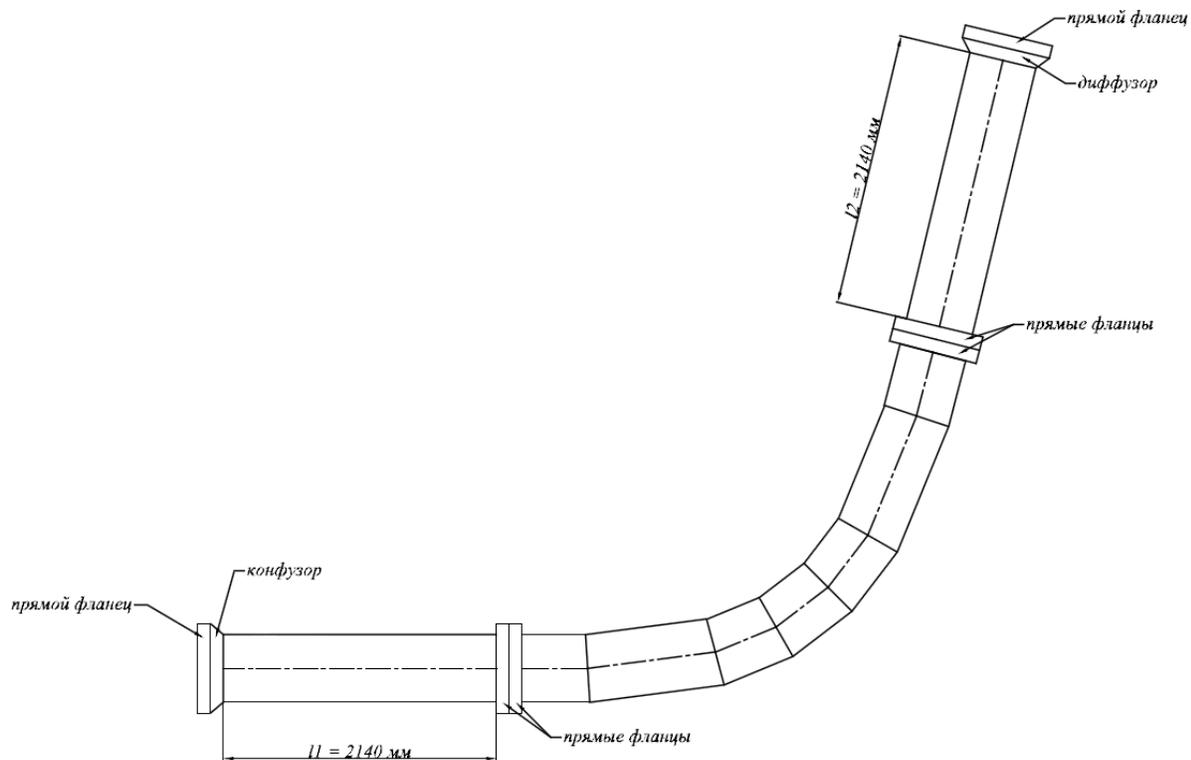


Рисунок 6 – Эскиз поворота пульпопровода на 75° с участками стабилизации при $R/D=3$

Для расчета коэффициента относительной абразивности золы выведена формула:

$$k_a = \frac{k_{SiO_2} \cdot k_{d_{cp}}^{0,5}}{k_f^{0,5}} \quad (16)$$

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 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 по усовершенствованию формы поворота пульпопроводов можно продлить в 2,68 – 3,75 раза.

В таблице 4 представлены результаты расчета удельного срока службы

пульпопроводов, выполненных из Стали 3 и футерованных алюмотермическим покрытием при транспортировании золошлаковой пульпы, содержащей золы нерюнгринских, кузнецких и ургальских углей при скоростях транспортирования 1,2; 1,5 и 1,8 м/с при массовой концентрации пульпы 5 и 10 % с учетом расчета абразивности золы по модели автора.

