



ВТИ
ВСЕРОССИЙСКИЙ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ
И Н С Т И Т У Т

19 СЕНТЯБРЯ 2025



**IV МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

ЭКОЛОГИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

МОСКВА 2025

Акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский институт»
(АО «ВТИ»)

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ

«ЭКОЛОГИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ»

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

Под общей редакцией д.т.н. А.Г. Тумановского, О.А. Киселевой

19 октября 2025 г.

Москва
АО «ВТИ»

УДК 621.311.22+620.169

ББК 31.3

Э-40

Э-40 Экология в энергетике: сб. докл. / под общ. ред. А.Г. Тумановского, О.А. Киселевой //IV Международная научно-техническая конференция. – М.: АО «ВТИ»,2025. – 147 с.: ил.

ISBN 978-5-905 858-63-5

Представлены доклады, в которых рассмотрены современные направления экологической модернизации энергетических объектов, внедрение наилучших доступных технологий и цифровых систем контроля выбросов. Авторы анализируют практические решения по снижению выбросов оксидов азота, серы и пыли, развитию систем автоматического мониторинга, совершенствованию методов измерений и метрологического обеспечения. Освещены технологии десульфуризации дымовых газов с получением сульфата аммония, внутритопочной рециркуляции и циркуляционного кипящего слоя, а также опыт проектирования и наладки газоочистных комплексов. Отдельное внимание уделено вопросам декарбонизации, сертификации происхождения электроэнергии и повышению экологической эффективности тепловых электростанций. Материалы докладов отражают консолидацию научных, инженерных и производственных компетенций в решении задач снижения негативного воздействия энергетики на окружающую среду.

ISBN 978-5-905 858-63-5

© АО «ВТИ», 2025

СТАНДАРТИЗАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ И СБРОСОВ

ЕЛФИМОВА О.С. (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, г. Москва, Россия)

В статье представлены результаты ежегодного анализа состояния работ в сфере стандартизации в Российской Федерации за 2024 год. Освещены ключевые итоги выполнения Программы национальной стандартизации (ПНС-2024), включая статистику по утвержденным документам (1776 ед.) с акцентом на устойчивую динамику внебюджетного финансирования разработок (52,8%). Особое внимание уделено развитию нормативно-технической базы в экологической сфере, в частности, подробно рассмотрен комплекс новых национальных стандартов для систем автоматического контроля выбросов и сбросов, вступающих в силу с 1 марта 2025 года, а также перспективные работы по созданию стандартов для предиктивных систем. Отмечена ключевая роль технических комитетов и интеграция стандартизации в стратегические цели государства и бизнеса.

Ключевые слова: стандартизация, Росстандарт, национальный стандарт, ГОСТ Р, Программа национальной стандартизации, технические комитеты, экологический комплекс, системы автоматического контроля выбросов (САКВ), системы автоматического контроля сбросов (САКС), предиктивные системы, охрана окружающей среды.

Введение

Стандартизация является неотъемлемым инструментом технологического развития, обеспечения качества продукции и безопасности, а также решения стратегических государственных задач. Ежегодный анализ состояния работ в сфере стандартизации свидетельствует о растущей востребованности стандартов со стороны всех участников экономической деятельности: государства, бизнеса, промышленности и общества. Совершенствование национальной системы стандартизации направлено на повышение ее эффективности и интеграцию с корпоративными системами стандартизации организаций.

Целью данной статьи является анализ ключевых результатов работ по стандартизации в Российской Федерации в 2024 году, с акцентом на реализацию Программы национальной стандартизации и развитие нормативной базы в приоритетных областях, в частности, в сфере экологического контроля и мониторинга. В работе рассматриваются количественные

показатели утвержденных стандартов, роль технических комитетов и детально анализируется новый комплекс стандартов для систем автоматического контроля выбросов и сбросов.

О состоянии работ в сфере стандартизации в Российской Федерации

Ежегодный анализ состояния работ в сфере стандартизации свидетельствует о повышении востребованности стандартов, как со стороны государства, так и со стороны бизнеса, промышленности и общества. Работы по совершенствованию национальной системы стандартизации направлены также на дальнейшую интеграцию стандартизации, проводимой в организациях, и национальной стандартизации.

Ежегодно Росстандартом утверждается программа национальной стандартизации на следующий календарный год. Формирование программы национальной стандартизации осуществляется на основе установленных целевых индикаторов и показателей, а также на основе перспективных программ стандартизации по приоритетным направлениям. Приоритеты национальной стандартизации определяют ежегодно в соответствии со стратегическими целями и приоритетными направлениями развития национальной системы стандартизации. [1]

В 2024 году выполнялись работы по реализации утвержденной Росстандартом Программы национальной стандартизации на 2024 год (далее – ПНС-2024), которая была сформирована с использованием информационной системы в сфере стандартизации – ФГИС Росстандарта («Береста»).

В 2024 году в рамках ПНС-2024 утверждено 1776 документов национальной системы стандартизации, из которых 839 стандартов разработано за счет бюджетных средств и 937 разработано без привлечения бюджетного финансирования по инициативе бизнеса, что составляет 52,8% от общего числа утвержденных документов.

Таким образом, с 2022 года сохраняется устойчивая динамика разработки более половины утверждаемых стандартов за счет средств из внебюджетных источников финансирования.

В общем числе утвержденных стандартов – 1019 национальных стандарта Российской Федерации (ГОСТ Р), 644 межгосударственных стандартов (ГОСТ), принятых в качестве национальных стандартов, что составляет 36,26%, что на 3,63% превышает показатель по итогам 2023 года (составил 32,6% от общего числа документов), а также 99 предварительных национальных стандарта (ПНСТ) и 13 рекомендаций по стандартизации. [2]

В условиях действующей национальной системы стандартизации технические комитеты выполняют основную экспертную функцию и играют ключевую роль при разработке стандартов [3]. В рамках совершенствования системы стандартизации в Российской Федерации одной из важнейших задач является повышение эффективности функционирования

технических комитетов по стандартизации. В течение 2024 года действовало 287 технических комитетов по стандартизации.

К техническим комитетам по стандартизации экологического комплекса относятся:

- ТК 020 «Экологический менеджмент и экономика»;
- ТК 025 «Качество почв, грунтов и органических удобрений»;
- ТК 084 «Неорганические продукты азотной группы (на базе аммиака и азотной кислоты)»;
- ТК 113 «Наилучшие доступные технологии»;
- ТК 115 «Устойчивое развитие»;
- ТК 231 «Отходы и вторичные ресурсы»;
- ТК 239 Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа;
- ТК 366 «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности и «зеленая» инновационная продукция;
- ТК 409 «Охрана окружающей природной среды»;
- ТК 457 «Качество воздуха»;
- ТК 483 «Экономика замкнутого цикла, совокупное потребление и устойчивое развитие»;
- ТК 708 «Экологически чистая сельскохозяйственная продукция, сырье и продовольствие».

Системы автоматического контроля выбросов и сбросов

Согласно ГОСТ Р 71507–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Термины и определения» **система автоматического контроля выбросов; САКВ** – система, устанавливаемая на объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, принимаемая как законченное изделие непосредственно на месте эксплуатации и представляющая собой комплекс технических и программных средств, осуществляющих автоматические измерения и учет показателей выбросов загрязняющих веществ (массовых выбросов) и передачу информации о показателях выбросов загрязняющих веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Согласно ГОСТ Р 71514–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Термины и определения» **система автоматического контроля сбросов; САКС** – система, устанавливаемая на объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, принимаемая как законченное изделие непосредственно на месте эксплуатации и представляющая собой комплекс

технических и программных средств, осуществляющих автоматические измерения и учет показателей сбросов загрязняющих веществ, фиксацию и передачу информации о показателях сбросов загрязняющих веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Согласно пункту 9 статьи 67 Федерального закона от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и положениям постановления Правительства Российской Федерации от 22 января 2024 г. № 39 «Об особенностях создания и эксплуатации систем автоматического контроля, указанных в Федеральном законе «Об охране окружающей среды», на квотируемых объектах в части контроля выбросов приоритетных загрязняющих веществ» уточнена терминология: на квотируемых объектах I и II категории создаются и эксплуатируются системы автоматического контроля выбросов.

С 1 марта 2025 года введены в действие 8 стандартов, которые устанавливают общие технические требования к САКВ, их подсистемам, проектной и рабочей документации:

- ГОСТ Р 71505–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Общие положения»;
- ГОСТ Р 71507–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Термины и определения»;
- ГОСТ Р 71508–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Классификация»;
- ГОСТ Р 71509–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Технические условия»;
- ГОСТ Р 71510–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Подсистема газового анализа. Технические требования»;
- ГОСТ Р 71511–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Подсистема измерений объемного расхода. Технические требования»;
- ГОСТ Р 71512–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Требования к отбору проб»;
- ГОСТ Р 71513–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Основные требования к проектной и рабочей документации».

Кроме того, с 1 марта 2025 года введены в действие 8 стандартов, устанавливающих общие технические требования для систем автоматического контроля сбросов загрязняющих веществ в водоемы (далее – САКС),

их подсистем, проектной и рабочей документации:

- ГОСТ Р 71506–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Общие положения»;
- ГОСТ Р 71514–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Термины и определения»;
- ГОСТ Р 71515–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Классификация»;
- ГОСТ Р 71516–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Технические условия»;
- ГОСТ Р 71517–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Подсистема измерений химических параметров. Технические требования»;
- ГОСТ Р 71518–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Подсистема измерений объемного расхода. Технические требования»;
- ГОСТ Р 71519–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Требования к отбору проб»;
- ГОСТ Р 71520–2024 «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Основные требования к проектной и рабочей документации».

В соответствии с Перспективной программой стандартизации в области систем автоматического контроля выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду до 2033 года (далее – ППС САКВС), утвержденной 14 ноября 2024 г. Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и Росстандартом, разрабатываются окончательные редакции проектов стандартов в области предиктивных систем автоматического контроля выбросов (далее – САКВП):

- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Предиктивные системы. Общие положения» (шифр: 1.17.206-1.019.24);

- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Предиктивные системы. Основные требования» (шифр: 1.17.206-1.020.24);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Предиктивные системы. Разработка, производство, условия применения» (шифр: 1.17.206-1.021.24);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Метрологическое обеспечение предиктивных систем. Общие положения» (шифр: 1.17.206-1.022.24);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Метрологическое обеспечение предиктивных систем. Методы и средства испытаний» (шифр: 1.17.206-1.023.24);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Метрологическое обеспечение предиктивных систем. Методы и средства поверки» (шифр: 1.17.206-1.024.24).

Плановая дата утверждения национальных стандартов в области САКВП определена на IV квартал 2025 года.

В соответствии с ППС САКВС и Планом национальной стандартизации на 2025 год в рамках деятельности профильного технического комитета по стандартизации № 206 «Эталоны и поверочные схемы» разрабатываются 10 проектов стандартов в области систем автоматического контроля выбросов и сбросов, устанавливающих требования к подсистемам и модулям САКВ и САКС, информационным знакам и электронным пломбам для защиты САКВ и САКС от несанкционированного проникновения и вмешательства в работу систем:

- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Электронные пломбы. Основные требования» (шифр: 1.17.206-1.145.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Подсистема анализа пыли. Технические требования» (шифр: 1.17.206-1.146.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Подсистема измерения взвешенных частиц. Технические требования» (шифр: 1.17.206-1.147.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Нормальные условия» (шифр: 1.17.206-1.148.25);

- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля сбросов. Нормальные условия» (шифр: 1.17.206-1.149.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Единицы измерений» (шифр: 1.17.206-1.150.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Требования к техническому заданию» (шифр: 1.17.206-1.151.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Кабельные трассы. Основные требования» (шифр: 1.17.206-1.152.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Информационные знаки и указатели» (шифр: 1.17.206-1.153.25);
- ГОСТ Р «Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Блок-контейнер. Основные требования» (шифр: 1.17.206-1.154.25).

Комплекс стандартов охватывает весь жизненный цикл систем автоматического контроля от проектирования и испытаний до внедрения и эксплуатации.

Применение предиктивных САК позволяет предприятиям снижать капитальные вложения в 2–5 раз, а операционные расходы — в десятки раз; решения ускоряют внедрение отечественных технологий мониторинга.

Принятая серия стандартов органично встроена в общий фонд действующих национальных стандартов по системам автоматического контроля, что обеспечивает единый и непротиворечивый нормативный контур для всех типов систем автоматического контроля.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует устойчивое и динамичное развитие национальной системы стандартизации в Российской Федерации. Ключевыми трендами 2024 года являются:

1. Преобладание внебюджетных источников финансирования разработки стандартов, что свидетельствует о высокой заинтересованности бизнеса.
2. Системная работа по развитию нормативной базы в приоритетных направлениях, в частности, в области экологии.
3. Создание комплексных стандартов, как в случае с САКВ и САКС, что обеспечивает целостность и непротиворечивость нормативных требований.
4. Ориентация на перспективные технологии, такие как предиктивные системы, что способствует внедрению передовых отечественных разработок и значительной экономии затрат предприятий.

Принятые и разрабатываемые стандарты формируют надежную основу для выполнения требований природоохранного законодательства, способствуют внедрению наилучших



доступных технологий и вносят существенный вклад в достижение целей устойчивого развития.

Список литературы

1. Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».
2. rst.gov.ru.
3. ГОСТ Р 1.1–2020 «Технические комитеты по стандартизации и проектные технические комитеты по стандартизации. Правила создания и деятельности».

ЧИСТОЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В РОССИИ

АНФИМОВ С.С. (Ассоциация «Некоммерческое партнерство Совет рынка по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью»)

В докладе рассматривается развитие системы сертификации происхождения электроэнергии в Российской Федерации как механизма подтверждения использования потребителями электроэнергии из возобновляемых и низкоуглеродных источников. Описываются тренды глобальной трансформации электроэнергетики и роль корпоративного сектора в процессе перехода к чистому энергопотреблению. Приводятся принципы функционирования российской системы сертификации, созданной на основе федерального закона от августа 2023 года. Представлены результаты работы системы по состоянию на конец сентября 2025 года, включая количество квалифицированных генерирующих объектов, участников, объемы сертифицированной электроэнергии и результаты участия компаний в системе. Делается вывод о растущем спросе российских потребителей на инструменты сертификации и чистое энергопотребление, а также о высоком потенциале использования системы для достижения целей декарбонизации энергетического сектора.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии, система сертификации, атрибуты генерации, чистое энергопотребление, декарбонизация, энергопереход, ESG-стратегия, низкоуглеродные технологии.

Введение

Данный доклад посвящен российской системе сертификации происхождения электроэнергии в России как важному механизму, призванному содействовать энергетическому переходу путем достоверного подтверждения использования потребителями возобновляемых и низкоуглеродных источников энергии в условиях централизованного энергоснабжения. Актуальность этого вопроса обусловлена двумя основными обстоятельствами.

Во-первых, в условиях глобального энергоперехода и растущих требований к корпоративной ответственности компании нуждаются в надежных инструментах, которые позволяли бы им верифицировать свое чистое энергопотребление¹. Как показывает опыт стран,

¹ Термины «чистая генерация», «чистое энергопотребление» здесь используются исключительно для краткости и обозначают соответственно производство электроэнергии (генерацию) на основе возобновляемых источников энергии (с возможным включением атомной энергетики) и потребление электроэнергии, обеспеченное таким производством.

лидирующих в энергопереходе, наличие таких инструментов может стать мощным стимулом для развития чистой энергетики, в том числе притоку инвестиций в этот сектор.

Во-вторых, Россия традиционно занимает значительное место в глобальной энергетике, обладая огромным потенциалом как в области возобновляемых источников (гидроэнергия, ветер, солнце), так и в атомной энергетике. Создание национальной системы сертификации открывает возможности для «монетизации» этого потенциала путем привлечения на российский энергетический рынок крупных корпоративных потребителей, нуждающихся в сертифицированной чистой энергии.

Масштабный переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), сокращение использования ископаемого топлива – одно из главных направлений декарбонизации энергетического сектора. Согласно сценарному прогнозу энергоперехода, подготовленному Международным агентством по возобновляемым источникам энергии (IRENA), увеличение к 2050 году доли ВИЭ в структуре производства электроэнергии до 91% способно на 25% обеспечить сокращение выбросов парниковых газов (ПГ), требуемое для удержания роста глобальной температуры в пределах 1,5 °C к доиндустриальному уровню [1].

За десятилетие с 2013 года годовой объем инвестиций в возобновляемую энергетику вырос почти втрое и в 2023 году достиг рекордных 623 млрд долларов США [2]. Около 75% инвестиций с 2013 по 2020 год пришло в возобновляемую энергетику из частного сектора [3].

Роль корпораций в процессе энергоперехода трудно переоценить. В течение 2023 года компании по всему миру объявили о заключенных инвестиционных контрактах на строительство новой солнечной и ветряной генерации в рекордном объеме – 46 ГВт, что на 12% больше, чем в предыдущем году. Всего с 2008 года корпоративный сектор заключил таких сделок на 198 ГВт – это больше, чем суммарная установленная мощность в электроэнергетике таких стран, как Франция или Великобритания [4].

Для крупных компаний наличие корпоративной политики в отношении поддержки и использования чистой генерации давно стало мейнстримом. Обычно такая политика формулируется в составе ESG-стратегии (стратегии устойчивого развития) или аналогичного стратегического документа. Чаще всего она включает в себя добровольное принятие соответствующих обязательств, подкрепленных конкретными целевыми показателями. В первую очередь предметом таких обязательств становится энергопотребление самих компаний: они меняют структуру источников энергии, обеспечивая их собственное энергоснабжение, в пользу чистой генерации.

Немаловажным обстоятельством, отражающим стремление компаний к активным действиям в области энергопотребления и в то же время подвигающим к таким действиям,

является включение в большинство стандартов корпоративной нефинансовой отчетности климатических метрик, которые непосредственно отражают объемы чистого энергопотребления или рассчитываются на их основе. К числу последних относится прежде всего объем косвенных выбросов ПГ, связываемых с производством электроэнергии, которую организация получает из внешних источников и использует в своей деятельности. У многих компаний, особенно действующих в ИТ-индустрии и сфере услуг, на такие выбросы приходится значительная часть совокупных выбросов, включаемых в отчетность.

Показательным примером добровольных корпоративных действий в области энергопотребления является группа RE100. Это объединение крупных и средних компаний, принадлежащих различным секторам экономики, которые добровольно поставили себе целью переход на 100%-ное чистое энергопотребление. Точные сроки достижения цели различны у конкретных компаний, однако самый поздний из них не выходит за пределы 2050 года. Группа сформировалась в 2014 году и к настоящему времени насчитывает 433 участника. Их совокупное потребление электроэнергии превышает 500 ТВт·ч, что сопоставимо с потреблением такой страны, как Германия, и составляет более 1,5% от мирового производства электроэнергии.

Для достижения поставленных целей корпоративные потребители используют различные способы, в том числе строительство собственных объектов чистой генерации и прямые покупки электроэнергии у конкретных производителей, владеющих такими объектами. Первый способ, требующий значительных затрат времени и ресурсов, доступен далеко не всем компаниям, а потому относительно редок. Во всех остальных случаях возникает задача: достоверно подтвердить, что объемы потребления в точности обеспечены производством электроэнергии на определенном объекте, когда потребитель и производитель подключены к общей электросети, в которой, кроме них, имеется множество других производителей и потребителей.

Решение этой задачи и составляет суть и главную функцию систем сертификации происхождения электроэнергии. В таких системах используются специальные юридические объекты, именуемые атрибутами генерации и сертификатами происхождения электроэнергии (иногда их называют «зелеными сертификатами»), которые возникают исключительно в силу факта производства конкретного объема электроэнергии на конкретном объекте (энергоустановке, электростанции). Уполномоченная независимая организация на основании показаний приборов учета фиксирует этот факт и учитывает возникновение атрибутов генерации в едином реестре, зачисляя их на лицевой счет владельца объекта. Последнему предоставляется право передать атрибуты генерации заинтересованному потребителю по договору вместе с электроэнергией или отдельно – в форме сертификата происхождения

электроэнергии. Как возникновение атрибутов генерации, так и любая их передача подлежат учету в едином реестре и считаются юридически состоявшимися только тогда, когда в реестр внесена соответствующая запись.

Первые системы сертификации происхождения электроэнергии появились в начале 2000-х годов и быстро доказали свою эффективность, став общепризнанным механизмом, позволяющим достоверно обеспечивать и подтверждать чистое энергопотребление.

Сегодня они действуют в более чем 150 странах и юрисдикциях (штатах, провинциях и т. п.). Собственные национальные системы сертификации имеются практически у всех развитых стран. Крупнейшие из них – системы Китая (в 2024 году сертифицировано 4955 млн МВт·ч [5]), стран Европейского союза (ежегодно сертифицируется свыше 860 млн МВт·ч) и системы штатов США (в совокупности свыше 600 млн МВт·ч). Сравнительно молодая система Китая, созданная в 2017 году, бурно развивается: объем сертификации за 2024 год вырос более чем в 21 раз по сравнению с прошлым годом. Эти результаты выдвигают Китай в число мировых лидеров по объемам перехода на чистое энергопотребление. Есть системы сертификации и во всех остальных странах БРИКС, за исключением Ирана. Совокупный объем электроэнергии, ежегодно сертифицируемой в мире, стабильно растет на протяжении вот уже 20 лет. Это наглядно свидетельствует о постоянном росте спроса со стороны потребителей, обеспечивающих свои нужды за счет чистой генерации.