Таблица 4 – Результаты расчета износа колена поворота пульпопроводов из Стали 3 и с алюмотермическим покрытием при гидротранспорте золы

Материал	k_a	Скорость транспортирования, м/с	Массовая концентрация, %	Срок службы труб из Стали 3, год/мм	Срок службы трубы с алюмотермическим покрытием, год/мм
Зола нерюнгринского угля	0,268	1,2	5	1,926	20,991
		1,5	5	1,102	12,016
		1,8	5	0,699	7,617
		1,2	10	1,227	13,377
		1,5	10	0,703	7,657
		1,8	10	0,445	4,854
Зола кузнецкого угля	0,217	1,2	5	2,384	25,988
		1,5	5	1,365	14,876
		1,8	5	0,865	9,431
		1,2	10	1,519	16,562
		1,5	10	0,870	9,480
		1,8	10	0,551	6,010
Зола ургальского угля	0,235	1,2	5	2,202	24,002
		1,5	5	1,261	13,740
		1,8	5	0,799	8,710
		1,2	10	1,403	15,296
		1,5	10	0,803	8,756
		1,8	10	0,509	5,551

По результатам расчета срок службы колена, упрочненного алюмотермическим покрытием без учета изменения 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 изменения формы колен, футерованных алюмотермическим покрытием, видно, что после внедрения упомянутых мероприятий по защите пульпопроводов от абразивного износа срок службы криволинейных участков системы ГЗУ возрастает более, чем в 14 раз.

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). Внедренные мероприятия по защите трубопроводов от абразивного износа можно применять к участкам систем пневмо- и гидрозолоудаления разных ТЭС, что позволяет снизить эксплуатационные расходы и повысить показатели надежности ТЭС.

В пятой главе приведены предложения по реализации комплексного подхода при обращении с золошлаками ТЭС для их максимального использования в производственных процессах предприятий России, включая предложения по совершенствованию нормативно-правовых документов (таблица 5), механизм экономического стимулирования производителей золошлаков, алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России.

Таблица 5 – Предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы

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, зола-унос, шлаки), полученные в результате его сжигания в целях производства электрической 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»
ФЗ №268 от 14.07.2022 «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

Продолжение таблицы 5

Наименование документа	Текущие формулировки	Предложенные формулировки
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.
ОКПД, ТН ВЭД	Отсутствуют коды на продукцию, получаемую из золошлаков в классификаторах	дополнить ОКПД, ТН ВЭД в части классификации продукции, получаемой из золошлаков
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.

По результатам работы над пятой главой диссертации в качестве стимулирующей меры по повышению уровня использования золошлаков ТЭС с целью

достижения показателей Энергетической стратегии РФ до 2050 г. (к 2050 г. использовать 90% золошлаков текущего выхода) предлагается: дополнительно к 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» разработать отраслевой нормативный документ, предусматривающий порядок расчета дифференцированных экологических платежей в зависимости от объемов использования золошлаков текущего выхода, образованных на угольных ТЭС.

После промышленного освоения технологии комплексной переработки золошлаков ТЭС до 2027 г., в течение периода действия комплексного экологического разрешения (КЭР), 7 лет, начиная с 2028 г. предлагается при ежегодном 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 невостребованной 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 невостребованной части золошлаков.

Предлагается в течение первых 7 лет использовать предложенную формулу для расчета ежегодных экологических платежей за размещение золошлаков текущего выхода с целью достижения показателей, предусмотренных Энергетической стратегией:

$$P_{пл} = 0,5 \cdot M_{зш} \cdot H_{плj} \cdot K_{ст1} + (0,5 \cdot M_{зш} - M_{исп}) \cdot H_{плj} \cdot K_{ст2}, \text{ руб.} \quad (17)$$

где: $M_{зш}$ – масса золошлаков годового выхода, подлежащих складированию, 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).

Наиболее перспективной является безводная или «сухая» система обращения с золошлаками ТЭС, в которой предусмотрена 100 %-ная возможность

отгрузки сухой золы потребителю, а в случае наличия не востребованной 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 (рисунки 7).

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.

Научные и практические результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, использованы в работе компании ООО «Экометт-Луч», которая переработкой золошлаков Приморской ГРЭС в Приморском крае.

До 2023 г. ООО «Экометт-Луч» в пгт. Лучегорск реализовывал пилотный инвестиционный проект по комплексной переработке золошлаковых смесей с получением продукции (таблица 6).

Таблица 6 – 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	19 200,0	192 000,0
Грунт песчаный (песок)	87,5	280 000,0	2 800 000,0
Всего	100	320 000,0	3 200 000,0

Выполнен анализ возможности использования угольного продукта производства ООО «Экометт-Луч» на котлах Приморской ГРЭС. Основные характеристики Бикинского угля, угольного продукта, полученного из золошлаков Приморской ГРЭС, и их смеси, приведены в таблице 7.

Установлено, что сжигание 5,3 % угольного продукта производства ООО «Экометт-Луч» в смеси с проектным Бикинским углем не приведет к ухудшению эксплуатационных характеристик котла, а экологические характеристики работы котла при сжигании смеси проектного и не проектного углей удовлетворяют 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».

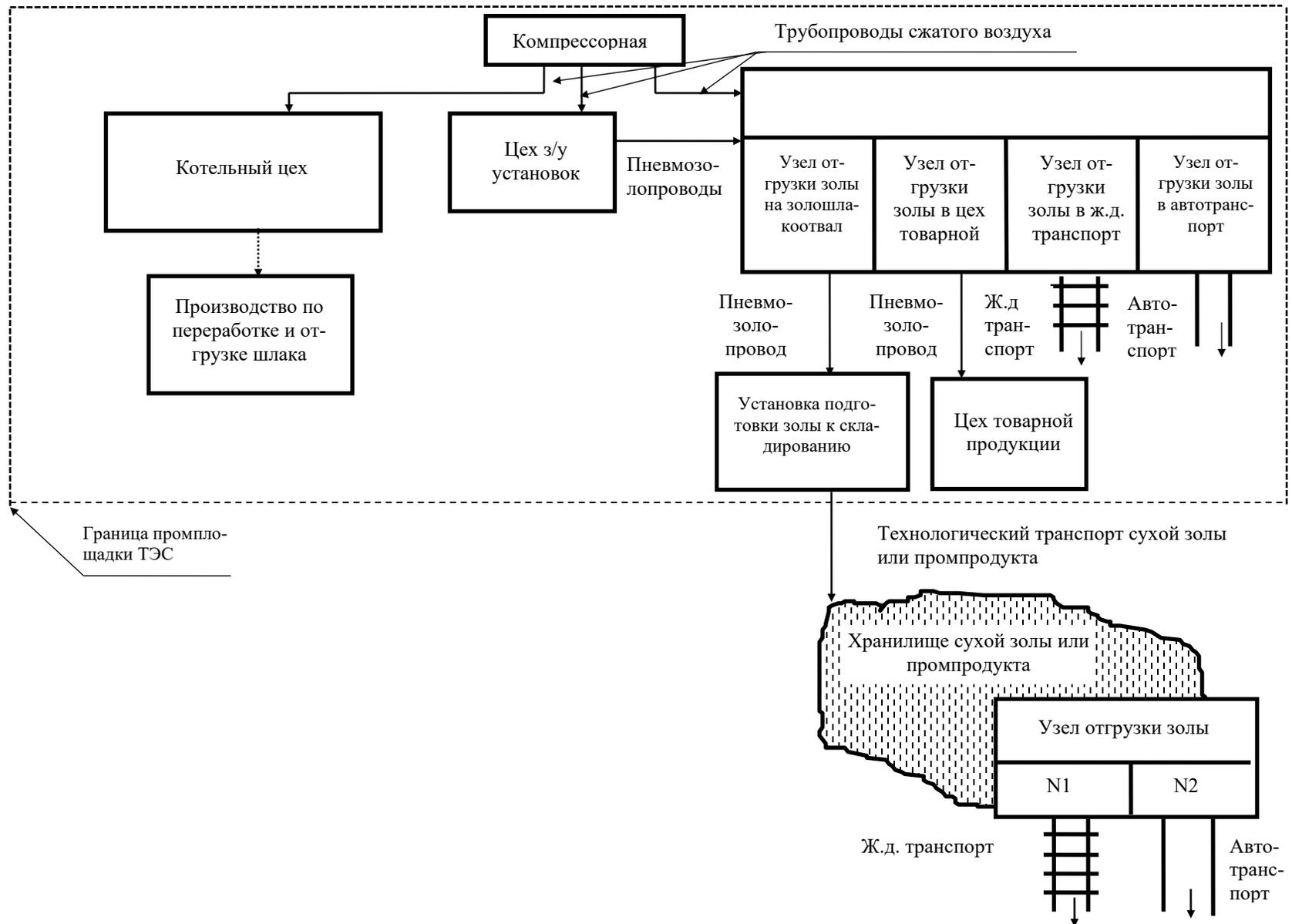


Рисунок 7 – Блок-схема перспективной системы ЗШУ при отдельном транспортировании, отгрузке и временном складировании невостребованной части золы