Российская система сертификации происхождения электроэнергии создана федеральным законом, который был принят в августе 2023 года. В федеральном законе «Об электроэнергетике» появились определения атрибутов генерации, сертификатов происхождения электроэнергии и низкоуглеродных генерирующих объектов, а также глава 7.1 «Атрибуты генерации и сертификаты происхождения электрической энергии», положения которой устанавливают правовые основы функционирования системы.

Система построена на тех же основных принципах, что и большинство систем сертификации в мире:

- все генерирующие объекты проходят предварительную квалификацию, то есть проверку на соответствие набору критериев, главным из которых является достоверное применение ВИЭ и (или) низкоуглеродной технологии выработки;
- атрибуты генерации учитываются на основании данных коммерческого учета электроэнергии в объеме, точно соответствующем фактической выработке;
- в едином реестре ведется полный и непрерывный учет возникновения атрибутов генерации и всех операций, совершаемых с ними и с сертификатами происхождения электроэнергии. Это позволяет исключить ошибки и злоупотребления, ведущие к

более чем однократному использованию прав, связанных с одними и теми же объемами чистой генерации;

- данные об использовании атрибутов генерации открыты и проверяемы, что дает всем заинтересованным лицам возможность убедиться в действительности чистого энергопотребления.

Постановлением от 28 декабря 2023 года № 2359 Правительство России утвердило Правила квалификации генерирующих объектов и Правила ведения реестра атрибутов генерации. Создана специализированная организация, уполномоченная проводить квалификацию генерирующих объектов, вести национальный реестр атрибутов генерации, выдавать сертификаты происхождения электроэнергии. Такой организацией (оператором реестра) является ООО «Центр энергосертификации» (ЦЭС, <https://green-e-track.ru>), 100%-ная дочерняя компания Ассоциации «НП Совет рынка».

Отсчет сертифицируемой выработки в российской электроэнергетике начался 1 февраля 2024 года – это момент начала работы системы. Участие в ней является добровольным как для производителей, так и для потребителей электроэнергии, а квалифицированы могут быть генерирующие объекты ВИЭ и атомные электростанции. Цены сделок, по которым передаются атрибуты генерации и сертификаты, государством не регулируются и в реестре не учитываются.

Первые результаты работы говорят о том, что система востребована участниками рынка.

На октябрь 2025 года основные показатели системы сертификации происхождения электроэнергии в России следующие:

1. Количество генерирующих объектов: 206 объектов суммарной мощностью 41,2 тысяч МВт, включая:

- 33,4 тысяч МВт крупных гидроэлектростанций (ГЭС);
- 4 тысячи МВт атомных электростанций (АЭС);
- 2 МВт солнечных электростанций (СЭС);
- 1,8 МВт ветровых электростанций (ВЭС).

2. Количество участников: 82.

3. Объем атрибутов генерации, учтенных в системе с начала работы: 166 миллиона МВт·ч.

4. Объем приобретенных инструментов сертификации: 64 миллиона МВт·ч атрибутов генерации, приобретенных непосредственно, а также удостоверенных сертификатами.

5. Количество компаний и граждан, использующих инструменты сертификации: 210 компаний и 964 граждан.

Эти показатели свидетельствуют о растущем интересе к системе сертификации и ее влиянии на рынок электроэнергии в России.

Заключение

Система сертификации происхождения электроэнергии, введенная в России в 2024 году, построена в соответствии с общепринятыми международными стандартами и лучшими практиками. Она уже продемонстрировала жизнеспособность и востребованность. Производители и потребители электроэнергии всё более активно выпускают и используют инструменты сертификации при переходе на чистое энергопотребление.

Система, позволяет российским компаниям выполнять свои климатические обязательства и участвовать в глобальном процессе энергетического перехода. Это особенно важно для крупных корпораций, ориентированных на ESG-критерии и требования международных инвесторов.

Дальнейшее развитие системы связывается с расширением сектора возобновляемой энергетики, повышением осведомленности потребителей о возможностях системы и ростом спроса на инструменты сертификации. Признание российских сертификатов на международном уровне может открыть дополнительные перспективы развития.

Таким образом, система сертификации становится механизмом, который может способствовать ускорению энергетического перехода в России и укреплению позиций российской экономики на мировых рынках.

Список литературы

1. IRENA (2022). World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. IRENA: Abu Dhabi, p. 16.
2. BloombergNEF (2024). Energy Transition Investment Trends 2024 (abridged).
3. IRENA (2023). World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. Vol. 1. IRENA: Abu Dhabi, p. 26.
4. BloombergNEF (February 13, 2024). Corporate Clean Power Buying Grew 12% to New Record in 2023. BloombergNEF Blog. <https://about.bnef.com/blog/corporate-clean-power-buying-grew-12-to-new-record-in-2023-according-to-bloombergnef>.
5. Liu Yukun (February 6, 2025). Green electricity certificates a boost to decarbonization. China Daily. <https://www.chinadaily.com.cn/a/202502/06/WS67a416aea310a2ab06eaa6b5.html>

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ РОССИИ

**ГЛАДЫШЕВА Т. Л., ГУРЬЕВА А.Ю., ДМИТРИЕВА Е.И., НОВИКОВА Н.Н.,
СУРАЕВА О.Н.** (Акционерное общество «Научно-технический центр Единой
энергетической системы»)

В представленной статье рассматривается комплексный подход к решению одной из наиболее актуальных проблем современной энергетики — декарбонизации производства электроэнергии в Российской Федерации. Особое внимание уделено анализу ретроспективных данных и прогнозных сценариев развития электроэнергетики в контексте выполнения международных обязательств в области снижения выбросов парниковых газов. Подробно исследуются структурные изменения в топливном балансе, динамика выбросов, а также потенциал низкоуглеродных источников энергии.

Ключевые слова: декарбонизация, генеральная схема, парниковые газы, углеродная нейтральность, низкоуглеродная энергетика, топливный баланс, электростанция.

Введение

Проблемы глобальных изменений климата остаются актуальными и регулярно обсуждаются в рамках крупных международных конференций. Многие страны мира взяли на себя обязательства по достижению углеродной нейтральности к 2030-2070 годам. Российская Федерация активно поддерживает мировые усилия по борьбе с изменением климата и выступает полноценной участницей международного климатического диалога. Основопологающим документом является Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК), принятая 9 мая 1992 года.

В 2015 году было принято Парижское климатическое соглашение [1] к РКИК, которое является заменой Киотского протокола, и ратифицировано Россией Постановлением Правительства РФ 21 сентября 2019 года № 1228 [2]. Согласно нормам Парижского соглашения, усилия государств должны сосредоточиться, в первую очередь, на борьбе по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу. Логичным продолжением политики нашего государства в области «низкоуглеродного» развития являлся Указ Президента РФ от 04.11.2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» [3], в котором определен национальный вклад в реализацию Парижского соглашения на уровне 2030 года и 2050 годов.

В Климатической доктрине РФ [4] обозначена долгосрочная цель — достижение углеродной нейтральности к 2060 году. В рамках этой цели предусматривается расширение доли безуглеродной генерации, а также сокращение выбросов парниковых газов от электростанций и котельных [5]).

На сегодняшний день опубликован Указ Президента РФ от 06.08.2025 №547 «О сокращении выбросов парниковых газов» [6], который установил следующий целевой показатель — снижение выбросов к 2035 году до 65–67% от уровня 1990 года.

1. Ретроспектива декарбонизации производства электроэнергии на электростанциях ЭЭС России

Значительное снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду и предотвращение опасных изменений климата могут быть достигнуты, прежде всего, за счет трансформации ключевых отраслей экономики, среди которых энергетика играет системообразующую роль. Энергетическая отрасль в настоящее время сталкивается с двойственным вызовом: с одной стороны, необходимо гарантировать надежное и бесперебойное удовлетворение растущих потребностей экономики и населения в электроэнергии, а с другой - кардинально снизить свое воздействие на климатическую систему.

На рисунке 1 представлены ретроспективные данные по суммарным выбросам парниковых газов РФ, энергетического сектора по методике МГЭИК и отрасли «электроэнергетика» без учета поглощающей способности лесов (ЗИЗЛХ). Выбросы парниковых газов от сектора «электроэнергетика» приняты в соответствии с данными утвержденной Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2042 года. Следует отметить, что валовые выбросы парниковых газов от электростанций, участвующих в покрытии потребности в электрической энергии, учитывают и выбросы электростанций промышленных предприятий. За период 2022-2023 годов валовый объем эмиссии парниковых газов «электроэнергетики» определен в рамках выполнения мониторинга Генеральной схемы в соответствии с приказом № 1340 Министерства энергетики РФ от 20.12.2022 «Об утверждении Правил предоставления информации, необходимой для осуществления оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике».

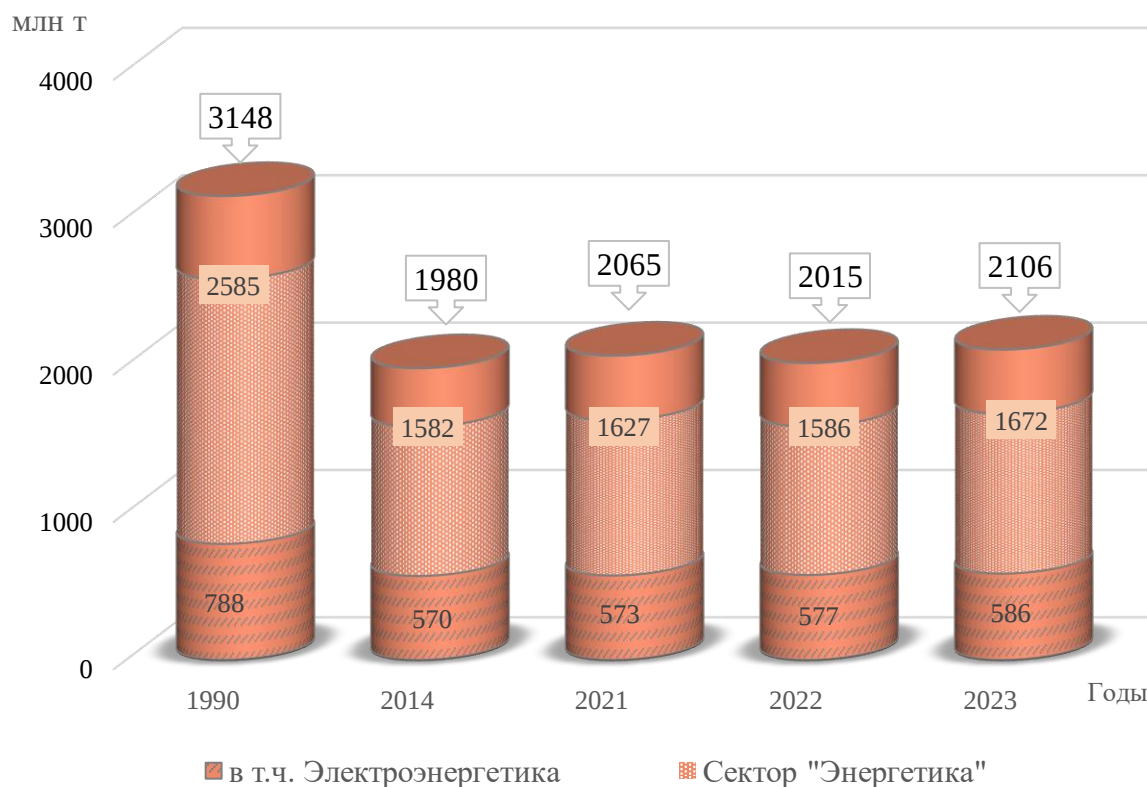


Рисунок 1 – Ретроспективные данные по выбросам парниковых газов

Примечания:

1. Использованы данные Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990-2023годы [7];
2. Понятие «Электроэнергетика» подразумевает производство электрической и тепловой энергии (в части производства тепловой энергии в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии).

Анализ данных, представленных на рисунке 1, позволяет констатировать, что суммарные выбросы парниковых газов сектора «Энергетика» в Российской Федерации к 2023 году составили 79,4 % от общего объема выбросов парниковых газов РФ, при этом на долю собственно «электроэнергетики» приходится лишь 27,8% от общего показателя по стране [7]. В этом контексте ключевым инструментом декарбонизации представляется планомерное увеличение доли низкоуглеродной генерации, включающей в себя как атомные станции, так и объекты так называемой «зелёной» энергетики - гидроэлектростанции, солнечные и ветровые электростанции, правовой статус которых закреплён в соответствующем Федеральном законе [8].

На рисунке 2 показана динамика изменения структуры производства электроэнергии по централизованной зоне электроснабжения Российской Федерации в ретроспективный период, что позволяет оценить произошедшие структурные изменения.

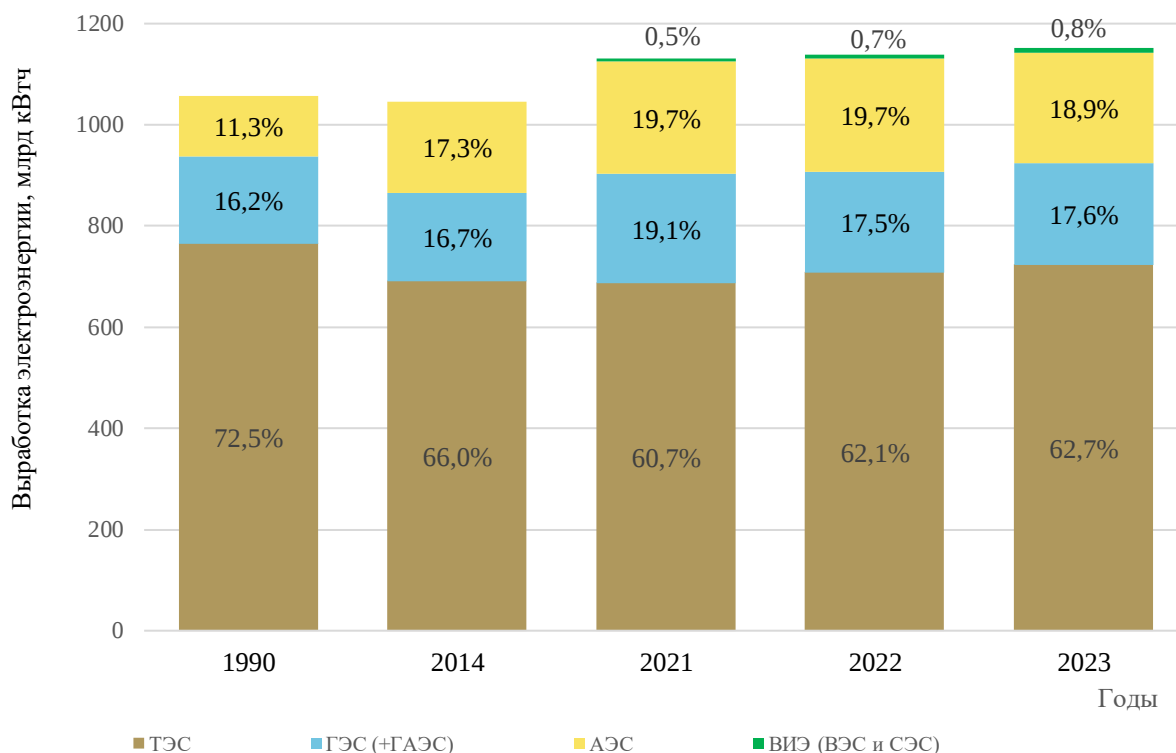


Рисунок 2 – Структура производства электрической энергии по централизованной зоне энергоснабжения РФ

С 1990 по 2023 год структура производства электроэнергии претерпела весьма заметные и в целом позитивные изменения. Наблюдается устойчивая тенденция к увеличению доли низкоуглеродной генерации, которая возросла с 27,5% до 37,3%. При этом отдельно стоит отметить рост доли атомных электростанций в структуре выработки электроэнергии с 11,3% до 18,9%. Доля тепловых электростанций за рассматриваемый период сократилась с 72,5% до 62,7%, что, безусловно, является положительным фактором.

Помимо структурных сдвигов в самой генерации, существенное влияние на снижение выбросов парниковых газов оказала глубокая трансформация топливного баланса тепловых электростанций (рисунок 3).



Рисунок 3 – Ретроспективная структура топливного баланса ТЭС централизованной зоны энергоснабжения РФ

Нефтьтопливо и уголь постепенно вытеснялись более экологичным видом топлива - природным газом, доля которого в топливном балансе ТЭС в 2023 году достигла 73%. Такая трансформация топливного баланса способствовала снижению удельных выбросов парниковых газов с 2041 кг/т у. т в 1990 году до 1942 кг/т у. т в 2023 году.

В совокупности суммарный объем выбросов парниковых газов к 2023 году снизился на 202 млн т относительно уровня 1990 года, что является весьма существенным результатом.

Стоит отметить, что доля прочего топлива за этот период увеличилась вдвое и составила 4%. Такое изменение в топливном балансе связано прежде всего с расширением участия станций промышленных предприятий в покрытии баланса мощности централизованной зоны электроснабжения РФ. Для более детального понимания сложившейся ситуации на рисунке 4 приведена структура прочего топлива, используемого на ТЭС.

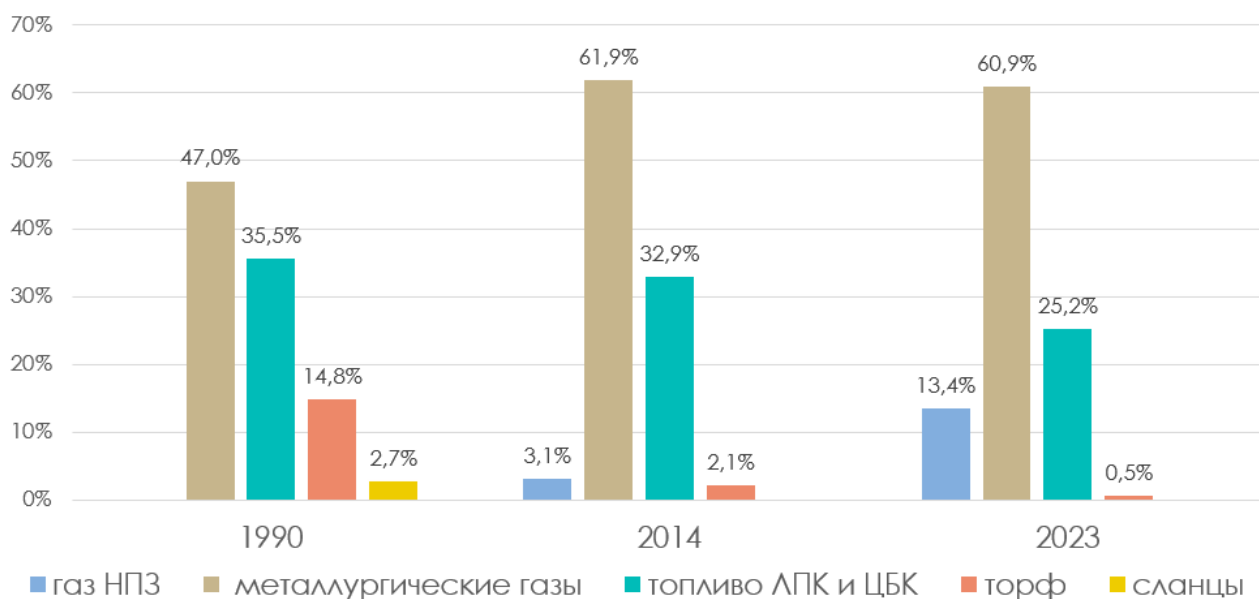


Рисунок 4 – Состав прочего топлива, используемого на ТЭС централизованной зоны энергоснабжения РФ

Сланец был полностью выведен из топливного баланса к 2014 году, а к 2023 году торф практически перестал использоваться, сохранив свою позицию лишь в качестве резервного топлива - их место уверенно занял природный газ. Хотя удельный вес топлива, характерного для лесопромышленных предприятий и целлюлозно-бумажных комбинатов, в общем топливном балансе уменьшился на 10,3%, объём его использования существенно не изменился.

Появление в структуре топливного баланса газа нефтеперерабатывающих заводов и его постепенное увеличение обусловлено как участием новых электростанций, так и внедрением технологической возможности для отдельных ТЭС использовать данный вид топлива. Параллельно наблюдается увеличение доли металлургических газов, что связано главным образом с ростом объёмов доменного газа (таблица 1). Однако именно доменный газ обладает наибольшим коэффициентом выбросов парниковых газов среди искусственных газов — 7,62 т CO_2 экв./т у. т. [9]. Таким образом, наблюдаемый рост доли доменного газа, с одной стороны, решает задачу утилизации побочных продуктов производства, но с другой — усложняет достижение целей по сокращению выбросов парниковых газов в электроэнергетике при отсутствии широкомасштабного внедрения технологий улавливания парниковых газов.

В таблице 1 представлена ретроспективная структура использования металлургических газов для производства электроэнергии.

Таблица 1.

Структура металлургических газов, сжигаемых на ТЭС, %

Наименование показателя	2014 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Металлургические газы, в том числе:	100	100	100	100	100
коксовый газ	35	32	31	30	30
доменный газ	65	68	69	70	70

В целях снижения углеродоёмкости электроэнергетики серьезное внимание необходимо уделить и процессам сжигания угля. В 2022-2023 гг. доля бурого угля в топливном балансе углей превысила 50%, а в 2024 году составила 53% (таблица 2), что объективно усиливает углеродную нагрузку на окружающую среду.

Таблица 2.