Таблица 7 – Основные характеристики проектного топлива, угольного продукта и смеси

Параметр	Бикинский 1Б (Проектный)	Угольный продукт (анализ ОАО «ВТИ»)	Смесь в пропорции 94,7/5,3 %
Влажность на рабочую массу, %	45,00	40,73	44,77
Зольность на рабочую массу, %	15,95	9,36	15,60
Содержание серы, %	0,30	0,31	0,30
Содержание углерода, %	25,55	32,68	25,93
Содержание водорода, %	2,15	3,04	2,20
Содержание азота, %	0,70	6,38	1,00
Содержание кислорода, %	10,35	7,50	10,20
Выход летучих на сухую беззольную массу, %	56,00	24,46	40,23
Теплота сгорания низшая, ккал/кг	2000,00	2850,00	2425,00

При работе над каждым конкретным проектом определяется набор технологий комплексной переработки золошлаков в зависимости от потребности рынков, характеристик золошлаков, оборудования и технологий, используемых на ТЭС, логистических возможностей в регионах. Комплексный подход должен включать внедрение высокотехнологичных проектов переработки золошлаков ТЭС с возможностью извлечения полезных и ценных элементов и компонентов при минимизации ущерба окружающей природной среде, и использование оставшегося продукта для проектов дорожного строительства, рекультивации открытых и закрытых горных выработок, планирования территорий. При этом, необходимо стремиться к 100 %-ной утилизации золошлаков, размещая не востребуемую часть на золошлакоотвалах ТЭС в виде продуктов отложенного спроса.

Разработанный алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России приведен на рисунке 8. Он предусматривает реализацию двух независимых сценариев и 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.

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 выходы и отвальной золы с получением продукции из золы в виде зольных микросфер, недожога, железного концентрата, алюмосиликатов, редких и редкоземельных металлов.

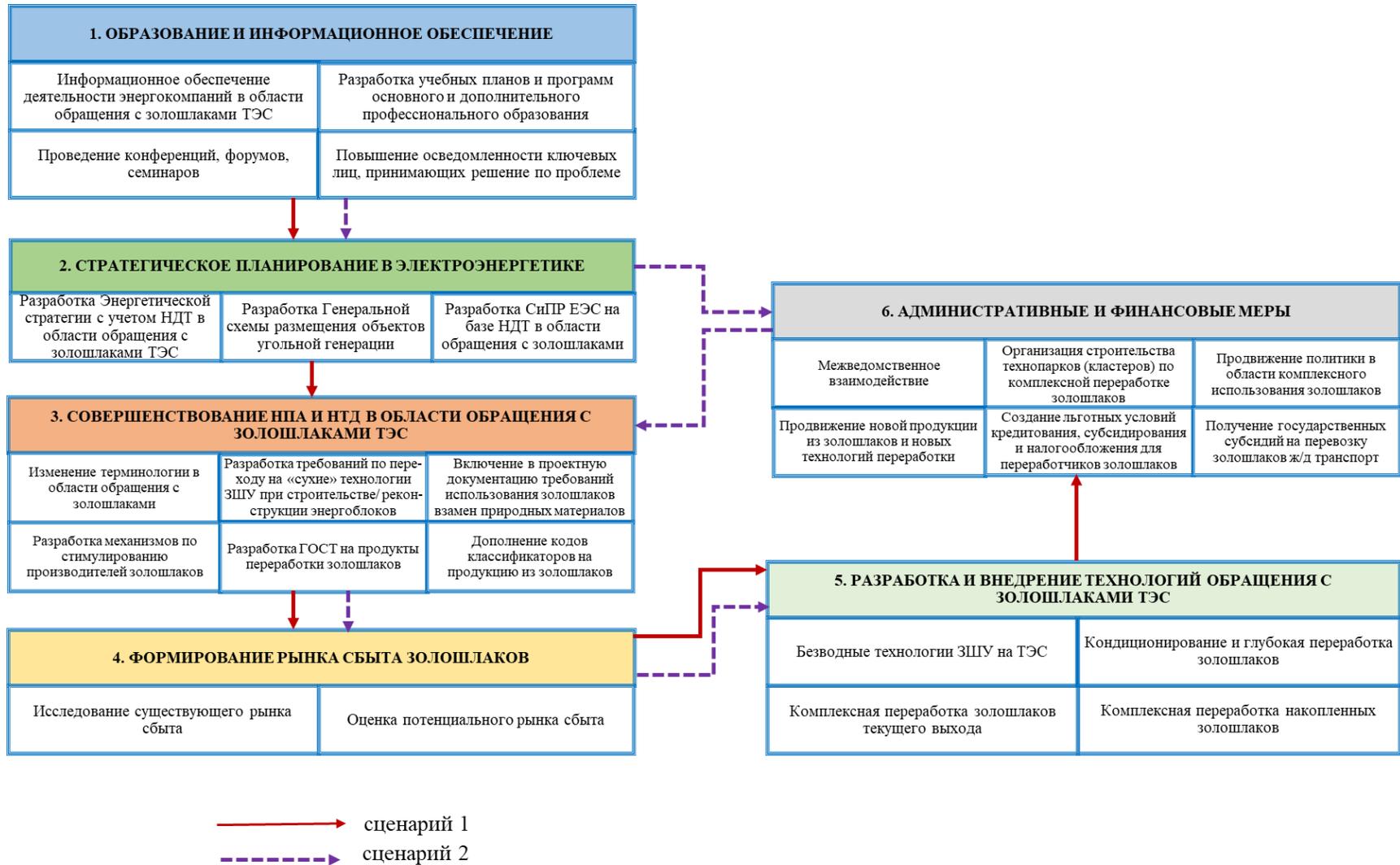


Рисунок 8 - Алгоритм повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС России

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 2050 году в объеме 90% согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года. 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 транспортирования золошлаков. Определено, что при транспортировании низкоконтрированных пылевоздушных потоков оптимальные скорости в системах пневмотранспорта золы варьируются от 11,0 до 31,0 м/с, а при транспортировании высококонтрированных - 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 значи-

мых 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 поверхностей 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 2050 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и

Аттестационным советом УрФУ:

1. 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; 0,39 п.л. / 0,25 п.л.

2. 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; 0,34 п.л. / 0,22 п.л.

3. Путилов, В. Я. Зависимость 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; 0,38 п.л. / 0,25 п.л.

4. Putilov, V. Problems of Handling Ashes and Slags Produced at Russian Thermal Power Stations: Barriers, Possibilities, and Ways of Solving Them / V. Putilov, I. Putilova // Thermal Engineering, 2010, Vol. 57, No. 7, pp. 617–621; 0,52 п.л. / 0,3 п.л. (Springer Nature).

5. 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; 0,83 п.л. / 0,4 п.л.

6. 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; 0,68 п.л. / 0,3 п.л.

7. 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; 0,72 п.л. / 0,3 п.л.

8. 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; 0,54 п.л. / 0,3 п.л.

9. Путилов, В. Я. Золошлаки энергетики: статус и определения / В. Я. Путилов, И. В. Путилова, Н. А. Зройчиков, Х. Й. Фюерборн // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 1-3(213-215). – С. 73-83; 0,89 п.л. / 0,5 п.л.

10. 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; 0,4 п.л. / 0,2 п.л. (WoS).

11. 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; 0,31 п.л. / 0,15 п.л. (WoS).

12. 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; 1,42 п.л. / 0,8 п.л.

13. Putilov, V. Editorial / V. Putilov, I. Putilova // Environmental Geotechnics. - 2018. – No 5(3). – pp. 131–133; 0,38 п.л. / 0,25 п.л. (WoS).