Структура угля, сжигаемого на ТЭС централизованной зоны энергоснабжения РФ, %

Наименование показателя	2014 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Всего угля, в том числе	100	100	100	100	100
каменный уголь	60	55	49	49	47
бурый уголь	40	45	51	51	53

Наибольшие удельные выбросы парниковых газов среди бурых углей характерны для бикинского, ерковецкого, назаровского и харанорского месторождений (3,150-3,308 т СО₂-экв/т у.т.), среди каменных – для нерюнгринских углей (2,867 -2,904 т СО₂-экв/т у.т.) [10]. Многие крупные ГРЭС работают именно на этом виде топлива. Хотя использование более калорийных каменных углей могло бы снизить выбросы, однако его применение ограничено техническими и экономическими факторами.

В этих условиях для успешной реализации Стратегии низкоуглеродного развития России требуется безотлагательная разработка и последующее внедрение эффективных, экономически оправданных мер по сокращению выбросов на угольных ТЭС, которые остаются значимым источником эмиссии.

2. Прогноз выбросов парниковых газов в атмосферу от электростанций централизованной зоны энергоснабжения РФ

При планировании развития электроэнергетики должны учитываться требования экологической безопасности, направленные на защиту атмосферного воздуха. В ходе

разработки актуальной Генеральной схемы до 2042 года проводилась комплексная оценка того, каким образом развитие электроэнергетики будет влиять на качество атмосферного воздуха, исходя из установленных нормативов допустимого воздействия.

На рисунке 5 представлена современная и прогнозная структура производства электрической энергии по централизованной зоне энергоснабжения РФ в сравнении с показателями 1990 года.

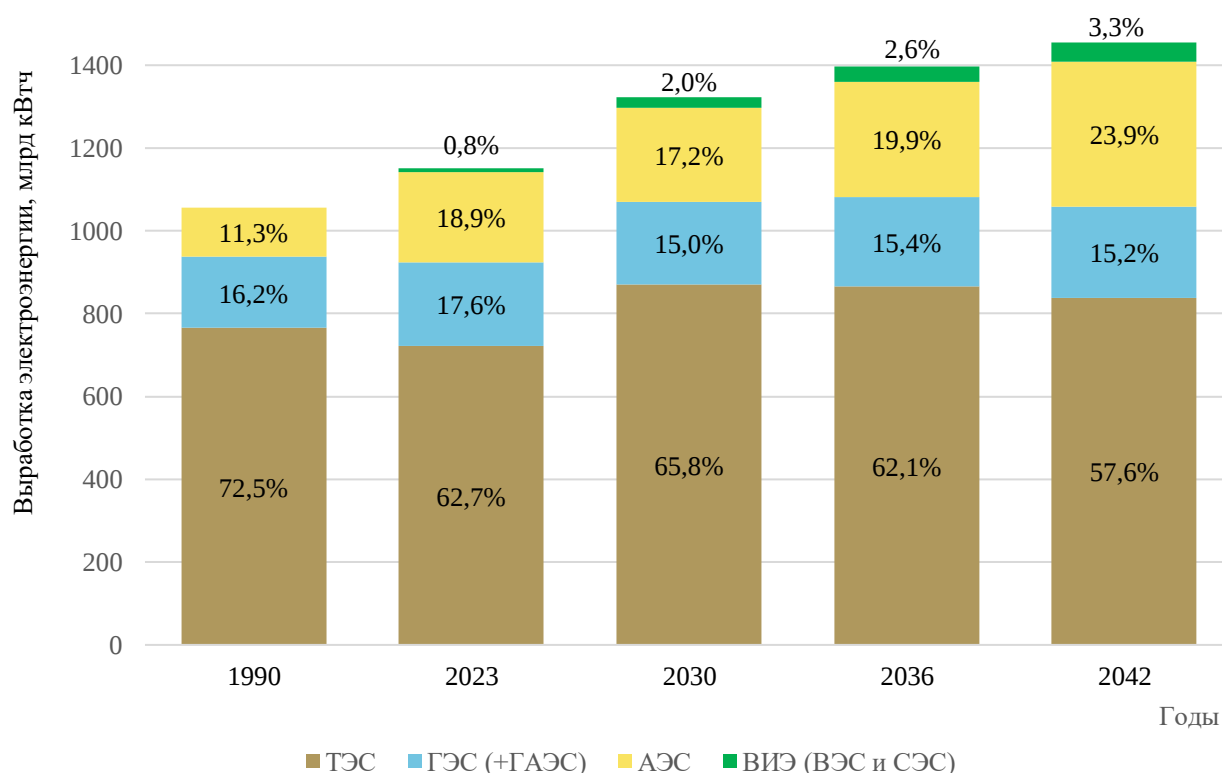


Рисунок 5 – Прогнозная структура производства электрической энергии по централизованной зоне энергоснабжения РФ

Анализ прогнозных данных позволяет утверждать, что вплоть до 2042 года тепловые электростанции будут оставаться основой электроэнергетики, обеспечивая более половины всего производства электроэнергии. В то же время, планируется дальнейшее увеличение доли выработки электроэнергии на низкоуглеродных станциях, и к 2042 году этот показатель достигнет 42,4%. Ожидается, что суммарный объем выбросов парниковых газов от электроэнергетики в целевом году составит 652 млн т.

Для более глубокого понимания будущих тенденций на рисунке 6 представлена структура топливного баланса ТЭС централизованной зоны энергоснабжения РФ по реперным годам долгосрочного прогнозного периода.

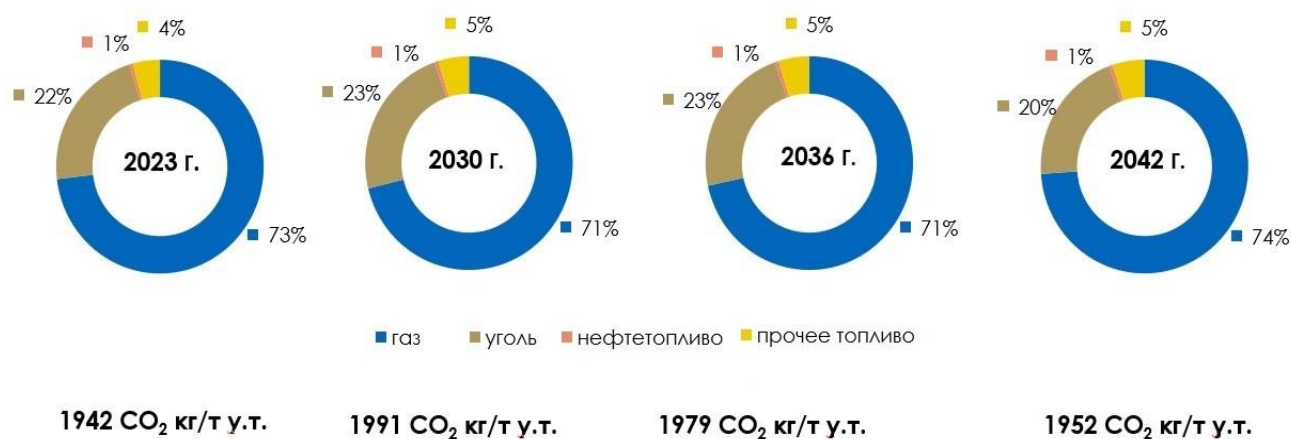


Рисунок 6 – Структура топливного баланса ТЭС централизованной зоны энергоснабжения РФ

Как следует из представленных данных, структура используемого топлива электростанциями в рассматриваемом периоде Генеральной схемы до 2042 года меняется незначительно: на долю газа приходится 71–74 %, на долю угля – 23–20 %, на долю нефтепродуктов и прочего топлива – порядка 5 %.

Расчеты показывают, что увеличение доли условно «чистого» топлива в структуре топливного баланса ТЭС на 16 % к 2042 году от базового 1990 года приведет к уменьшению удельного выброса парниковых газов всего на 4,4 %. Основным сдерживающим фактором для более существенного снижения выбросов парниковых газов является прогнозируемое увеличение объема бурых углей, сжигаемых на ТЭС централизованной зоны энергоснабжения РФ (таблица 3).

Таблица 3.

Прогноз структуры топливного баланса угля на ТЭС, %

Наименование показателя	2030 г.	2036 г.	2042 г.
Всего угля, в том числе	100	100	100
каменный уголь	48	45	43
бурый уголь	52	55	57

В Генеральной схеме до 2042 года предусматривается расширение некоторых крупных ГРЭС новыми энергоблоками, проектным топливом для которых является именно бурый уголь, что закрепляет его роль в энергобалансе на долгосрочную перспективу.

В таблице 4 приведена динамика выбросов парниковых газов за ретроспективный и прогнозный периоды централизованной зоны энергоснабжения РФ.

Таблица 4.

Динамика изменения выбросов парниковых газов

Наименование показателя	Факт			Прогнозный период			
	1990 г.	2021 г.	2023 г.	2025 г.	2030 г.	2036 г.	2042 г.
Выбросы парниковых газов, млн т	788	573	586	639	698	689	652
Отношение к базовому году, %	-	73	74	81	89	87	83

На рисунке 7 проиллюстрированы фактические и ожидаемые валовые объемы выбросов парниковых газов ТЭС, представленные в таблице 4.

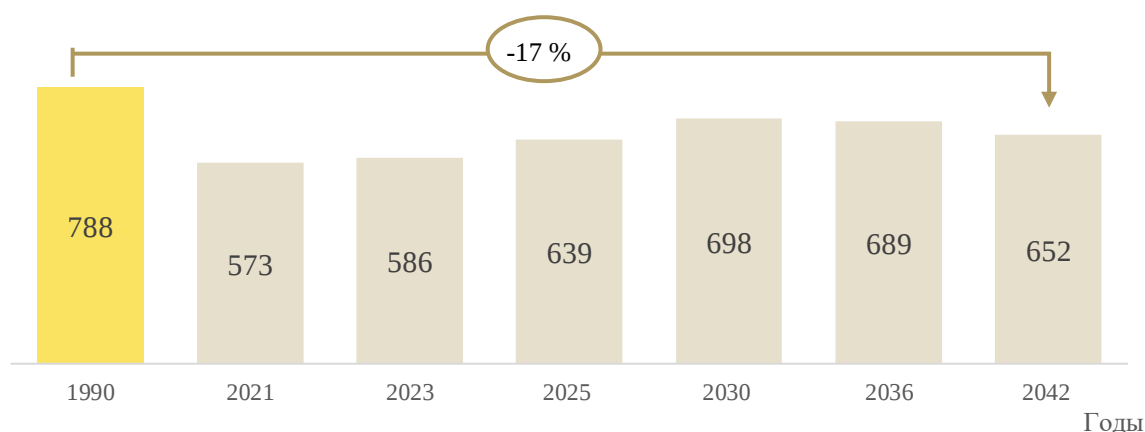


Рисунок 7 – Фактические и ожидаемые валовые объемы выбросов парниковых газов ТЭС, млн т.

К 2042 году прогнозируется снижение валовых выбросов парниковых газов на 17 % относительно уровня базового 1990 года при соответствующем увеличении выработки электроэнергии на 38 %.

На рисунке 8 представлена динамика удельных выбросов парниковых газов на единицу выработки электрической энергии электростанциями централизованной зоны энергоснабжения РФ.

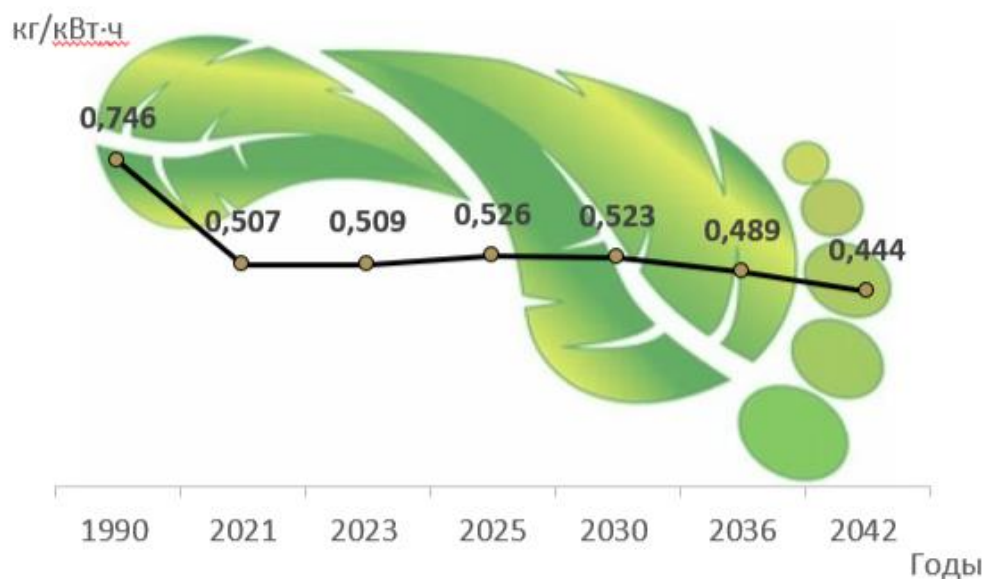


Рисунок 8 - Углеродный след электроэнергетики

Электроэнергетика сегодня имеет достаточно низкий углеродный след за счет большой доли АЭС и ГЭС, а также значительной доли газа в структуре топлива. Выбросы парниковых газов на единицу произведенной электроэнергии на уровне 2042 года прогнозируются примерно на 42 % ниже базового года.

Хотя на текущий момент наблюдается тенденция к снижению выбросов парниковых газов, в обозримом будущем она может измениться. К 2030 году прогнозные структуры мощностей и топливного баланса централизованной зоны энергоснабжения РФ позволят достичь целей «низкоуглеродного» сценария Стратегии социально-экономического развития РФ [5] без внедрения технологий улавливания и хранения CO₂ с учетом поглощающей способности.

В настоящее время нет нормативного документа, позволяющего определить долю поглощения, приходящуюся на каждую отрасль, в том числе и электроэнергетику. Поэтому для примера на рисунке 9 условно принято, что на электроэнергетику приходится та же доля от общей поглощающей способности РФ, какую она занимает в валовых выбросах парниковых газов на уровне 2021-2023 годов. Значение поглощающей способности лесов и других экосистем РФ на перспективу принята в размере 535 млн т в соответствии с данными [5].

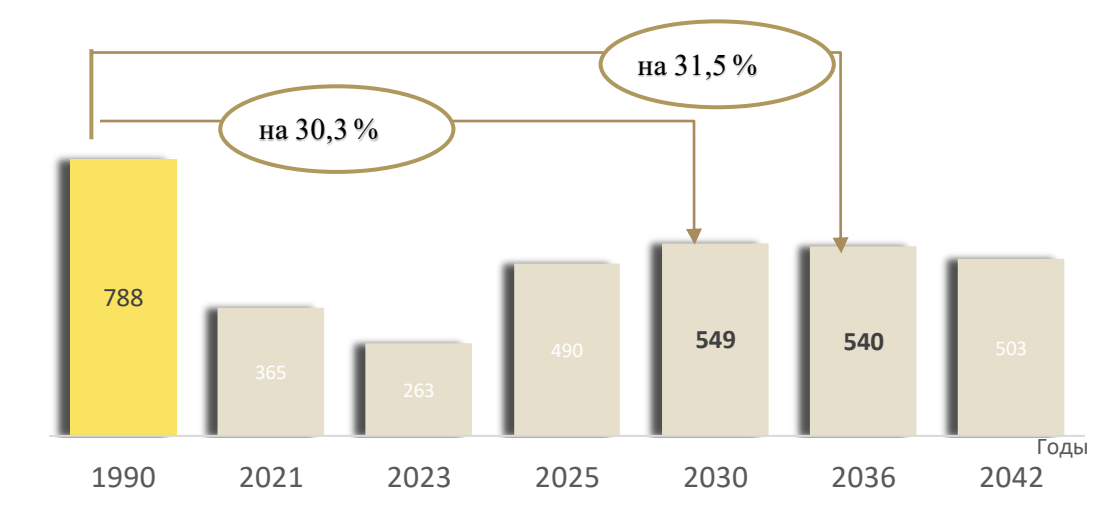


Рисунок 9 – Оценка валовых объемы выбросов парниковых газов ТЭС с учетом условной доли поглощения, млн т.

К 2035 году представляется проблемным достижение снижения эмиссии парниковых газов электроэнергетикой в соответствии с целевым показателем [6] с учетом поглощающей способности лесов и других экосистем.

Заключение

Проведенный анализ ретроспективных данных и прогнозных сценариев позволяет сделать вывод о том, что российская электроэнергетика проделала значительный путь в направлении декарбонизации. Достигнуто существенное снижение удельных выбросов, проведена масштабная газификация, увеличена доля низкоуглеродных источников энергии.

Стоящие перед страной цели, в частности, достижение углеродной нейтральности к 2060 году, требуют принятия дополнительных, более решительных мер. Существующие тенденции, включая планируемое сохранение значительной доли угольной генерации с растущей долей бурого угля, а также увеличение использования высокоуглеродных доменных газов, указывают на то, что эволюционного развития может оказаться недостаточно.

Таким образом, без реализации новых, активных мер, таких как форсированное развитие новых видов «чистых» источников энергии, широкое внедрение новых технологий сжигания топлива; применение экономически обоснованных технологий улавливания и захоронения CO₂ достижение провозглашенной цели углеродной нейтральности к 2060 году представляется затруднительным. Требуется консолидация усилий государства, науки и бизнеса, а также значительных инвестиций в исследования, разработки и модернизацию существующей энергетической инфраструктуры.

Список литературы

1. Парижское соглашение к Рамочной Конвенции об изменении климата, Париж, 2015 г.
2. Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2019 года № 1228 «О принятии Парижского соглашения».
3. Указ Президента РФ от 04.11.2020 г. №666 «О сокращении выбросов парниковых газов»
4. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 г. № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации».
5. Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 г. N 3052-р «О Стратегии социально- экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».
6. Указ Президента РФ от 06.08.2025 г. № 547 «О сокращении выбросов парниковых газов».
7. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2023 г, Росгидромет, 2025 г.
8. Федеральный Закон от 04.08.2023 г. №489-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике».
9. Приказ МинПрироды России от 27.05.2022 г. № 371«Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов».
10. **Росляков П.В., Скобелев Д.О., Доброхотова М.В.** Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации / Росляков П.В., Скобелев Д.О., Доброхотова М.В.// Уголь. – 2023 г. – № 9.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ КОТЛА ЦКС

РЯБОВ Г.А.¹, Д.Т.Н., АНТОНЕНКО Н.К.² (¹ Акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт (АО «ВТИ»), г. Москва. ² Филиал ПАО «ОГК 2» «Новочеркасская ГРЭС»)

Рассмотрены механизмы образования и подавления выбросов оксидов азота и серы в котлах с ЦКС. Показано влияние режимных параметров и характеристик топлива и сорбентов на концентрации этих загрязнителей. Обоснованы методические подходы к алгоритму расчета выбросов оксидов азота и окислов серы котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС.

Ключевые слова: циркулирующий кипящий слой, выбросы загрязняющих веществ, концентрации оксидов азота и серы, методика расчета

Введение

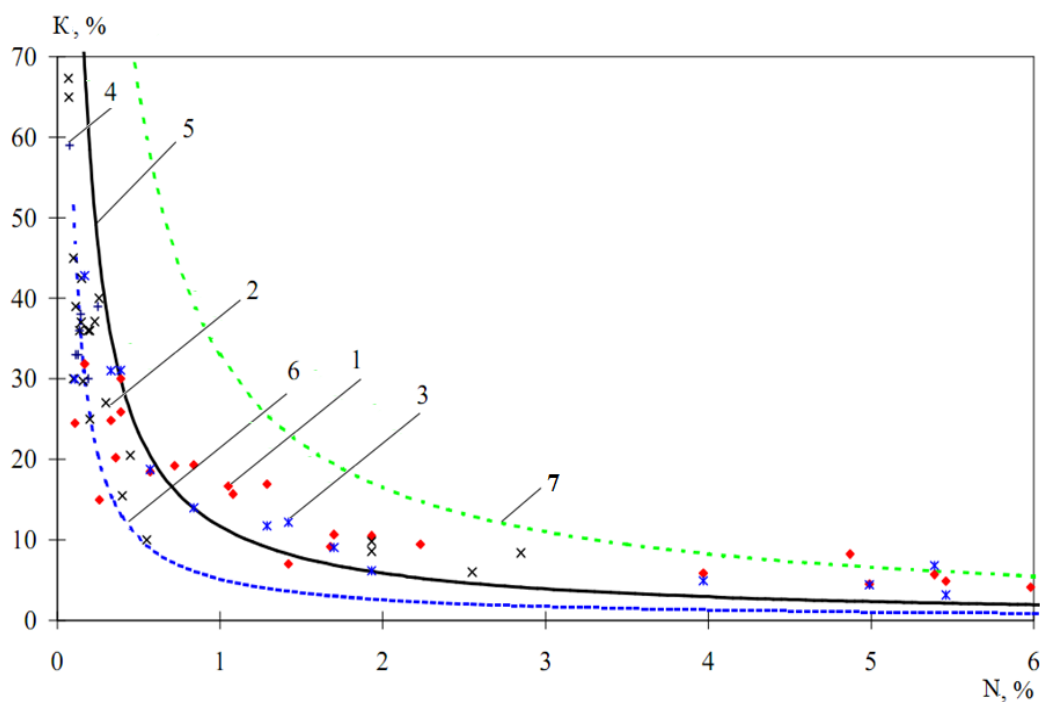
Характерной особенностью технологии сжигания твердых топлив в кипящем слое является наличие значительного количества инертного материала в топке. Циркуляция частиц позволяет эффективно сжигать такие низкорекреационные топлива, как антрацитовый штыб (АШ) при относительно низких температурах в топке (850–900 °С). Это обеспечивает низкие выбросы оксидов азота при организации ступенчатого подвода воздуха (менее 200–300 мг/нм³) без использования азотоочистки. Имеется возможность эффективного (более 90 %) связывания диоксидов серы путем относительно дешевого способа подачи известняка в топку, при оптимальной температуре слоя около 870 °С и длительном времени пребывания частиц известняка в реакционной зоне.

Эти особенности отличают котел с ЦКС блока № 9 от пылеугольных котлов Новочеркасской ГРЭС. В плане загрязняющих веществ методики и алгоритмы расчета выбросов оксидов азота и серы на основе материальных балансов заметно отличаются, тогда как методики расчета твердых частиц близки. Что касается методики расчета валовых выбросов на основе инструментальных замеров, то они практически совпадают с применяемыми для пылеугольных котлов. Поэтому наибольшее внимание следует уделить вопросам обоснования расчетов концентраций оксидов азота и окислов серы по материальным балансам с учетом физико-химических процессов в котлах с ЦКС.

Механизм образования оксидов азота при сжигании топлив в котлах с ЦКС

При сжигании топлив существуют 3 механизма образования оксидов азота: механизм Зельдовича (термические оксиды азота), механизм Фенимора (быстрые оксиды азота) и образование топливных оксидов азота из соединений азота в топливе. Первые 2 механизма проявляются при высоких температурах более 1500 °С. Поэтому для котла с ЦКС при температуре ниже 1000 °С они не рассматриваются.

На рисунке 1 приведены данные [1, 2] по влиянию содержания азота на сухую беззольную массу на степень конверсии азота топлива в NO.



1 – колосниковая решетка; 2 – топки различных видов; 3 – кипящий слой (КС);
4 – печь; 5–7 – расчетная степень конверсии.
 t , °С: 5 – 850; 6, 7 – 800; C_{O_2} , % по объему: 5, 7 – 10; 6 – 8.

Рисунок 1 – Зависимость степени конверсии азота топлива в NO от содержания азота на горючую массу

В [3] рассмотрены вопросы образования и подавления выбросов оксидов азота и закиси азота. В этой работе считается, что содержание азота в угле обычно составляет 1–2 % на горючую массу, и он поступает из летучих веществ и кокса. Возможные пути реакций образования NO из угля показан на рисунке 2. Предполагается, что топливный азот равномерно (50 %) распределен между углем и летучими веществами.

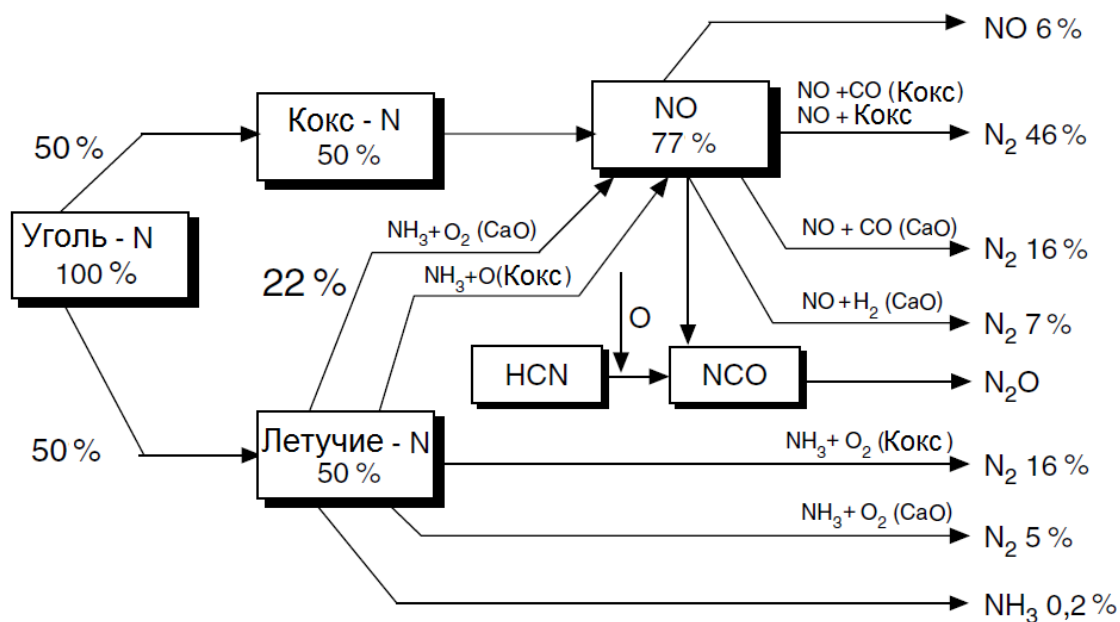


Рисунок 2 – Относительная важность (проценты от общего количества азота в топливе) различных путей реакции в образовании и восстановлении оксида азота по данным [3]

Летучий азот появляется в виде NH_3 или HCN . Аммиак (NH_3) может разлагаться до NO , катализируемого CaO или углем, в то время как HCN в первую очередь превращается в N_2O [4]. Примерно 77 % азота топлива окисляется до NO в результате вышеуказанных реакций [5], а остальная часть появляется в виде NH_3 , который, в свою очередь, частично превращается в азот. Таким образом, в результате ряда параллельных и последовательных реакций NO образуется путем окисления летучего азота [6]. Часть NO также восстанавливается обратно до азота. В [3] показано, что большое количество сложных химических реакций участвует в образовании и разрушении оксида азота либо из угля, либо из летучих веществ. Некоторые из этих реакций катализируются прокаленным известняком (CaO), отработанным известняком (CaSO_4) и углем. Наиболее полный список вероятных реакций и их констант скорости приводится в [5].

Представленный в [5] перечень реакций достаточно полно описывает процессы образования и подавления оксидов азота при сжигании твердых топлив в кипящем слое. Вместе с тем, скорости указанных реакций сильно зависят от температуры процесса, причем повышение температуры вызывает большее увеличение скоростей обратных реакций, чем прямых. Их направление и скорость также зависят от избытка и недостатка кислорода.

Необходимо отметить, что степень конверсии азота топлива в оксид азота для котлов с ЦКС примерно в 2 раза ниже, чем для котлов с КС [3]. Это связано с наличием большого количества несгоревших частиц в циркулирующем материале, а также с ступенчатым сжиганием топлива, при котором горение в слое происходит с недостатком кислорода. Таким

образом, для котла с ЦКС данные рисунка 1 по степени конверсии нужно уменьшить, по крайней мере, в 2 раза.

Анализ влияния свойств топлив на концентрацию оксидов азота в дымовых газах котлов с ЦКС [3, 7] показывает, что помимо основного источника — концентрации азота в топливе, на выбросы оксидов азота влияют выход летучих, доля азота летучих и кокса, размеры частиц и их пористость. Если влияние концентрации азота в топливе легко учитывается простым расчетом максимального выхода окиси азота, то другие характеристики топлива крайне сложно учесть. Вместе с тем качественные оценки имеются. Наиболее подробно они изложены в [7] на основе экспериментов на опытном котле мощностью 12 МВт в Университете г. Гетеборг. При этом сжигались бурые угли с высоким выходом летучих, каменные (битуминозные) угли и нефтяной кокс с малым выходом летучих. Особенно важны данные по нефтяному коксу, характеристики которого близки к антрацитовому штыбу (АШ), сжигаемому на котле с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС. Оказалось, что при характерных условиях сжигания при температуре в топке около 850 °С, избытке воздуха 1,25 и доле первичного воздуха около 0,7 степень конверсии азота в окись азота составляет для бурых углей около 4 %, а для нефтяного кокса — 2 %.

В результате анализа данных по механизму образования и подавления оксидов азота в котлах с ЦКС можно заключить, что использование степени конверсии азота топлива в NO по рисунку 1 (котлы с КС) нужно уменьшить в 2 раза, тогда для базового режима (температура в топке около 850 °С, избыток воздуха 1,25, доля первичного воздуха около 0,7) степень конверсии будет равна 6 %. Учитывая влияние летучих на выбросы NO_x, степень конверсии снижается еще в 2 раза. Тогда для котла с ЦКС блока № 9 при сжигании АШ степень конверсии топливного азота в NO равна 3 %.

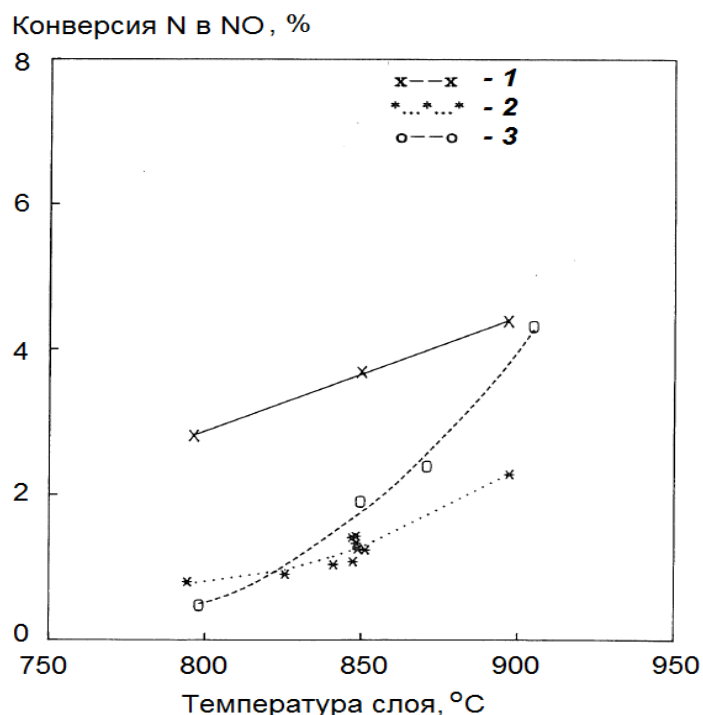
При расчете концентрации NO_x необходимо учесть и NO₂. Степень конверсии азота топлива в NO₂ примерно на порядок ниже. Многочисленные данные для пылеугольных котлов показывают, что NO₂ в общих выбросах составляет около 4 %. Для котлов с ЦКС это значение равно 3–7 % [3]. Примем в первом приближении, что для котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС доля NO₂ составляет 5 % от концентрации NO. В расчетах концентрации NO_x будем приводить их к NO₂:

$$\mu\text{NOX} = 1,53 \cdot \mu\text{NO} + \mu\text{NO}_2 \quad (1)$$

Влияние режимных параметров на образование оксидов азота

Образование NO_x зависит от температуры слоя, доли первичного воздуха, избытка воздуха на выходе из топки и мольного соотношения Ca/S. Наибольшее влияние оказывает

температура слоя. На рисунке 3 приведены данные [25] по влиянию температуры слоя на степень конверсии топливного азота в NO (избыток воздуха 1,2–1,25, доля первичного воздуха – около 0,7).



1 – бурый уголь; 2 – каменный уголь; 3 – нефтяной кокс.

Рисунок 3 – Степень конверсии топливного азота в NO в зависимости от температуры слоя [7]

Для малореакционного топлива (нефтяной кокс) при температуре 850 °C степень конверсии около 2 %, но с дальнейшим ростом температуры она резко увеличивается. Зависимость концентрации NO_x от избытка воздуха и температуры слоя по данным [3] приведена на рисунке 4. Она получена для сжигания каменных углей, а влияние температуры близко к приведенному на рисунке 5 для каменных и бурых углей. В этой же работе на примере изменения концентрации NO_x от температуры слоя при избытке воздуха 1,3 показан примерно линейный рост концентрации от температуры слоя.

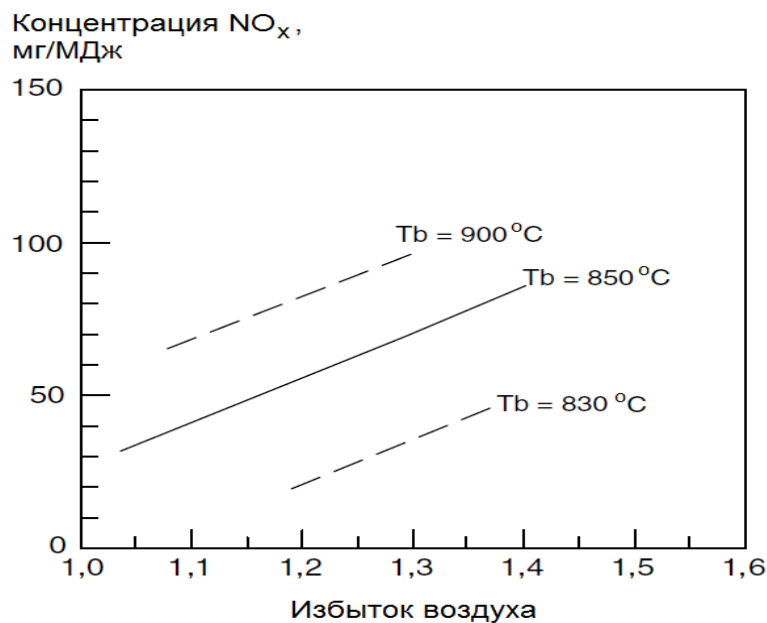
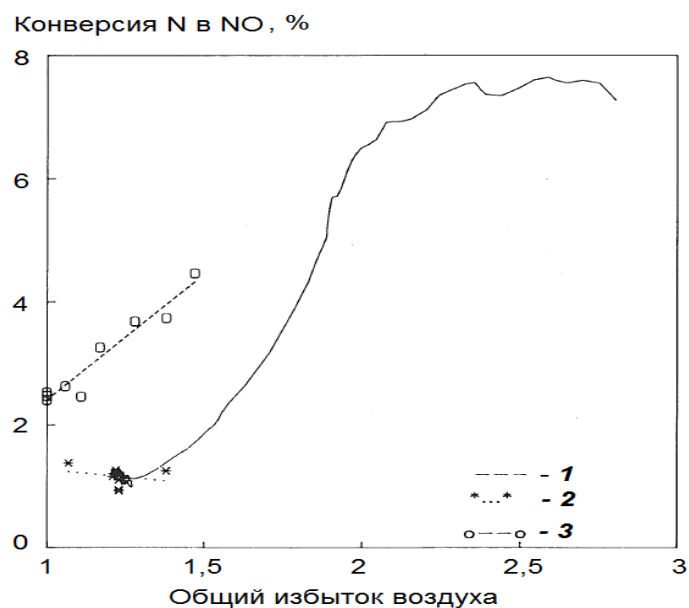


Рисунок 4 – Влияние избытка воздуха на выбросы оксидов азота при различных температурах слоя [3]



1 – бурый уголь; 2 – каменный уголь; 3 – нефтяной кокс, кривая как продолжение данных 1, 2 расчетная.

Рисунок 5 – Влияние избытка воздуха на степень конверсии азота топлива в NO по данным [7] (температура слоя около 850°C)

Как показано в [7], недостаток кислорода в слое способствует снижению степени конверсии азота топлива в NO , особенно заметный для нефтяного кокса.

Отечественные исследования, представленные в [8], проводились на установках небольшого диаметра и высоты (менее 3 м), в ряде случаев циркуляция материала была мала.

Это приводило к повышенным значениям концентраций NOX. Качественно наши данные вполне согласуются с приведенными выше зарубежными данными.

Общий подход к алгоритму расчета выбросов оксидов азота котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС

Предлагается построить алгоритм расчета следующим образом: установить степень конверсии азота топлива в NO₀ в базовом режиме (температура в топке около 850 °С, избыток воздуха 1,25, доля первичного воздуха около 0,7, без подачи известняка) равную 3 % и ввести к ней поправки на температуру слоя, общий избыток воздуха, долю первичного воздуха и добавку известняка (мольное отношение Ca/S). Концентрация NO₀ рассчитывается далее по простой балансовой зависимости, в которой расход NO делится на расчетный расход сухих дымовых газов при нормальных условиях и концентрации кислорода 6 %. Этот расход определяется характеристиками топлива, объемом продуктов сгорания на кг топлива, умноженным на его расход. В этом случае расход топлива сокращается, и формула приобретает следующий вид:

$$NO_0 = 2,143 \cdot 10000 \cdot N_T \cdot K_0 / V_T, \quad \text{мг/м}^3 \quad (2)$$

где 2,143 – отношение мольных масс NO к N (40/14); K₀ – степень конверсии азота топлива в NO (в долях); N_T – содержание азота в рабочей массе топлива, %; V_T – объем продуктов сгорания на кг топлива при нормальных условиях и концентрации кислорода 6 %, м³/кг, 10000 – пересчет значений NO₀ в мг/м³.

Объем продуктов сгорания на кг топлива при нормальных условиях и концентрации кислорода 6 % определяется по формулам [9], K₀ принимается равным 0,03. Для котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС величина V_T составит 8,85 м³/кг (для сухих газов 8,49 м³/кг).

Тогда в соответствии с формулой (2) величина NO₀ для базового режима и среднего содержания азота в топливе составит 50 мг/м³.

Важно определить поправки на отклонение режима от базового. Поправки определяются по отношению степени конверсии или отношению концентраций NO (NO_x) при различных температурах, избытках воздуха на выходе из топки, избытках воздуха в слое и добавке известняка (мольному отношению Ca/S). На рис. 6 приведены данные по величине поправки на температуру в топке. Они могут быть аппроксимированы линейной зависимостью:

$$K_T = 15 \cdot T/850 - 13,8 \quad (3),$$

где T – средняя температура в топке, °С, 850 – базовая температура, °С.

Формула (3) пригодна для диапазона температур 830–950 °С.

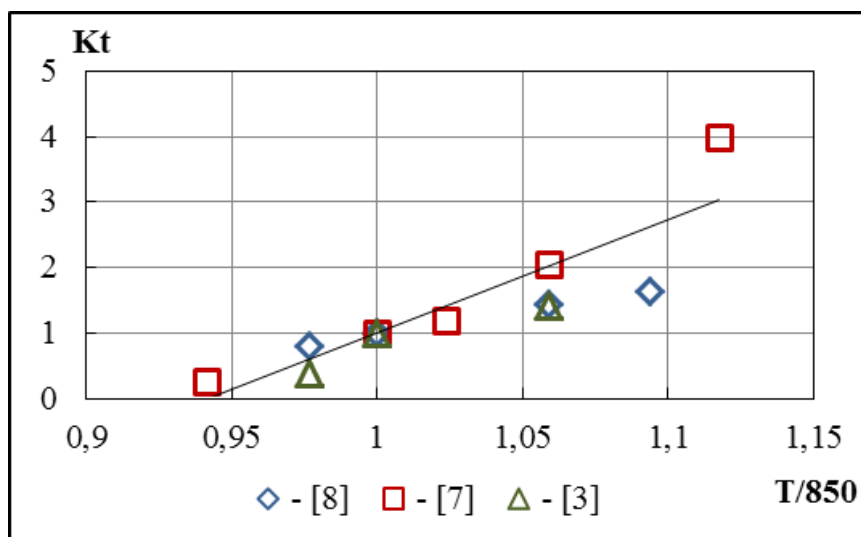


Рисунок 6 – Зависимость поправки на температуру в топке

Поправка на общий избыток воздуха показана на рисунке 7.

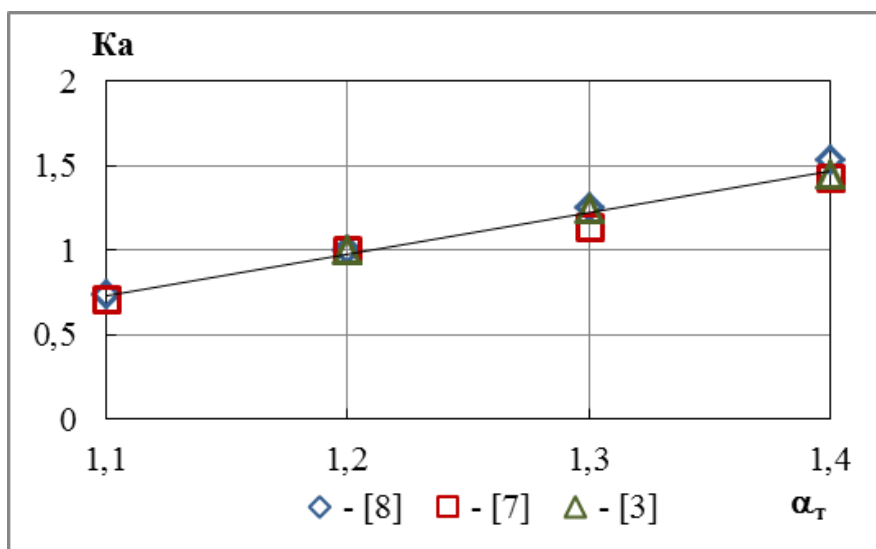


Рисунок 7 – Поправка на общий избыток воздуха в топке

В отличие от данных для поправки к температуре опытные точки лежат с небольшим разбросом от линейной зависимости:

$$K_a = 2,5 \cdot \alpha_t - 2 \quad (4)$$

Формула пригодна для диапазона избытков воздуха в топке 1,1–1,4.