14. Zroichikov, N.A. Evaluation of the Influence of Abrasive Wear on the Service Life of Hydraulic Transport Systems of TPPs' Ash and Slag Removal Systems / N.A. Zroichikov, I.V. Putilova, V.Ya. Putilov, S.A. Fadeev, and E.A. Malikova // Thermal Engineering, 2020, Vol. 67, No. 9, pp. 617–625 doi:10.1134/S0040601520090128; 0,8 п.л. / 0,5 п.л. (WoS, Springer Nature).

15. 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; 0,96 п.л. / 0,96 п.л.

16. 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; 1,2 п.л. / 0,6 п.л.

17. 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; 1,16 п.л. / 1,16 п.л.

18. 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; 1,09 п.л. / 1,09 п.л.

19. Путилова, И. В. Опыт реализации проектов с использованием золошлаков ТЭС в России и за рубежом / И. В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2023. – № 3(408). – С. 49-68; 1,71 п.л. / 1,71 п.л.

20. 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; 0,86 п.л. / 0,86 п.л. (Scopus, WoS).

21. 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; 1,05 п.л. / 0,7 п.л. (Scopus, Springer Nature), Q3.

Патенты и свидетельства о регистрации базы данных:

22. Путилов, В. Я., Путилова, И. В. Информационная электронная постое-

янно обновляемая система открытого доступа «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.

23. 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.

24. 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.

Другие публикации:

25. Putilov, V. Prospects of solving the problem on ashes and slags of thermal power plants in Russia / V. Putilov, I. Putilova // 7 Int. symposium “Environmental geotechnology and global sustainable development”, 2004. - Helsinki, Finland, - pp.246-251.

26. Putilov, V. Modern approach to the problem of Utilization of fly ash and bottom ash from power plants in Russia / V. Putilov, I. Putilova // International Conference “World of Coal Ash”, 2005, Lexington, Kentucky, USA, <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2307&context=woca>.

27. Коппола, Д. Применение технологии сухого шлакоудаления МАС — возможность значительного повышения надежности, экономичности и экологичности угольных электростанций /Д. Коппола, В. Я. Путилов, И. В. Путилова, С. Савастано // II Международная научно-практическая конференция и специализированная выставка «Экология в энергетике – 2005», Москва, Изд-во МЭИ, - М. с.237-242.

28. Putilova I. Erosion wear of pneumatic pipelines of ash removal and dust preparation systems at TPPs / I. Putilova // Ashes from power generation. - 2006, Cracow, Poland, pp.145-152.

29. Путилов, В. Я. Анализ общемировых тенденций и перспектив решения проблемы золошлаков ТЭС в России / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // Международный научно-практический семинар «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование». – 2007. - Москва, Изд-во МЭИ. - С.11-17.

30. Putilov, V.Y. Some issues of optimizing the schemes of pneumatic ash removal systems of thermal power plants / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // International Symposium on Pneumatic Conveying Technologies, 2007, Beijing, China, pp. 137-146.

31. Putilov, V. Y. Estimation of erosion wear of pipelines of fine bulk materials pneumotransport installations / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // International Symposium on Pneumatic Conveying Technologies, 2007, Beijing, China, pp. 174-181.

32. Putilov, V. Y. Some aspects of implementing ecologically sound ash removal technologies at reconstruction of coal-fired power plants in Russia / V. Y. Putilov, I. V. Putilova, A.M. Lunkov // International Conference “World of Coal Ash 2007”, Covington, USA, <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2260&context=woca>.

33. 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, <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2261&context=woca>.

34. Путилов, В. Я. Оценка основных интегральных показателей новых и реконструируемых систем золошлакоудаления ТЭС России на примере Рефтинской ГРЭС ОАО «ОГК-5» / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // Всероссийское совещание по вопросам переработки и использования золошлаковых материалов тепловых электростанций, 2008 г., Новосибирск, НГТУ, - Новосибирск, С.55-64.

35. Putilov, V. Y. On necessity of the system approach for effective solution of THE problem on ash and slag from TPPs / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // International Conference EuroCoalAsh 2008”, Warsaw, EKOTECH Sp.z.o.o., Szczecin, pp.407-410.

36. Putilov, V. Y. About creation of the national web-site “Coal combustion by-products from TPPS of Russia” / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // EuroCoalAsh 2008, Warsaw, Poland, EKOTECH Sp.z.o.o., 2008, pp.165-174.