Поправка на избыток воздуха в слое (отношение расхода первичного воздуха к теоретически необходимому) дана на рисунке 8. Несмотря на небольшое количество опытных точек, линейная зависимость дает небольшую погрешность расчета:

$$K_c = 1,67 \cdot \alpha_c - 0,17 \quad (5)$$

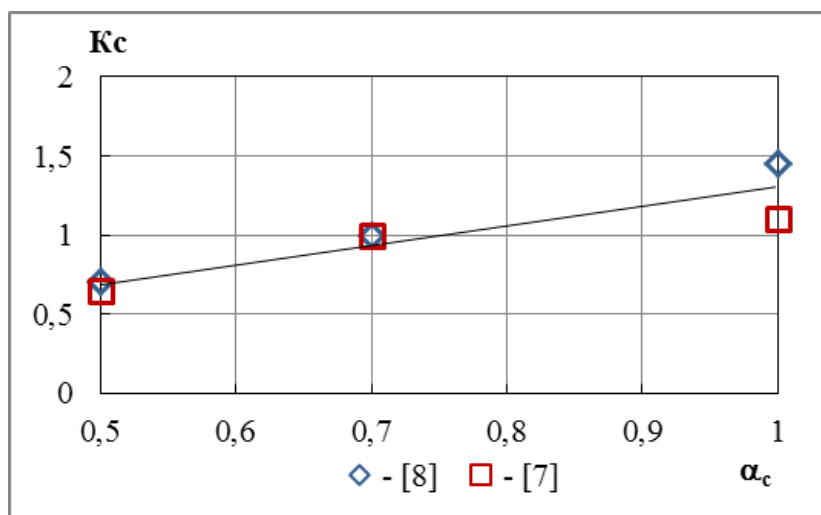


Рисунок 8 – Зависимость поправки на избыток воздуха в слое

Влияние известняка хорошо показано только в данных [8] (рис. 9).

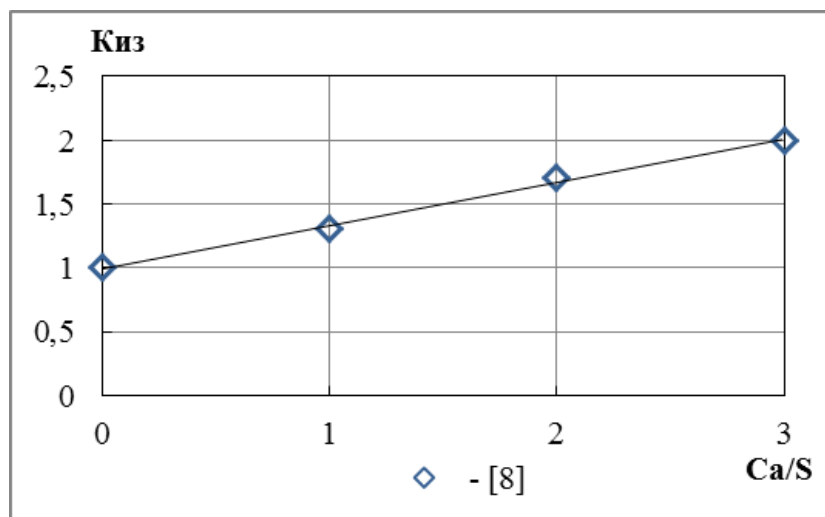


Рисунок 9 – Зависимость поправки на подачу известняка от мольного соотношения Ca/S

Формула для поправки на мольное отношение Ca/S следующая:

$$K_{из} = 1 + 0,33 \cdot Ca/S \quad (6)$$

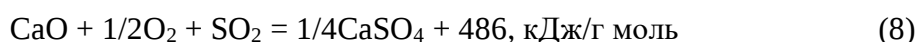
Произведение этих поправок на базовое значение дает концентрацию NO при нормальных условиях и содержании кислорода в дымовых газах 6 %. Как указывалось ранее, доля NO₂ примерно равна 5 % от NO, а концентрация NOX рассчитывается по формуле (1). Расчет валовых выбросов оксидов азота проводится умножением этих концентраций на расход дымовых газов, что закреплено в алгоритмах методик по расчету выбросов от котлов ТЭС, включенных в Перечень методик Минприроды [10].

Механизм образования диоксида серы при сжигании топлив в котлах с ЦКС

При горении угля в кипящем слое при температурах 800–950 °С сера топлива окисляется в основном до диоксида серы:



Минеральное вещество в угле может содержать некоторое количество оксида кальция, CaO, который может поглощать часть диоксида серы в виде сульфата кальция сразу после его выделения:



Остальная часть диоксида серы выбрасывается в атмосферу. Часть диоксида серы может быть преобразована в триоксид серы.



Образование триоксида серы зависит от времени пребывания газа, температуры, избытка воздуха и наличия каталитических поверхностей в печи. Реакции (9) благоприятствуют высокая температура и давление. Поскольку реакция медленная, только небольшая часть диоксида серы успевает превратиться в триоксид серы.

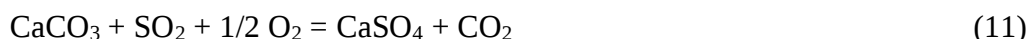
Главной для образования диоксида серы является реакция (7). Если вся сера топлива преобразуется в SO₂, то максимальная концентрация SO₂ составит:

$$(\text{SO}_2)_m = 2 \cdot 10000 \cdot S_r / V_r, \quad (10)$$

где 2,0 – отношение мольных масс SO₂ к S; S_r – содержание серы в рабочей массе топлива, %; V_r – объем продуктов сгорания на кг топлива при нормальных условиях и концентрации кислорода 6 %, кг/м³, 10000 – пересчет значений (SO₂) м в мг/м³.

Связывание диоксида серы известняком в котлах с ЦКС

Общая химическая реакция диоксида серы с известняком выглядит следующим образом:



Прямая реакция карбоната кальция с диоксидом серы (уравнение 11) при температурах слоя от 800 до 900 °С настолько медленная, что диоксид серы, поглощенный посредством прямой реакции с карбонатом кальция, незначителен. Поэтому реагирование фактически происходит в два этапа. Первый этап — это кальцинация, где известняк разлагается на CaO и CO₂ через эндотермическую реакцию:



Диоксид углерода, выделяющийся во время кальцинации, создает и увеличивает множество пор в известняке (рисунок 10), увеличивая поверхность для последующих реакций сульфатирования. Реакция кальцинирования (12) относительно быстрая. Например, кальцинирование частицы размером 0,5 мм займет около 50 секунд [3].

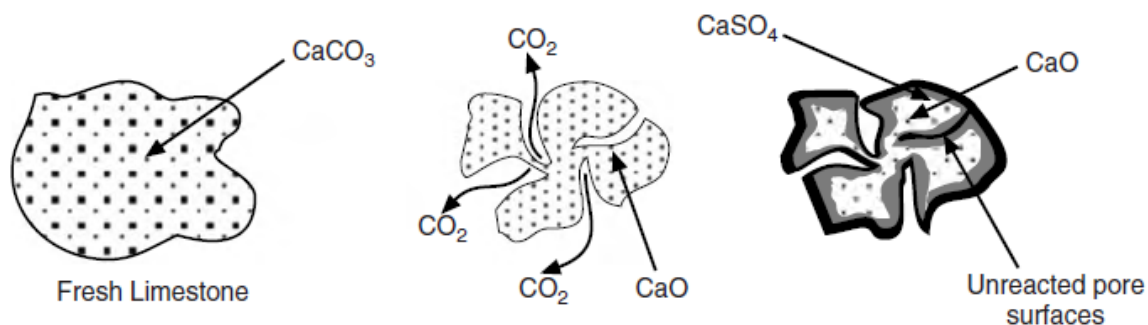
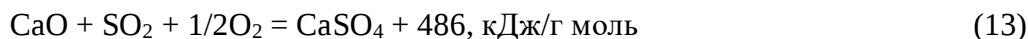


Рисунок 10 – Порообразование частиц известняка при прокаливании

Второй этап — сульфатирование, при котором оксид кальция поглощает диоксид серы, образуя сульфат кальция. Сульфат кальция — относительно инертное твердое вещество, которое легко утилизируется. Общая реакция выглядит следующим образом:



Эта реакция включает увеличение молярного объема (молярный объем $\text{CaO} = 16,9 \text{ см}^3/\text{моль}$, а молярный объем $\text{CaSO}_4 = 52,2 \text{ см}^3/\text{моль}$):



Реакция сульфатирования относительно медленная. Для прокаленной частицы размером 0,5 мм потребуется около 1200 секунд для завершения [3]. Поэтому, связывание серы в котлах с ЦКС заметно выше, чем в котлах с КС за счет значительно большего времени пребывания частиц в реакционной зоне.

Оксид кальция, полученный при прокаливании, не может быть полностью преобразован в сульфат кальция посредством вышеуказанных реакций. Реакции сульфатирования подразумевают увеличение объема твердой фазы. Один моль CaCO_3 производит 1 моль CaSO_4 . Однако при нормальных условиях один моль CaCO_3 занимает $36,9 \text{ см}^3$, в то время как 1 моль CaSO_4 имеет объем $52,2 \text{ см}^3$. Таким образом, поры и входы в поры этого сорбента закупориваются из-за большего объема продуктов реакции, накопленных до того, как внутренняя часть сорбента успеет полностью прореагировать (рис.10).

Следовательно, может быть использована только часть сорбента. По этой причине котельная установка с кипящим слоем должна использовать в два-три раза больше известняка, чем ей фактически необходимо для улавливания серы, и утилизировать такое же количество дополнительных твердых отходов.

Детальный анализ механизма связывания серы известняком представлен в [11]. Показано, что сульфат кальция в форме расплава образует корку на поверхности оксида кальция и резко снижает дальнейшее прохождение реакции. Поэтому обеспечить использование CaO вряд ли

возможно более чем на 40 %. Оптимальная температура находится вблизи 850 °С. Эти выводы хорошо соответствуют данным опытного сжигания трех российских углей [8] . Увеличение мольного отношения Ca/S более 2,5 мало влияют на дальнейшее снижение выбросов оксидов серы.

Характеристики известняка также могут оказывать влияние на процесс связывания диоксида серы. Основные характеристики известняка, которые влияют на улавливание серы: химический, петрографический и минеральный состав, физические свойства, такие как насыпная и частичная плотность, прочность на раздавливание, объем и размер пор, площадь поверхности, размер частиц, форма и твердость, данные по сульфатации и данные по истиранию.

Влияние характеристик сорбентов и режимных параметров на концентрацию диоксида серы в котлах с ЦКС

Эффективность улавливания серы в котле с ЦКС выше, чем в котле КС. Для данного типа топлива и сорбента снижение выбросов SO_2 из котла с ЦКС и степень использования сорбентов зависят от ряда конструктивных и эксплуатационных параметров, в том числе [3]: температура горения; расход циркулирующего материала; время пребывания газа/высота топки; давление в топке; характеристики пор; размер сорбента. Влияние этих физических параметров на использование сорбента кратко описано ниже.

Реакционная способность увеличивается с температурой, достигая оптимального значения при температуре около 800–850 °С [11], после чего она падает. Она падает, потому что с ростом температуры скорость сульфатирования быстро увеличивается, закупоривая поры оксидов кальция, что еще больше затрудняет использование сорбента.

Улавливание диоксида серы в котле ЦКС происходит в основном выше уровня подачи вторичного воздуха. Более длительное время пребывания SO_2 позволяет большей части CaO преобразоваться в CaSO_4 , но скорость сульфатирования пропорциональна концентрации диоксида серы. Следовательно, улучшение связывания с высотой топки экспоненциально затухает.

Сульфатация сорбентов, являясь относительно медленным процессом, зависит от времени пребывания твердых частиц в контуре котла с ЦКС. Чем дольше частица сорбента остается в контуре, тем больше степень ее превращения в CaSO_4 , в зависимости от ее максимального уровня сульфатации. Время пребывания твердых частиц и эффективность улавливания в циклонах взаимосвязаны. Чем эффективнее циклон, тем меньше размер циркулирующих частиц. Это позволяет более мелким частицам дольше оставаться в системе и, следовательно, участвовать в процессе сорбции. Преимущество использования более мелких сорбентов

очевидно, поскольку, они оставляют относительно небольшое не прореагировавшее ядро (на основе массовой доли) после сульфатирования. Вот почему котлам с ЦКС требуется соотношение Ca/S всего от 1,5 до 2,5 для улавливания 90 % серы, в то время как котлам с КС требуется соотношение от 2,0 до 3,5 для той же эффективности. Однако размер сорбента в котле с ЦКС нельзя значительно уменьшить, так как очень мелкие сорбенты проходят через циклон не улавливаясь.

Зола угля содержит CaO , который очень эффективно улавливает оксиды серы из угля. Поскольку CaO хорошо перемешан в угольной матрице, он легко реагирует с серой в угле при горении, образуя CaSO_4 . Количество этого кальция обычно невелико, но может быть высоким в угле с высоким содержанием золы и низким содержанием серы. Однако использование этого кальция очень высокое и иногда даже полное.

Повышенный избыток воздуха уменьшает зоны с дефицитом кислорода в слое, где восстанавливается CaSO_4 , высвобождая еще больше SO_2 . Таким образом, происходит лучшее улавливание оксидов серы при более высоком избытке воздуха.

Изложенное выше показывает крайне сложный характер связывания диоксида серы известняком. Это не позволяет создать полную модель эффективности связывания диоксида серы по причине многообразия свойств известняка, влияния температуры слоя и гидродинамических параметров циркуляционных контуров котлов с ЦКС. Поэтому предполагается использования прямых опытных данных, полученных на котле с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС по наиболее важному параметру – мольному отношению Ca/S .

В [12, 13] был представлен анализ работы котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС при подаче известняка. Выбросы SO_2 снижались в более чем 10 раз. Были выполнены оценки эффективности связывания диоксида серы. На рисунке 11 приведена зависимость степени эффективности связывания оксидов серы от мольного отношения Ca/S .

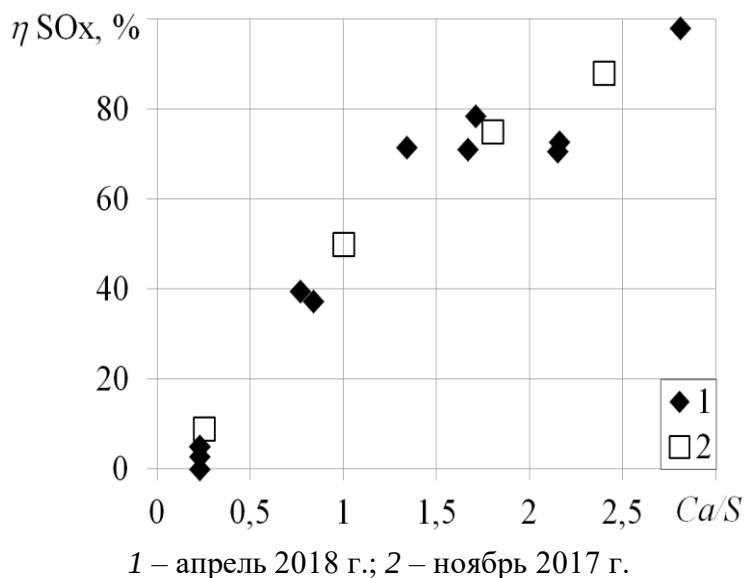


Рисунок 11 – Степень связывания оксидов серы в зависимости от соотношения Ca/S

В режимах без подачи известняка отношение Ca/S находится на уровне 0,2–0,3, а степень связывания 4–9 %. Наибольшие значения степени связывания серы относятся к режимам с пониженной нагрузкой и температурой слоя. Несмотря на значительные погрешности определения эффективности связывания оксидов серы и отношения Ca/S по усредненным значениям химического состава топлива, золы и известняка, все опытные точки легли на единую зависимость.

Фактически, эти данные учитывают не только реакции разложения известняка и связывания оксидов серы как таковые, но и условия эксплуатации с изменением температуры слоя и избытка воздуха.

Общий подход к алгоритму расчета выбросов диоксида серы котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС

Первоначально определяются максимальная концентрация SO_2 по формуле (22). Для усредненных значений содержания серы в топливе равно 1,07 % (0,0107) и значении V_r – 8,49 м³/кг (для сухих газов) максимальная расчетная концентрация $(\text{SO}_2)_m$ составит примерно 2500 мг/м³.

Мольное отношение Ca/S определяется по расходу известняка с учетом содержания в нем кальция (сумме кальция и магния). Как проектные данные, так и исследования свойств известняка дали близкие значения доли оксидов кальция и магния в известняке — в среднем 95 %. Исходя из мольных масс кальция и известняка в единице массы известняка содержится 0,4 кальция от его расхода. Необходимо также учесть содержание оксидов кальция и магния в топливе. Оно равно 2–2,5 % от расхода золы. С учетом средней зольности (22 %) и мольного

отношения кальция к оксиду кальция (40/56) доля кальция в топливе составит около 0,4 %. При содержании серы в топливе 1,07 % расход серы равен 0,0107 расхода топлива (В). Тогда мольное отношение Ca/S равно:

$$\text{Ca/S} = [(0,4 \cdot 0,95) / 0,0107] \cdot \text{В}_{\text{из}} / \text{В}_{\text{т}} + 0,4 / 1,07 = 35,5 \cdot \text{В}_{\text{из}} / \text{В}_{\text{т}} + 0,37 \quad (15),$$

где $\text{В}_{\text{из}}$ – расход известняка, кг/с; В – расход топлива, кг/с.

Концентрация диоксидов серы определяются по следующей формуле:

$$\text{SO}_2 = (\text{SO}_2)_{\text{м}} (100 - \eta_{\text{с}}) / 100, \text{ мг/м}^3 \quad (16)$$

где $\eta_{\text{с}}$ – эффективность улавливания диоксида серы по рис. 11.

Расчет валовых выбросов диоксидов серы производится умножением этих концентраций на расход дымовых газов.

Заключение

Для котлов с ЦКС пока еще не имеется узаконенной методики расчета выбросов загрязняющих веществ. Это важно прежде всего для первого в РФ котла с ЦКС блока № 9 от пылеугольных котлов Новочеркасской ГРЭС. В плане загрязняющих веществ методики и алгоритмы расчета выбросов оксидов азота и серы на основе материальных балансов заметно отличаются, тогда как методики расчета твердых частиц близки. Поэтому наибольшее внимание следует уделить вопросам обоснования расчетов концентраций оксидов азота и окислов серы по материальным балансам с учетом физико-химических процессов в котлах с ЦКС.

Рассмотрены механизмы образования и подавления выбросов оксидов азота и серы в котлах с ЦКС. Особое внимание уделено особенностям образования и подавления окиси и двуокиси азота в зависимости от содержания азота в топливе, выхода летучих и режимных параметров – температуры в топке, избытка воздуха в топке и в слое, а также подаче известняка. Предложены расчетные зависимости для определения поправок на режимные параметры.

На основе анализа литературных источников и результатов наладки котла при подаче известняка разработаны расчетные и графические зависимости, определяющие влияние концентрации диоксида серы от мольного отношения кальция к сере.

Обоснованы методические подходы к алгоритму расчета выбросов оксидов азота и окислов серы котла с ЦКС блока № 9 Новочеркасской ГРЭС. В ближайшее время будут проведены экспериментальные замеры концентраций оксидов азота и окислов серы на двух характерных нагрузках котла с целью подтверждения разработанной методики.

Список литературы

1. Winter, F. Formation and Reduction of Pollutants in CFBC: From Heavy Metals, Particulates, Alkali, NO_x, N₂O, SO_x, HCl [Text] / F. Winter // Proc. of Int. Conf. FBC-20, May 18 – 21 2009. – China, Xian, 2009. – pp. 43 – 48.
2. **Khalid El Sheikh, G. A. Ryabov, M. D. Khamid, T. V. Bukharkina, M. A. Hussain** Formation and suppression of NO_x and N₂O emissions during combustion in oxygen medium with CO₂ recirculation Thermal Engineering Vol. 67, No. 1, 2020. – pp 1 – 9.
3. **P. Basu**, Combustion and Gasification in fluidized bed 2006 by Taylor & Francis Group, LLC, p. 460.
4. **Moritomi, H. and Suzuki, Y.**, Nitrous oxide Formation Fluidized Bed Combustion Conditions, Proceedings of Seventh International Fluidization Conference, Brisbane, Potter, O. E. and Nicklin, D. J., Eds., United Engineering Foundation, Park Avenue, NY, pp. 495–507, 1992.
5. **Johnsson, J. E.**, A kinetic model for NO_x formation in fluidized bed combustion, Proceedings of 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Manaker, A., Ed., ASME, New York. – pp. 1112, 1989.
6. **Sarofim, A. F. and Beer, J. M.**, Modeling of fluidized bed combustion, in 17th Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute. – pp. 189–204, 1979.
7. **E. Amand and Bo Leckner**, Influence of Fuel on the Emission of Nitrogen Oxides (NO and N₂O) From an 8-MW Fluidized Bed Boiler, COMBUSTION AND FLAME 84: 181-196 (1991).
8. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике// Информационный сборник под общ. ред. В. Я. Путилова (разделы 1.5.1. и 1.5.2). – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 387 с.
9. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод) [Текст] / 3-е изд. перераб. и доп. - СПб.: Издательство НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
10. Распоряжение Минприроды России от 26 декабря 2022 № 38-р «Об утверждении Перечня методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками».
11. **Anthony, E.J.** Sulfation Phenomena in Fluidized Bed Combustion Systems [Text] /E.J. Anthony, D.L. Granatstein //Progress in Energy and Combustion Science. – 2001. – 27. – pp. 215–236.
12. **Рябов, Г.А.** Использование технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое в мире и в России / Г.А. Рябов, Е.В. Антоненко, И.В. Крутицкий, О.М. Фоломеев, А.В. Беляев // Электрические станции. – 2018. – № 3. – С. 11–17.
13. **G. Ryabov, D. Kuchmistrov, E. Antonenko, I. Krutitskiy, O. Folomeev, D. Melnikov, A. Beliaev**, The first year experience of once through CFB boiler operation of 330 MWe unit, Proc. of 23-rd Int. Conf. on FBC, Seoul, Korea, May 13-17, 2018, pp. 359 - 368.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА ВНЕДРЕНИЯ В ЧАСТНОМ СЕКТОРЕ ЭЛЕКТРООТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОАКОПИТЕЛЕЙ

КОРОТЧЕНКО В.В., К.Т.Н, МЕЗЕНЦЕВ Я.С. (Ассоциация «Некоммерческое партнерство Совет рынка по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью»)

В докладе рассматриваются перспективы внедрения электроотопительных систем с использованием теплонакопителей в частном секторе России. Анализируются преимущества данной технологии в условиях дифференцированных тарифов на электроэнергию, сравнение с альтернативными системами (конвекторами и сплит-системами), принцип работы теплонакопителей, география их применения, экономическая эффективность на примере Красноярска, экологические аспекты и будущие направления развития. Подчеркивается роль теплонакопителей в повышении энергоэффективности, снижении нагрузки на сети и интеграции с возобновляемыми источниками энергии, с учетом существующих проблем теплоснабжения и нормативных барьеров.

Ключевые слова: электроотопление, теплонакопители, энергоэффективность, дифференцированные тарифы, частный сектор, экологические аспекты, экономическая окупаемость, регионы России, умный дом, возобновляемые источники энергии.

В условиях сурового климата России и растущих тарифов на энергоносители поиск альтернатив традиционным системам отопления становится приоритетной задачей. Электроотопительные системы с использованием теплонакопителей представляют собой перспективное решение для частных домовладений, особенно в регионах с многотарифными системами учета электроэнергии. Эти устройства позволяют аккумулировать тепло в ночное время по сниженным тарифам и отдавать его днем, минимизируя затраты и нагрузку на электросети. В докладе анализируются преимущества данной технологии по сравнению с конвекторами и сплит-системами, исторический опыт применения электроотопления, принцип работы теплонакопителей, географические и экономические аспекты, экологические выгоды, а также перспективы развития с учетом нормативных изменений и пилотных проектов.

Перспективы и преимущества внедрения в частном секторе электроотопительных систем с использованием теплонакопителей представляют собой актуальное направление в области энергоэффективности. Эта тема особенно значима для России, где климатические условия требуют надежных и экономичных решений для отопления, а растущие тарифы на энергоносители стимулируют поиск альтернатив традиционным системам.

В докладе рассматривается, почему теплонакопители могут стать эффективным решением для частных домовладений, особенно в регионах с дифференцированными тарифами. Обсуждается сравнение технологий, принцип работы теплонакопителей, география применения, экономика, экологические аспекты, а также будущее этой технологии, с учетом анализа существующих проблем в теплоснабжении и опыта развития систем электроотопления.

Для начала рассмотрим эффективность применения систем электроотопления в регионах России. Сравнение трех популярных на сегодняшний день технологий - конвекторов, теплонакопителей и сплит-систем - выявляет их сильные и слабые стороны на фоне общих проблем теплоснабжения.

Конвекторы — это распространенная технология с простой конструкцией и легкой установкой. Однако они работают на высоком дневном тарифе и создают нагрузку на сеть в пиковые часы, в отличие от теплонакопителей, которые используют низкий ночной тариф, выравнивают суточный график нагрузки. Сплит-системы подходят для теплого времени года в качестве кондиционеров, но неэффективны при температуре ниже -15°C и не могут быть основным источником тепла, к тому же они тоже увеличивают нагрузку в пиковые часы.



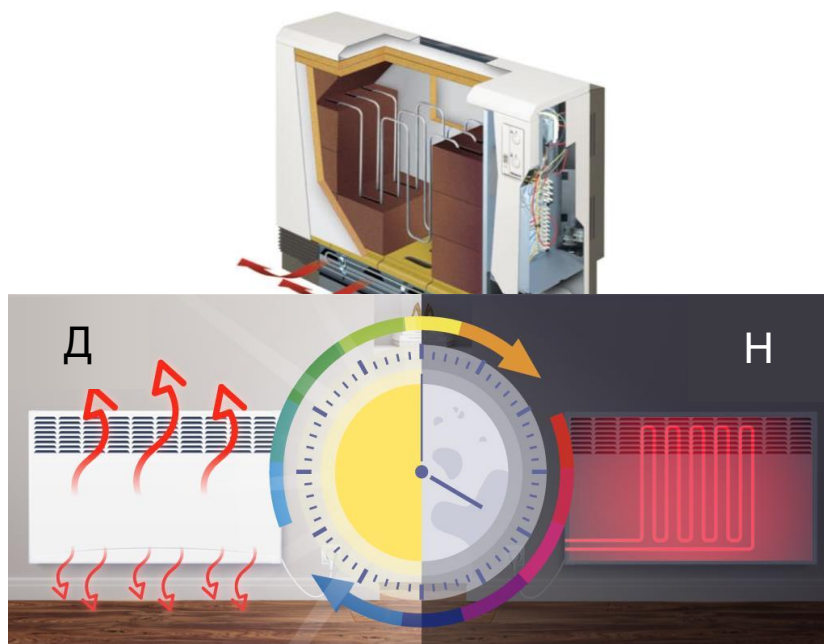
Рисунок 1 – Карта экономической эффективности: конвектор, теплонакопитель

Нужно сказать, что исторически электроотопление развивалось в 1990-х в регионах с избыточной энергией от ГЭС, как в Иркутской области и Красноярском крае. Сейчас электродотельные используются как пиковые или резервные в Мурманской области (197 Гкал/ч), Красноярске (559 Гкал/ч) и Иркутске (234 Гкал/ч), особенно где топливо дорогое [1]. Современные варианты включают домовые котельные с электродотлями и баками-аккумуляторами, сохраняющие водяные системы, или многоквартирные системы с конвекторами, теплыми полами и накопительными водонагревателями. Такие схемы применяются в высотных зданиях (более 25 этажей), избегая проблем зонирования и давления в водяных системах. Примеры: ЖК в Екатеринбурге, Тюмени, Абакане, Сочи и микрорайон в Смоленских

(Беларусь). Прямое электроотопление исключает потери в сетях, снижая затраты на инфраструктуру, особенно в южных регионах с коротким отопительным сезоном.

Рисунок 2. Схема устройства и принципа работы электрического теплоаккумулятора

Что же такое теплоаккумулятор и как он работает? Теплоаккумулятор - устройство, аккумулирующее тепловую энергию ночью по низкому тарифу и отдающее ее днем. Ночью электричество нагревает специальный теплоемкий материал внутри, днем тепло



высвобождается естественным образом или принудительно. Плюсы: экономия за счет ночного тарифа, отдача тепла днем без потребления, долговечность 15-20 лет, регулируемая отдача тепла. Минусы: капитальные вложения выше, чем у конвекторов, и эффективность зависит от многотарифной системы. Также в настоящее время отсутствует локализация производства в России и необходим дополнительный расчет пропускной способности сети.

Рисунок 3. Режим работы теплоаккумулятора: накопление тепла ночью (Н) и отдача днем (Д) по таймеру

Какова же география применения и где теплоаккумулятор работает лучше всего? На сегодняшний день это регионы с разницей одноставочного и ночного тарифов 60% и более — Хабаровский край (140%), Карелия (139%), Амурская область (127%) в которых можно обеспечить окупаемость теплоаккумуляторов за 5 лет по сравнению с централизованным отоплением. В Архангельской, Тюменской, Приморском крае разница превышает 100%. Эти регионы позволяют конкурировать с конвекторами за счет снижения эксплуатационных затрат.

Приведем пример экономики применения теплонакопителей для г. Красноярск. Исходные данные: площадь дома - 100 м², класса эффективности "B", удельная мощность 72 Вт/м², отопительный период 231 день, температура в помещении +24°C. Для конвектора капитальные затраты составят 22 тыс. руб., потребление 18,7 тыс. кВт·ч, тариф 4,58 руб./кВт·ч, годовая стоимость 85 тыс. руб. Для теплонакопителя капитальные затраты составят 132 тыс. руб., потребление 20 тыс. кВт·ч, тарифы 2,74 руб. (ночь) и 5,82 руб. (день), стоимость 57 тыс. руб., окупаемость около 3,5 года.



Рисунок 4 - Теплонакопитель в интерьере жилого помещения

График ниже показывает компенсацию затрат через 3-4 года, и в дальнейшем экономию за счет режима работы теплонакопителя.

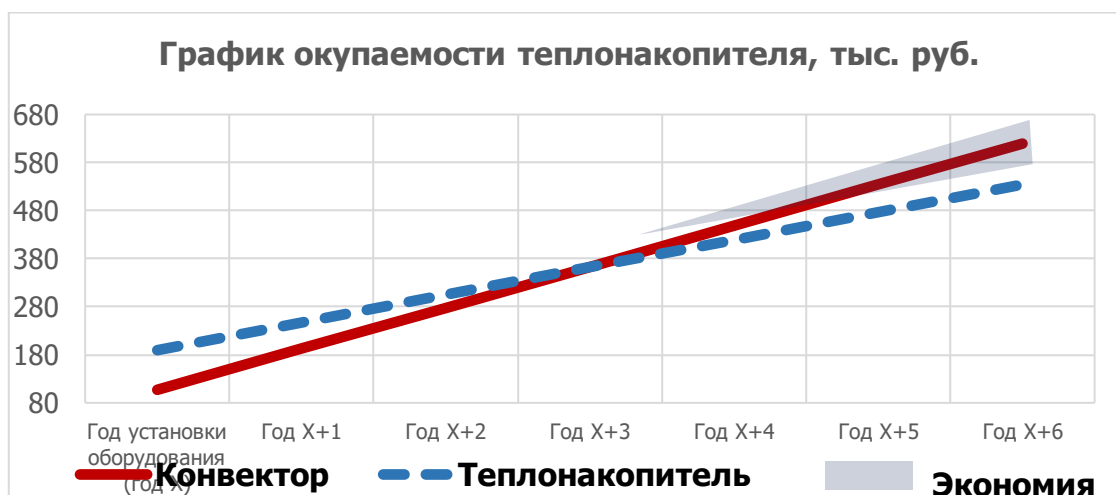


Рисунок 5 - График окупаемости теплонакопителя

Также теплонакопители положительно влияют и на экологию в регионе. Они выравнивают суточную нагрузку, снижая пиковые выбросы CO₂, могут быть интегрированы с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) [4], а также уменьшить загазованность в населенном пункте в пиковые часы. Например, перевод малых котельных и печного отопления

на электроотопление минимизирует вредные выбросы, особенно в таких городах как Красноярск, Улан-Удэ и др. [2]. Отсутствие открытого горения и наличие газа снижают риски возникновения аварийных ситуаций [3]. Простая интеграция со Smart-системами и системами "умный дом" делают использование теплонакопителей максимально комфортным для потребителей.

Что дальше? Какое будущее ждет теплонакопители? Уже сейчас понятно, что использование электротеплонакопителей это экономично: снижаются затраты при использовании дифференцированных тарифах, экологично: уменьшаются выбросы, выравнивается нагрузка ТЭЦ, технологично: интегрируются в системы "умный дом", реально: оборудование доступно на рынке. Использование электротеплонакопителей актуально для России особенно в регионах с низкими ночными тарифами. Существующие стереотипы, что это ненадежно и дорого, опровергаются расчетами: сети резервируемы, инерционность помещений сохраняет тепло, а современные технологии (конвекторы, теплые полы, многотарифные счетчики) обеспечивают сопоставимые расходы на теплоснабжение. Необходимы пилотные проекты в том числе под эгидой Минэнерго и Минстроя, изменения в нормативах (ПП РФ №154, №1600, №1178, СП 60.13330.2020) для стимулирования развития систем электроотопления в том числе с использованием электротеплонакопителей.

Внедрение электроотопительных систем в том числе с электротеплонакопителями в частном секторе - шаг к энергоэффективному будущему России. Преимущества в экономике, экологии и технологиях, подтвержденные расчетами и примерами, делают технологию альтернативой существующим централизованным системам теплоснабжения.

Заключение

Внедрение электроотопительных систем с теплонакопителями в частном секторе открывает путь к энергоэффективному и устойчивому будущему для России. Эта технология сочетает экономические преимущества (снижение затрат за счет ночных тарифов и быструю окупаемость), экологические выгоды (выравнивание нагрузки на сети, снижение выбросов CO₂ и интеграцию с ВИЭ) и технологический комфорт (совместимость с системами "умный дом"). Опровергнув стереотипы о ненадежности и дороговизне, расчеты и примеры подтверждают конкурентоспособность теплонакопителей по сравнению с централизованным отоплением. Для дальнейшего развития необходимы пилотные проекты под эгидой Минэнерго и Минстроя и стимулирование локализации производства в России.

Список литературы

1. Доклад о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 году, ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России.
2. Федеральный закон от 26.07.2019 № 195-ФЗ «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха», распоряжение Правительства РФ от 07.07.2022 № 1852-р «Об утверждении Перечня городских поселений и городских округов с высоким и очень высоким загрязнением атмосферного воздуха, дополнительно относящихся к территориям эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ».
3. Взрывы бытового газа в жилых домах в России в 2022–2023 годах. URL: <https://ria.ru/20230209/gaz-1850710501.html>
4. Polar Night Energy. Sand Battery. URL: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО СПРАВОЧНИКА ПО НАИЛУЧШИМ ДОСТУПНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ИТС 38-2024 «СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА НА КРУПНЫХ УСТАНОВКАХ В ЦЕЛЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ» ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КЭР

РОСЛЯКОВ П.В. (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия)

Рассмотрены особенности применения справочника ИТС 38-2022 при оформлении комплексных экологических разрешений и разработке программ повышения экологической эффективности. Проведен анализ эволюции ИТС 38 при проведении его актуализаций. Даны рекомендации по оценке учёта выбросов золы твёрдого топлива и пояснения различия между модернизацией и вводом нового оборудования. Обсуждаются сложности соблюдения требований при сжигании высокосольных углей и механизм временно разрешённых выбросов для устаревшего энергетического оборудования. Предлагаются изменения по технологическим показателям выбросов золы твердого топлива в случае сжигания высокосольных экибастузских углей, меры по гибкости нормативов, усилению поддержки, автоматизации мониторинга, постоянному обновлению НДТ и учёту социально-экономических факторов, чтобы обеспечить ускоренную и устойчивую модернизацию теплоэнергетики и снижение экологической нагрузки.

Ключевые слова: маркерные загрязняющие вещества, технологические показатели выбросов, наилучшие доступные технологии (НДТ), ТЭС, крупные топливосжигающие энергетические установки (КТЭУ), комплексные экологические разрешения (КЭР), программа повышения экологической эффективности (ППЭЭ)

Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ) ИТС 38 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» [1] в настоящее время является ключевым механизмом перехода российской теплоэнергетики к современным принципам экологического регулирования и устойчивого развития. ИТС 38 обеспечивает комплексную нормативную, методическую и технологическую базу природоохранной деятельности на ТЭС, ориентирует энергетические компании на планомерное снижение загрязнения атмосферы путем внедрения НДТ, стимулирует инвестиции в экологическую модернизацию и повышение энергоэффективности основного и вспомогательного оборудования.

ИТС 38 уже выдержал три редакции соответственно в 2017, 2022 и 2024 г.г. В первой редакции ИТС 38-2017 была представлена комплексная систематизация НДТ в российской теплоэнергетике, направленная на интеграцию международного опыта (BREF) и отечественных реалий, предложены базовые технологические показатели по выбросам маркерных загрязняющих веществ (ЗВ), которые, однако, не были утверждены приказом Минприроды России.

ИТС 38-2022 ввел дифференциацию экологических требований в зависимости от сроков ввода оборудования в эксплуатацию, типа топлива, наличия современных газоочистного оборудования. Данная редакция стала основным нормативным и методическим документом для теплоэнергетических компаний при подготовке заявок на получение комплексных экологических разрешений (КЭР) и разработки программ повышения экологической эффективности (ППЭЭ). В ней также определена связь с экономическими и эксплуатационными ограничениями, что отразило реалии действующих российских ТЭС.

В ИТС 38-2024 на основе бенчмаркинга определены индикативные показатели удельных выбросов парниковых газов для разных типов ТЭС в зависимости от вида используемого топлива, которые являются ориентирами достижения углеродной нейтральности в углеродоемких отраслях промышленности.

В настоящее время в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 10.06.2022 № 1537-р проводится актуализация ИТС 38-2025 в части установления специальных показателей для энергоблоков, использующих в качестве основного топлива экибастузский уголь.

Следующая, плановая актуализация справочника Распоряжением Правительства РФ от 30.07.2025 г. №2044-р назначена на 2029 г.

Таким образом каждая последующая редакция ИТС 38 являлась основой для повышения экологической безопасности и модернизации теплоэнергетики, направленной на устойчивое и экологически ответственное развитие. Основными разделами справочника являются определение перечня маркерных ЗВ, выбросы которых на ТЭС подлежат контролю и учету, утвержденные значения технологических показателей (ТП) выбросов маркерных ЗВ, рекомендуемый перечень НДТ, внедрение которых позволяет обеспечить выбросы ЗВ ниже установленных ТП.

На начало сентября 2025 г. 95 российских ТЭС, отнесенных к I категории по негативному воздействию на окружающую среду (НВОС), получили КЭР, из них с ППЭЭ – 22 ТЭС.

При практическом использовании действующей редакции справочника ИТС 38 в рамках подготовки заявок на КЭР и разработки ППЭЭ теплоэнергетические предприятия столкнулись с рядом особенностей и проблемами, которые следует пояснить особо.

Так к маркерным ЗВ, поступающими в атмосферный воздух с дымовыми газами ТЭС, наряду с оксидами азота NOX, диоксидом серы SO₂ и монооксидом углерода CO, отнесена «зола твердого топлива». Данное определение ЗВ принято в соответствии с «Перечнем загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного

регулирования в области охраны окружающей среды», установленного Распоряжением Правительства РФ от 20.10.2023 № 2909-р.

Однако в Санитарных правилах и нормах СанПиН 1.2.3685-21 [2] в перечне предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений, на основании которых для объектов негативного воздействия рассчитываются предельно допустимые выбросы (ПДВ) с использованием ПДК, отсутствует загрязняющее вещество «зола твердого топлива».

В то же время в СанПиН 1.2.3685-21 установлены ПДК и классы опасности для таких ЗВ, как «Зола сланцевая» (поз. 262 в табл.1.1), «Пыль неорганическая (зола), содержащая двуокись кремния 70-20 %» (поз. 469 в табл. 1.1), «Угольная зола теплоэлектростанций (с содержанием окиси кальция 35 - 40%, дисперсностью до 3 мкм и ниже не менее 97%)» (поз. 552 в табл. 1.1). Кроме того, для ЗВ «Зола углей Подмосковского, Печорского, Кузнецкого, Донецкого, Экибастузского, марки Б1 Бабаевского и Тюльганского месторождений (с содержанием SiO_2 свыше 20 до 70%)» (поз. 653 в табл. 1.2) дан ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ) ЗВ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. В результате на некоторых угольных ТЭС возникли проблемы при утверждении ПДВ территориальными органами Росприроднадзора

Известно, что содержание окиси кальция CaO существенно различается в золе бурых (10-42%) и в золе каменных (2-5%) углей. При этом содержание окиси кремния SiO_2 больше в золе каменных углей (30-60%), чем в золе бурых углей (30-40%). В этой связи для контроля и учета выбросов ЗВ можно использовать следующее определение «золы твердого топлива»:

- зола бурых углей: содержание окиси кальция CaO 35-40%; $\text{ПДК}_{\text{мр}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$; $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,02 \text{ мг/м}^3$; класс опасности 2 (в соответствии с поз. 552 в табл.1.1 СанПиН 1.2.3685-21);
- зола каменных углей: содержание окиси кремния SiO_2 70-20%; $\text{ПДК}_{\text{мр}} = 0,3 \text{ мг/м}^3$; $\text{ПДК}_{\text{сс}} = 0,1 \text{ мг/м}^3$; класс опасности 3 (в соответствии с поз. 469 в табл. 1.1 СанПиН 1.2.3685-21).

Следующей особенностью справочника является то, что ИТС 38-2024 единственный отраслевой справочник по НДТ, в котором значения технологических показателей выбросов маркерных ЗВ установлены для действующих крупных топливосжигающих установок (КТЭУ) в зависимости от «сроков ввода оборудования в эксплуатацию» (см. табл.1) [3]. Это объясняется подавляющей долей (около 90%) основного и вспомогательного оборудования, введенного в эксплуатацию до 2001 г. по достаточно старым проектам без применения современных воздухоохраных мероприятий и НДТ. При этом под «оборудованием»

понимается: «котел» для технологических показателей выбросов SO₂ (в случае отсутствия сероочистки), NO_x и CO; «золоуловитель» для технологических показателей выбросов золы твердого топлива и «установка сероочистки» (при наличии) для технологических показателей выбросов диоксида серы.

Поэтому технологические показатели выбросов маркерных ЗВ для КТЭУ в целом устанавливаются по последней дате ввода в эксплуатацию как основного, так и вспомогательного «оборудования». Таким образом установка на действующих КТЭУ, введенных в эксплуатацию до 31.12.2000 г., например, новых золоуловителей (электрофильтров или рукавных фильтров) после 1.01.2001 г. автоматически переводит данное «оборудование» в следующую возрастную группу с соответствующими более жесткими технологическими показателями выбросов золы твердого топлива (табл. 1).

Согласно ИТС 38-2024 реализация рекомендуемых НДТ на действующих КТЭУ принципиально может осуществляться путем ввода нового или модернизацией действующего оборудования.