37. Путилов, В. Я. Барьеры, возможности и пути решения проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // II Международный научно-практический семинар «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование», 2009, Москва, Издательский дом МЭИ. - С. 13-19.

38. Putilov, V. Y. Wplyw technologii spalania sproszkowanego węgla w kotłach z suchym dnem na emisję NOx oraz na poziom strat prażenia w popiele lotnym / V. Y. Putilov, I. V. Putilova, A. M. Arkhipov // XVI Międzynarodowa Konferencja "Popioly z energetyki", Zakopane, 2009, pp.35-57.

39. Putilov, V. Y. Problemy Związane z Działalnością Portalu „Produkty Uboczne Spalania Węgla z Energetyki Rosyjskiej / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // XVI Międzynarodowa Konferencja "Popioly z energetyki", Zakopane, 2009, pp.393-402.

40. Путилов, В. Я. Комплексное решение вопросов повышения экономической эффективности, экологической безопасности и кондиционирования свойств золошлаков при факельном сжигании углей на ТЭС / В. Я. Путилов, А. М. Архипов, И. В. Путилова, А. В. Учеватов, А. В. Роор / Золошлаки ТЭС: уда-

ление, транспорт, переработка, складирование: Материалы III Международного научно-практического семинара, Москва, 22–23 апреля 2010 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 38-42.

41. Putilov, V. Y. Properties of coal ash in Russia / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // II EuroCoalAsh Conference, Copenhagen, Denmark, 2010, pp.71-76.

42. Putilov, V. Y. Podsumowanie uszlachetniania popiołów z węgla w Rosji / V. Y. Putilov, I. V. Putilova, A. V. Uchevatov // XVII Międzynarodowa Konferencja "Popioły z energetyki", Warszawa, Poland, 2010, pp.27-42.

43. Путилов, В. Я. Роль и место научно-образовательных учреждений в решении проблемы обращения с золошлаками энергетики в России / В. Я. Путилов, И. В. Путилова, Е. А. Маликова // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: Материалы IV Международного научно-практического семинара, Москва, 19–20 апреля 2012 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 39-47.

44. Putilov, V. Y. Integrated solutions on providing the consumer properties of ash and improvement of environmental and economic characteristics of power plant operation at burning hard coal of the unsteady quality in power boilers / V. Y. Putilov, I. V. Putilova, A. M. Arkhipov // International Conference “Eurocoalash 2012”, Thessaloniki, Greece, pp. 1-8.

45. Путилов, В. Я. О барьерах и путях решения вопросов полезного применения золошлаков энергетики / В. Я. Путилов, И. В. Путилова // Информационно-аналитический журнал «Энерго-info», №6-7, 2012. – С. 60-62.

46. Путилов, В. Я. Электронная система открытого доступа «Наилучшие доступные и перспективные природоохранные технологии в энергетике России» - эффективный информационный ресурс для реализации экологической политики энергокомпаний / В. Я. Путилов, И. В. Путилова, Е. А. Маликова // Труды Второй Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» — ЭНЕРГО–2012 (Москва, 4–6 июня 2012 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 256-261.

47. 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.

48. Putilov, V. Y. Coal ash: the best available techniques, science and education / V. Y. Putilov, I. V. Putilova // International Conference “Coal Ash Asia 2016”, Shuo-zhou, China, 2016, pp.312-317.

49. Путилов, В. Я. О квалификации персонала энергокомпаний и внедрении наилучших доступных природоохранных технологий / В. Я. Путилов, И.

В. Путилова // Международная научно-практическая конференция «УгольЭко-2016». Москва, Россия. Издательский дом МЭИ, 2016, С. 183-187.

50. Сапаров, М.И., Путилова И.В., Зройчиков Н.А. Актуальные вопросы получения комплексных экологических разрешений и повышения уровня утилизации золошлаков ТЭС / М.И. Сапаров, И.В. Путилова, Н.А. Зройчиков // Стратегия устойчивого развития электроэнергетики России / Сборник докладов участников Круглого стола НП «НТС ЕЭС» в рамках РМЭФ-2024 под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – 84 с.