Ввод нового оборудования из рекомендуемого перечня НДТ в ИТС 38-2024 (Приложение В) означает замену устаревшего оборудования как на принципиально иную НДТ, так и на НДТ аналогичного типа (например, тех же ЭФ), но более совершенной конструкции с улучшенными технико-экономическими и экологическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям, соответствующим сроку ввода этого нового оборудования в эксплуатацию (т.е. более жестким требованиям).

Таблица1

**Технологические показатели выбросов ЗВ в атмосферный воздух,
в пересчете на нормальные условия (0°C, 101,3 кПа) и содержание кислорода O₂ = 6%,
для газообразных ЗВ – в сухих газах, мг/м³**

Маркер- ные ЗВ	Ввод оборудования в эксплуатацию		
	до 31.12.2000	с 01.01.2001 по 31.12.2025	с 01.01.2026
NO _x	БУ(ТШУ/ЖШУ): 600/800 КУ(ТШУ/ЖШУ): 800/1000	БУ(ТШУ/ЖШУ): 500/500 КУ(ТШУ/ЖШУ): 550/650	БУ (ТШУ/ЖШУ): 300/300 КУ (ТШУ/ЖШУ): 470/640
SO ₂	S ^r ≤0,5%: 1400 S ^r >0,5%: 3000	S ^r ≤0,5%: 700 S ^r >0,5%: 1400	S ^r ≤0,5%: 700 S ^r >0,5%: 1400
Зола твердого топлива	Для котлов с входной тепловой мощностью менее 500 МВт (паропроизводитель- ностью менее 670 т/ч) при: A ^r < 10%: 600; 10 ≤ A ^r ≤ 20 %: 600- 900;	Для котлов с входной тепловой мощностью менее 500 МВт (паропроизводитель- ностью менее 670 т/ч): 250	Для котлов с входной тепловой мощностью менее 300 МВт (паропроизводитель- ностью менее 420 т/ч) при: A ^r < 10%: 150 10 ≤ A ^r ≤ 20 %: 150-250; A ^r >20%: 250

Маркер- ные ЗВ	Ввод оборудования в эксплуатацию		
	до 31.12.2000	с 01.01.2001 по 31.12.2025	с 01.01.2026
	$A^r > 20\%$: 900. Для котлов с входной тепловой мощностью от 500 МВт и более (паропроизводительностью от 670 т/ч и более) при: $A^r < 30\%$: 250 $A^r \geq 30\%$: 800	Для котлов с входной тепловой мощностью от 500 МВт и более (паропроизводительностью от 670 т/ч и более): 150	Для котлов с входной тепловой мощностью от 300 МВт и более (паропроизводительностью от 420 т/ч и более) при: $A^r < 10\%$: 50 $10 \leq A^r \leq 20\%$: 50-150 ³⁾ ; $A^r > 20\%$: 150
СО	ТШУ: 400 ЖШУ: 300	ТШУ: 400 ЖШУ: 300	ТШУ: 400 ЖШУ: 300

Модернизация — это процесс усовершенствования уже находящегося в эксплуатации оборудования с целью приведения его в соответствие с действующими требованиями и нормами, техническими условиями, показателями качества посредством проведения различных обновлений этого оборудования. Например, при модернизации электрофильтров увеличивается высота осадительных электродов или увеличивается число полей активной зоны. В процессе проводимой модернизации улучшаются технико-экологические характеристики введенного в эксплуатацию оборудования до уровня НДТ для данной группы оборудования. Таким образом «модернизация оборудования» дает возможность удовлетворить экологические требования для данной группы оборудования без перевода самого оборудования в следующую возрастную группу с более жесткими технологическими показателями, т.к. срок ввода данного оборудования в эксплуатацию при этом не изменяется в отличие от «ввода нового оборудования».

В этой связи ТЭС при разработке ППЭЭ должны тщательно оценивать свои технические и финансовые возможности, определяя способы внедрения НДТ путем модернизации или путем ввода нового оборудования.

К сожалению, на действующих ТЭС модернизация и капитальный ремонт основного энергетического или газоочистного оборудования с целью выполнения установленных экологических показателей требуют достаточно длительных остановов КТЭУ, что может привести в отдельных регионах к дефициту энергоснабжения и ограничению работы промышленных предприятий. Для снижения капитальных и временных затрат на внедрение современных НДТ с учетом реальных технико-эксплуатационных показателей основного и вспомогательного оборудования могут рассматриваться разные варианты решения проблемы обеспечения технологических показателей выбросов ЗВ.

Например, ИТС 38-2024 допускает для действующих КТЭУ, для которых в связи с низкими технико-экономическими показателями мероприятия по модернизации и продлению сроков эксплуатации экономически нецелесообразны и которые в соответствии с «Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики» планируется выводить из эксплуатации, устанавливать временно разрешенные выбросы.

Временно разрешённые выбросы (ВРВ) загрязняющих веществ в атмосферный воздух устанавливаются для промышленных предприятий в случае, если они не могут временно соблюдать установленные нормативы допустимых выбросов (НДВ) из-за технологических, организационных или иных причин. Разрешения на временно разрешённые выбросы выдаёт территориальный орган Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) по месту нахождения предприятия на срок не более 7 лет.

В настоящее время утверждена новая «Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года». Согласно этому документу до 2031 г. на российских ТЭС предполагается вывести из эксплуатации суммарно 20 - 24 ГВт устаревшего энергетического оборудования, достигшего предельных сроков эксплуатации или имеющих низкие технико-экономические показатели. В первую очередь выводятся объекты, введенные до 1970–1980 годов, а также неэффективные и физически изношенные агрегаты (см. Приложение 21 «Перечень существующих объектов по производству электрической энергии (тепловых электростанций), в том числе функционирующих в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, в отношении которых в долгосрочном периоде планируется изменение установленной генерирующей мощности на 100 МВт и более, на 2031 - 2036 годы», с. 6). Таким образом для большого количества устаревших КТЭУ вместо экономически необоснованного внедрения НДТ могут быть установлены ВРВ при получении КЭР.

Следует, также, обратить внимание на то, что на многих российских ТЭС, особенно работающих на высокосольных экибастузских углях, замена старых золоуловителей на новые электрофильтры (т.е. «ввод нового оборудования» как, например, на Рефтинской ГРЭС и Омских ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5) в основном происходила в период с 2009 по 2023 г.г., т.е. до момента утверждения ИТС 38-2022 и выхода приказа Минприроды России от 25.04.2023 г. №248, утвердившего технологические показатели наилучших доступных технологий сжигания топлива на ТЭС [3] и вступления его в силу с 1.09.2023 г.

Таким образом «ввод нового золоулавливающего оборудования» на таких ТЭС проходил в отсутствие на тот момент времени установленных технологических показателей по выбросам золы твердого топлива, что негативно сказалось на выборе золоуловителей, которые

принципиально технически не могут обеспечить выполнение более жестких технологических показателей выбросов золы (для второй возрастной группы).

В этой связи обоснованным выглядит предложение о корректировке в рамках проводимой в настоящий момент актуализации следующей редакции справочника ИТС 38-2025 технологических показателей выбросов золы твердого топлива при сжигании высокозольных углей с $A_r \geq 30\%$, установленных на переходный период (с 1.01.2001 по 31.12.2025). Предлагаемая корректировка технологических показателей (см. табл. 2), позволяет на действующем золоулавливающем оборудовании обеспечить выполнение требований по выбросам золы, а также избежать длительных остановок оборудования и больших капитальных и временных затрат на внедрение НДТ.

Напомним, что перечень НДТ в ИТС 38 имеет справочно-рекомендательный характер и, строго говоря, не является обязательным для предприятий. Значения технологических показателей выбросов маркерных ЗВ должны выполняться «при применении НДТ или иных технологий сжигания топлива и очистки дымовых газов». Таким образом основной задачей является обеспечение экологических показателей выбросов ЗВ. Выбор соответствующих технологий и оборудования (НДТ, реализованных или перспективных технологий) для внедрения на ТЭС осуществляют сами ТЭС исходя из своих технико-экономических условий, финансовых возможностей и рисков.

Таблица 2

Сравнение технологических показателей выбросов золы в ИТС 38-2024 для оборудования, введенного в эксплуатацию в переходный период с 01.01.2001 по 31.12.2025, и предлагаемой коррекции в ИТС 38-2025

Ввод оборудования в эксплуатацию	
ИТС 38-2024	ИТС 38-2025
Для котлов с входной тепловой мощностью менее 500 МВт (паропроизводительностью менее 670 т/ч): 250	Для котлов с входной тепловой мощностью менее 500 МВт (паропроизводительностью менее 670 т/ч) при: $A_r < 30\%$: 250 $A_r \geq 30\%$: 900
Для котлов с входной тепловой мощностью от 500 МВт и более (паропроизводительностью от 670 т/ч и более): 150	Для котлов с входной тепловой мощностью от 500 МВт и более (паропроизводительностью от 670 т/ч и более) при: $A_r < 30\%$: 150 $A_r \geq 30\%$: 900

Внедрение НДТ на российских предприятиях сопровождается целым комплексом льгот: налоговые послабления и ускоренная амортизация, снижение или обнуление платы за НВОС,

прямые и косвенные субсидии, специальные инвестиционные режимы, административные преференции — всё это предусмотрено законом и на практике становится экономически выгодным для предприятий, модернизировавших технологии до требуемого уровня.

В то же время внедрение НДТ сопряжено с техническими, инвестиционными, организационными и социальными рисками. Так внедрение НДТ на действующих КТЭУ осложняется габаритными ограничениями, необходимостью применения малозатратных и быстро внедряемых технологий с целью снижения капитальных и временных затрат. Реализация нелокализованных НДТ сопряжено со сложностями технического обслуживания оборудования, поставкой запасных частей и расходных материалов. Кроме того, следует учитывать большие сроки окупаемости суммарных затрат на внедрение НДТ, которые даже при оптимистичном прогнозе инфляции часто превышают сроки остаточной эксплуатации оборудования.

Внедрение на российских ТЭС перспективных воздухоохраных технологий, не признанных официально НДТ, — это комбинация возможного опережающего эффекта и технологических выгод, но с высоким уровнем экономических, организационных и регуляторных рисков. Решаться на такие внедрения целесообразно либо в формате пилотных (экспериментальных) проектов с внешней поддержкой, либо при готовности станции самостоятельно нести все связанные с этим издержки — до момента официального признания и внесения технологии в список НДТ.

С целью сокращения времени на принятие решений, удешевления и повышения эффективности внедряемых воздухоохраных мероприятий НИУ «МЭИ» предложены алгоритмы, позволяющие производить оптимальный выбор НДТ золоулавливания и сероочистки из перечня рекомендуемых в ИТС 38-2024 к внедрению на КТЭУ в зависимости от вида топлива, конкретных условий эксплуатации, технических характеристик и типов основного и вспомогательного оборудования при разработке ППЭЭ в рамках оформления заявки на получение КЭР [5].

Заключение

Динамика актуализаций ИТС 38 в период 2017-2024 г.г. отражает ужесточение экологических стандартов и расширение требований к предприятиям топливно-энергетического комплекса. Успешное получение КЭР генерирующими предприятиями невозможно без адаптации производственных процессов к новым техническим условиям, что подразумевает внедрение НДТ снижения выбросов загрязняющих веществ, оптимизацию топливных режимов и обновление системы экологического контроля.

На практике корректное применение ИТС 38-2024 требует серьезной междисциплинарной работы теплоэнергетиков и специалистов-экологов, что должно привести к снижению экологических рисков, повышению эффективности работы энергообъектов и интеграции российских предприятий в международные экостандарты.

Список литературы

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2024 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» - М.: Бюро НДТ, 2024.
2. Постановление Главного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" (с изменениями на 30 декабря 2022 года).
3. Приказ Минприроды России от 25.04.2023 № 248 «Об утверждении нормативного документа в области охраны окружающей среды «Технологические показатели наилучших доступных технологий сжигания топлива на крупных установках в целях производства энергии».
4. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 год (утверждена Распоряжением Правительства РФ от 30.12.2024 г. №4153-р).
5. **Росляков П.В., Изотиков И.Ю.** Алгоритмы оптимального выбора НДТ золо- и сероочистки дымовых газов пылеугольных ТЭС/Росляков П.В., Изотиков И.Ю. //Энергетик. 2025. №5. С. 29-40.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВЫБРОСОВ: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ООО «НПП «ЭКОХИМПРИБОР» ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

ПОКАСОВ Р.П. (ООО «НПП «ЭКОХИМПРИБОР»)

С 2022 года, с ростом числа компаний, получивших комплексные экологические разрешения, одновременно произошёл резкий спад предложений за счёт ухода с российского рынка зарубежных производителей систем автоматического контроля выбросов. Выбор доступных технических решений существенно сузился. В текущих реалиях, производители продвигают свой продукт вместо того, чтобы совместно с предприятиями искать оптимальное техническое решение.

Целью статьи я считаю необходимым, на примере конкретной компании, донести, что следует действовать исходя из потребности природопользователя, предлагая именно решение его задачи, а не продавая приборы «из наличия». Тем самым обеспечивается максимально эффективное выполнение требований законодательства РФ об оснащении предприятий I группы НВОС системами автоматического контроля.

Ключевые слова: Автоматические системы контроля выбросов, системы автоматического контроля выбросов, наилучшие доступные технологии, российское производство, импортозамещение, АИС КВ, САКВ, НДТ.

Введение

ООО «НПП «ЭКОХИМПРИБОР» - российская компания-производитель оборудования газового анализа, жидкостного анализа и систем автоматического контроля выбросов и сбросов. Свою деятельность компания начала в 2008 году, основные направления деятельности: газовый и жидкостной анализ, системы автоматического контроля выбросов и сбросов, а также сопутствующие направления, такие как производство блок-контейнеров, систем подготовки пробы и промышленная хроматография. За время работы нами было поставлено более 1500 аналитических систем, среди которых более 350 систем газового и более 600 систем жидкостного анализа собственного производства. На нашей производственной площадке в наукограде Дубна возможна одновременная сборка более 100 аналитических систем. Общая площадь производства – более 7000 м². Команда ЭКОХИМПРИБОРА состоит из почти двухсот человек, среди которых высококлассные проектировщики и конструкторы, инженеры, химики и метрологи, которые создают решения под ключ.

ЭКОХИМПРИБОР осуществляет поставку Систем автоматического контроля выбросов (САКВ) под ключ, начиная с предпроектного обследования и проектирования, затем производства основного оборудования, и заканчивая метрологическим обеспечением и сервисными услугами. В подобных проектах прежде всего необходимо учитывать актуальные требования законодательства, обеспечить надежность и точность измерений и, разумеется, предусмотреть дальнейшую передачу данных в реестр объектов НВОС [1].

Перейдём к техническим решениям. Рассматривая по частям, системы контроля выбросов можно поделить на 4 блока: аналитический блок, блок полевых приборов, блок обеспечения рабочих условий и систему сбора и обработки данных. Наиболее интересным и разнообразным можно назвать аналитический блок. Можно выделить 3 варианта исполнения, по способам измерения газоаналитического оборудования: установка «в процесс» и экстрактивный способ анализа, который также имеет разделения на «горячий-влажный» и «холодный-сухой» методы [1,2]. В техническом плане ЭКОХИМПРИБОР находится в достаточно выгодной позиции среди поставщиков оборудования, поскольку имеет в своём приборном парке все варианты исполнения, что позволяет выбрать оптимальный для каждого Заказчика вариант оснащения.

Наиболее распространенным является способ измерения «горячий влажный», при котором измерение пробы идёт без удаления влаги. В этом случае возможно измерять любые компоненты, перечисленные в Постановлении Правительства от 29.05.2025 №779, отсутствуют потери измерения водорастворимых компонентов и возможно измерять такие «непростые в измерении» компоненты как HF, HCl, NH₃, H₂S. Кроме того, этот способ считается универсальным согласно ИТС по НДТ 22.1-2021, а в более ранней версии 2016 года, фактически, был охарактеризован как единственный подходящий для дымовых газов из-за отграничения по количеству влаги (свыше 5%) [3]. В актуальных технических решениях ЭКОХИМПРИБОР предлагает 2 вида «горячих-влажных» анализаторов – ЭкоСпектр-УФ на принципе DOAS (differential optical absorption spectroscopy – оптическая спектроскопия с разделением в УФ диапазоне) и ЭкоСпектр-Д на принципе TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy – спектроскопия на базе перестраиваемого диодного лазера в ИК диапазоне). Разделение на 2 и более газоанализатора позволяет повысить отказоустойчивость Системы, поскольку при выходе из строя одной измерительной ячейки, измерения продолжаются, и передача данных в реестр НВОС не прекратится, в отличие от выхода из строя, например, Фурье-спектрометра [4]. Кроме того, модульный вариант позволяет снизить капитальные затраты: для объектов теплоэнергетики редко нужно более 2 приборов, при том их суммарная стоимость составляет не более половины от стоимости одного анализатора на принципе

преобразования Фурье. Модульность также позволяет адаптивно подойти к измерению отдельных компонентов, выбирая оптимальный метод.

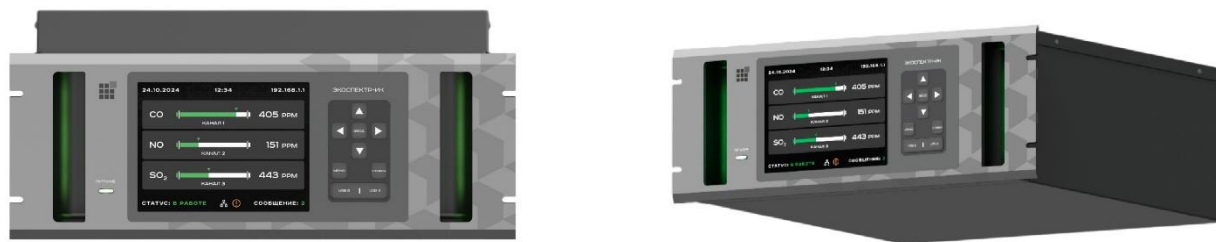


Рисунок 1. Анализатор ЭкоСпектр II

Другим способом измерения газообразных компонентов является «холодный-сухой». К преимуществам этого способа можно отнести его «привычность» - оперативный персонал предприятий обычно знаком с подобным газоаналитическим оборудованием и их стандартными решениями по системам подготовки пробы. Из менее очевидных плюсов можно отметить, что в холодных системах калибровка и измерения осуществляются в одинаковых условиях, при околонулевой влаге, что может означать более точные измерения малорастворимых компонентов (например, оксида углерода) [1]. Отметим, что согласно ИТС по НДТ 38-2024, к маркерным веществам объектов теплоэнергетики относятся CO, SO₂ и NO_x (сумма оксидов азота) [2]. Все эти вещества возможно измерить холодным методом, то есть по своей сути, для решения данной задачи его тоже можно назвать универсальным. ЭКОХИМПРИБОР обычно применяет в «холодных» системах комбинацию приборов на принципах NDIR и NDUV (оптическая спектроскопия без разделения в ИК либо УФ диапазоне). Для измерения воды используется анализатор Эколазер, устанавливаемый на процесс. К отраслевым решениям, хорошо подходящим для объектов теплоэнергетики, можно отнести вариант измерения воды через двойное измерение кислорода – на трубе и после удаления влаги. Поскольку согласно ИТС по НДТ 38-2024, измерения необходимо приводить к определенному содержанию кислорода (6%), подобное решение позволяет экономить на отдельном измерении воды, соблюдая при этом требования НДТ.

Третий способ измерения газообразных компонентов – это измерение непосредственно на источнике выбросов. В линейке ЭКОХИМПРИБОРА неэкстрактивные анализаторы представлены семейством «Эколазер». Особенности такого технического решения являются отсутствие транспортного запаздывания и высокая точность измерений. Кроме того, использование неэкстрактивных анализаторов зачастую ведет к снижению капитальных затрат на проект, поскольку можно отказаться от строительства блок-бокса, ограничившись единственным шкафом системы сбора и обработки данных, установленным, например, в

операторной. Кроме того, решение выглядит интересным, если нужно оснастить несколько точечных источников выбросов, расположенных рядом. К минусам неэкстрактивных анализаторов можно отнести то, что один прибор как правило измеряет не более двух компонентов [5]. Но для источников, где перечень загрязняющих веществ мал, данное техническое решение имеет ряд явных преимуществ перед стандартными.

Перейдём к оборудованию блока полевых приборов. К этому перечню можно отнести приборы измерения расхода, взвешенных веществ (пыли), датчики температуры и давления, а также пробоотборный зонд. В настоящий момент, ЭКОХИМПРИБОР заканчивает испытания собственного пылемера Эко-DM, после чего он станет доступен для покупки. В настоящий момент, это единственный пылемер российского производства во взрывозащищенном исполнении.



Рисунок 2. Пылемер Эко-DM

Отдел приборостроения компании ЭКОХИМПРИБОР ведёт работу над остальными модулями блока полевых приборов. На текущий момент в своих технических решениях, ЭКОХИМПРИБОР использует оборудование ведущих российских производителей, подбирая их в зависимости от конкретной задачи.

Блок обеспечения рабочих условий представляет из себя блок-контейнер, укомплектованный необходимыми вспомогательными системами – электроснабжения, климатической (отопление, вентиляция и кондиционирование), системами безопасности: контроля загазованности, пожарной сигнализации, контроля уровня доступа и другими требуемыми подсистемами.

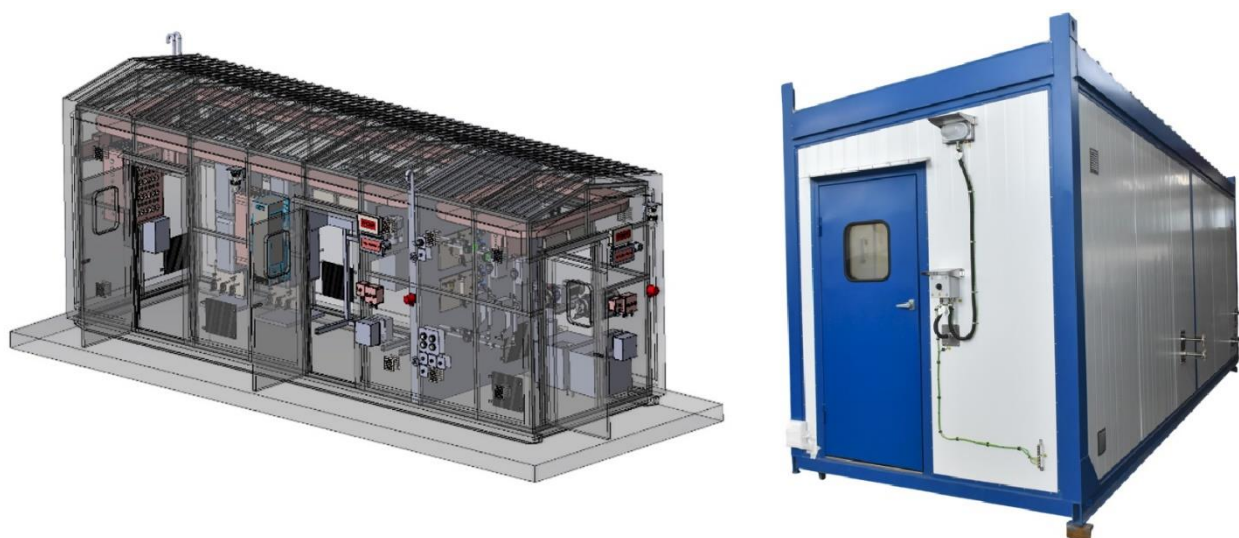


Рисунок 3. Блок-контейнер для размещения оборудования. (Слева – 3D-модель, справа – внешний вид)

Последний логический блок – это система сбора и обработки данных. Он имеет относительно стандартную трёхуровневую структуру [6]. Нижний уровень – сигналы с полевых приборов и газоаналитического оборудования. Средний уровень – это контроллерная часть. Она отвечает за получение и обработку сигналов с нижнего уровня, а также за алгоритмы усреднения измеряемых параметров и за все алгоритмы пересчёта массовых/валовых выбросов [7]. Средним уровнем заканчивается метрологически значимая часть САКВ, её алгоритмы аттестуются в НИИ «Атмосфера», после чего передаются на верхний уровень «как есть». Верхний уровень отвечает за визуализацию, хранение данных, ведение протокола событий, обеспечение связи с АСУ ТП Заказчика, формирование отчётов и передачу данных в реестр объектов НВОС. Передача данных о показателях выбросов осуществляется согласно Приказа от 25.08.2022 №382 в соответствии с требованиями к протоколам связи, формату сообщений, методам кодирования данных и другим параметрам, необходимым для обеспечения надежной и эффективной передачи информации.

Отдельно отмечу варианты исполнения для размещения САКВ во взрывоопасных зонах. Гордость ЭКОХИМПРИБОР – сертифицированный по ТР ТС 012 продуваемый контейнер, в котором можно разместить в том числе оборудование в общепромышленном исполнении. Также доступны более привычные исполнения, когда размещаемое в блок-контейнере оборудование устанавливается либо во взрывонепроницаемые корпуса, либо в продуваемые шкафы.

Заключение

Проекты по реализации автоматического контроля на объектах НВОС относятся к комплексным и невозможны не только без хорошей технической и приборной базы, но и без

соответствующего сопровождения проектов. В первую очередь это проектирование и инжиниринг: конструкторский отдел ЭКОХИМПРИБОРА является одним из старейших и наиболее опытных в компании, имея опыт более 17 лет. Сервисный отдел является максимальным по численности среди компаний подобного профиля, кроме того, имеет региональные подразделения. Из уникальных компетенций ЭКОХИМПРИБОРА стоит отметить собственную метрологическую службу, аккредитованную в области поверки как отдельных аналитических и измерительных приборов, так и систем автоматического контроля в целом.

Совокупность технических ресурсов и профильных специалистов позволяет ЭКОХИМПРИБОРУ реализовывать проекты по запуску автоматических систем мониторинга выбросов, соответствующих требованию законодательных, нормативных и правовых актов РФ, а также документов в области стандартизации. Подводя итоги, отмечу, что большая часть предприятий получили КЭР только в прошлом году, а времени на оснащение системами автоматического контроля выбросов остается менее четырех лет, что гарантирует взрывной рост интереса к подобным системам.

Список литературы

1. **А.С. Малявин, В.М. Костылева, Р.П. Покасов, Р.А. Родин.** Унификация технических решений как фактор развития Систем Автоматического Контроля. //Мир Измерений. 2024. №1. Стр. 62-64
2. **П.В. Росляков.** Актуализация ИТС 38 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии». II Научно-техническая конференция с международным участием «ЭКОЛОГИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ». Сборник докладов. Стр. 10-20.
3. **Сарлыбаев Р.Г.** Системы Автоматического Контроля выбросов, требования, вызовы и решения. Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXIV Международной научно-практической конференции. Новокузнецк. 2024. Стр. 248-253.
4. **П.А. Стороженко, Д.О. Скобелев, А.С. Малявин, В.М. Костылева, А.Ю. Попов.** Международный и российский опыт нормативно-правового регулирования применения Систем Автоматического Контроля выбросов загрязняющих веществ промышленных предприятий. // Экология и промышленность России. 2022. № 4. Стр. 37–43.
5. **В.А. Туркин, В.В. Беляев, С.А. Арутюнян.** Лазерная система контроля выбросов загрязняющих веществ энергетическими объектами природопользования. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2024. Выпуск 1. Стр 161-172.
6. **Е.Ю. Васильев.** Система Автоматического Контроля промышленных выбросов ПАО «ММК». // Автоматизация в промышленности. 2021. Май. Стр. 43-45
7. **О.Е. Кондратьева.** Диссертация на тему «Научно-методические основы разработки и внедрения систем непрерывного контроля и учета выбросов тепловых электростанций»

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ЗОНЕ АКТИВНОГО ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ В ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ

**КОПТЕВ А.С., ЛЕНЯКИН А.В., СЕРКОВ Д.Е., СОКОЛОВ А.А.,
(ООО «АСКИНТЕХ»)**

В статье рассматривается влияние температурного режима в зоне активного горения пылеугольного котла на формирование мелкодисперсной пыли, которая имеет относительно низкую эффективность улавливания в электрофильтре. Приведены результаты исследований на лабораторных и промышленных установках, даны фракционные составы летучей золы, отобранные изокинетически за котлом с жидким шлакоудалением при сжигании ирбейского бурого угля на Иркутской ТЭЦ-6 (филиал ООО «Байкальская Энергетическая компания» ТЭЦ-6) и за котлом с твердым шлакоудалением при сжигании бикинского бурого угля на Приморской ГРЭС. Показано характерное изменение эффективности улавливания золы в электрофильтре для разных фракций. Полученные данные указывают на существенное влияние температурного режима в зоне активного горения пылеугольных котлов на эффективность улавливания летучей золы в электрофильтрах. Дано обоснование необходимости применения существенно больших габаритов электрофильтров за котлами с жидким шлакоудалением по сравнению с котлами с твёрдым шлакоудалением при прочих равных условиях.

Ключевые слова: электрофильтры, золоуловители, пылеуловители, пылеугольные котлы, жидкое шлакоудаление, твердое шлакоудаление, ирбейский бурый уголь, бикинский бурый уголь, температура в зоне активного горения, летучая зола, выбросы твердых частиц.

Введение

Вопросы экологии занимают ключевую роль при проектировании и эксплуатации оборудования электростанций. При обсуждении необходимых габаритов электрофильтров с сотрудниками проектных организаций, инжиниринговых компаний и электростанций авторам статьи не раз приходилось сталкиваться с ошибочным мнением, что способ шлакоудаления в котле, а значит и температурный режим в зоне активного горения (ЗАГ), не влияют на типоразмер электрофильтра (ЭФ). Например, в некоторых случаях неверно утверждалось, что более низкая доля золы в уносе и соответствующая ей относительно низкая концентрация твердых частиц в уходящих газах котлов с жидким шлакоудалением (ЖШУ) позволяют применять более компактные ЭФ, чем при твердом шлакоудалении (ТШУ). Ошибочность таких утверждений связана с учётом только требуемой эффективности улавливания золы. На самом

деле для обеспечения заданной остаточной запыленности за ЭФ необходимо учитывать различия во фракционном составе летучей золы при различных температурных режимах в ЗАГ пылеугольных котлов.

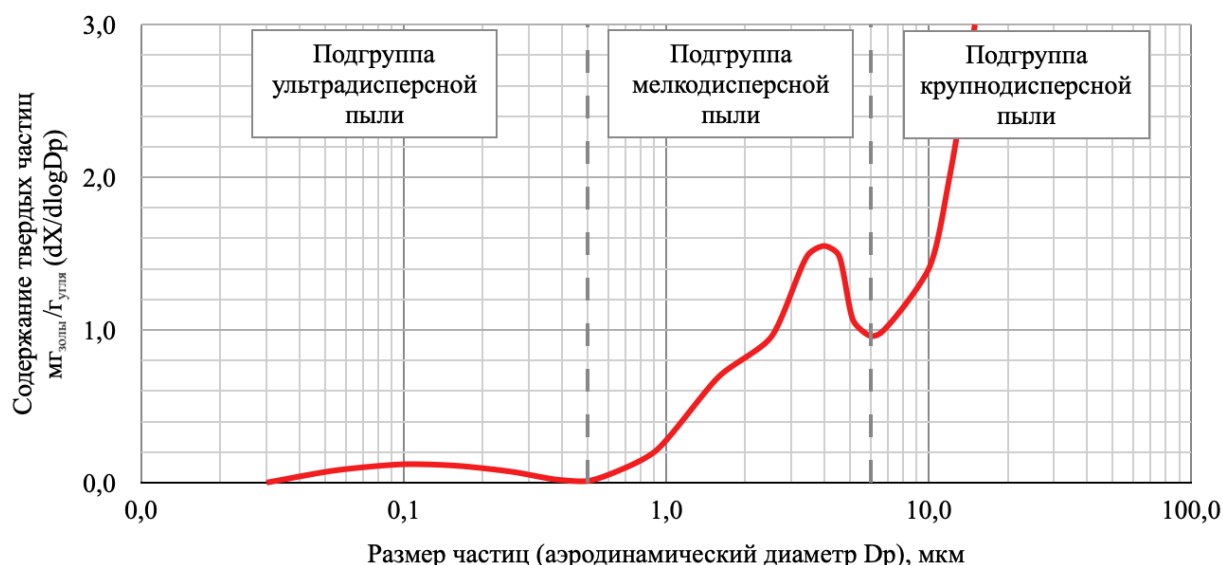


Рисунок 1. Фракционный состав золы, полученный в лабораторной установке.

Одной из основных характеристик при выборе необходимой площади осаждения ЭФ является фракционный состав поступающей с потоком газов пыли [1]. Современные средства измерений позволяют получать более точные результаты, которые указывают на полимодальный (с несколькими максимумами) фракционный состав летучей золы. Разделение частиц по подгруппам с характерным максимумом (модой) позволило достаточно подробно исследовать механизмы формирования каждой подгруппы. Например, на Рис. 1 показано фракционное распределение с тремя четко выраженными подгруппами пыли: ультрадисперсная, мелкодисперсная и крупнодисперсная [2]. Ультрадисперсная пыль формируется в результате процесса испарения-конденсации относительно легкоплавких компонентов минеральной части [2, 3]. Подгруппа мелкодисперсной пыли формируется в основном в результате перколяционной фрагментации, связанной с развитием пор частицы, в результате чего значительная часть зерен минералов не объединяются в более крупные частицы, а остаются разделенными [2,3,9]. В подгруппе крупнодисперсной пыли представлены крупные частицы, которые сформировались в результате объединения (коалесценции) и фрагментации более крупных частиц [2,3].

Эта статья посвящена рассмотрению прямой зависимости доли частиц в подгруппе мелкодисперсной пыли от температуры в ЗАГ. Именно эта подгруппа составляет подавляющую долю частиц пыли, которые улавливаются в ЭФ с относительно низкой эффективностью.

Ультрадисперсная пыль также плохо улавливается в ЭФ, но в данной статье этот вопрос рассматривается поверхностно по нескольким причинам. Во-первых, доля ультрадисперсных частиц относительно невелика, и их концентрация может составлять до нескольких единиц мг/нм^3 в общем выбросе твердых частиц в атмосферу. Во-вторых, для отбора и анализа ультрадисперсных частиц необходимо достаточно редкое специальное оборудование. Влияние этой подгруппы на процессы улавливания в электрофильтре требует отдельной и достаточно глубокой проработки и далее в этой статье не рассматривается.

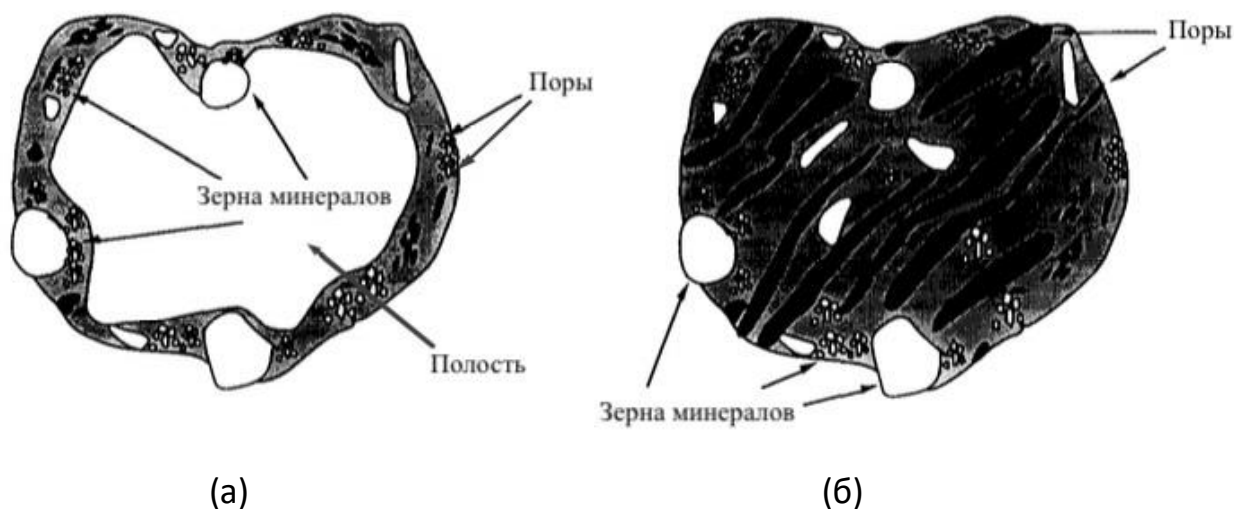


Рисунок 2. Поперечные разрезы нелетучих (коксовых) остатков каменного (а) и бурого (б) углей.

На Рис. 2 показаны поперечные разрезы нелетучих (коксовых) остатков частиц каменного и бурого углей [4]. Нелетучий остаток каменного угля (Рис. 2а) представляет из себя полую частицу с вынесенными зернами минералов на периферию. Лабораторные исследования механизма формирования подгруппы мелкодисперсной пыли при сжигании каменного угля показали, что размеры коксовых остатков превысили размеры исходных угольных частиц размером $<63 \text{ мкм}$ примерно в 5-5,5 раз. Для более крупных угольных частиц размером 100-200 мкм эта разница составила 1,3-1,5 раз. При увеличении температуры газов со 1100 до 1400 $^{\circ}\text{C}$ концентрация золы в подгруппе мелкодисперсной пыли увеличилась примерно в 4 раза [2]. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными на Иркутской ТЭЦ-6 [6]. На Рис. 3 приведен график с фракционным распределением золы на входе в ЭФ при сжигании ирбейского бурого угля в котле с ЖШУ на двух нагрузках - 180 и 280 т/ч (56 и 88% от номинальной нагрузки, соответственно). Доля золы в подгруппе с мелкодисперсной пылью для нагрузок 180 и 280 т/ч составила 10 и 18%, соответственно. При этом значения температуры газов,

измеренные пирометром в смотровом лючке в нижней части ЗАГ при аналогичных условиях, составили 1477 и 1655 °С, соответственно.

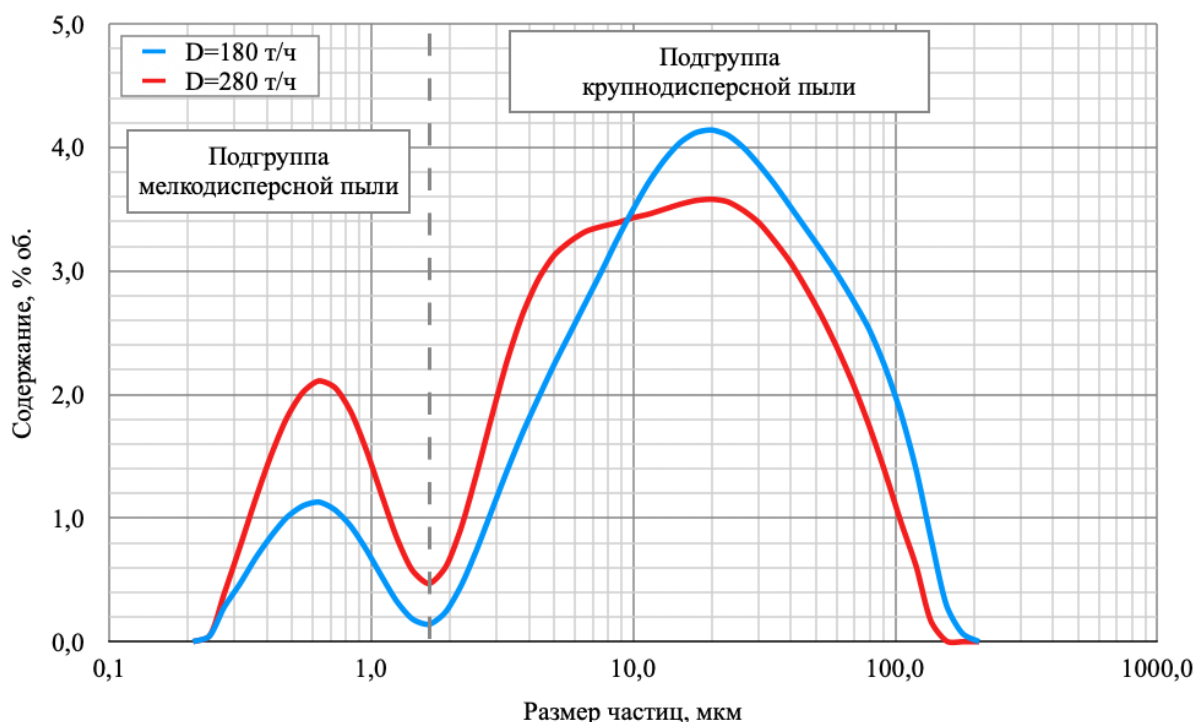


Рисунок 3. Фракционные составы летучей золы ирбейского бурого угля на входе в ЭФ котла с ЖШУ ст. № 5 Иркутской ТЭЦ-6 при нагрузках 180 и 280 т/ч

На развитие пор в горящей частице существенное влияние оказывает скорость нагрева частиц. Чем выше скорость нагрева частицы, тем выше величина пористости нелетучего остатка, меньше коалесценция минералов и интенсивнее процесс фрагментации [3,9]. Судя по всему, поперечный разрез нелетучего остатка бурого угля при сжигании в котле с ЖШУ аналогичен, приведенному на Рис. 2а. При низкотемпературном сжигании бурого угля нелетучий остаток не фрагментируется или фрагментируется менее интенсивно из-за наличия значительного количества пор, которые выходят на поверхность частицы (Рис. 2б) [3]. Это во многом объясняет относительно высокую эффективность улавливания летучей золы бурых углей в ЭФ, стоящих за котлами с ТШУ [7,8].

Фракционная эффективность улавливания летучей золы в ЭФ

Для определения эффективности улавливания частиц различных размеров в ЭФ необходимо обратиться к понятию скорости дрейфа частиц в направлении осадительных электродов. Эта величина является условной, так как включает в себя не только скорость движения частиц в сторону осадительных электродов, но и ряд других параметров, таких как вторичный унос пыли, перетоки запыленных газов через неактивные зоны, неравномерное

распределение газов в активном сечении ЭФ и пр. На Рис. 4 представлена типичная зависимость скорости дрейфа взвешенных частиц в ЭФ от их размера [5]. На графике видно, что наименьшую скорость дрейфа имеют субмикронные частицы (< 1 мкм). Это объясняется тем, что в электрическом поле коронного разряда частицы < 1 мкм заряжаются преимущественно ионами, участвующими в тепловом движении газовых молекул, т.е. за счет диффузионной зарядки. В этом случае максимальная величина заряда пропорциональна радиусу частицы. Более крупные частицы (> 1 мкм) заряжаются ионами, движущимися под действием сил электрического поля, а максимальная величина заряда пропорциональна квадрату радиуса частиц. Это, так называемая, ударная зарядка. Величина 1 мкм является примерной и позволяет провести условную границу между диффузионной и ударной зарядкой взвешенных частиц в ЭФ при характерных для электрогазоочистки напряженностях электрического поля [1]. Для целей наших расчетов было принято приемлемое в данном случае допущение, что субмикронные частицы имеют одинаковую скорость дрейфа [1,5].

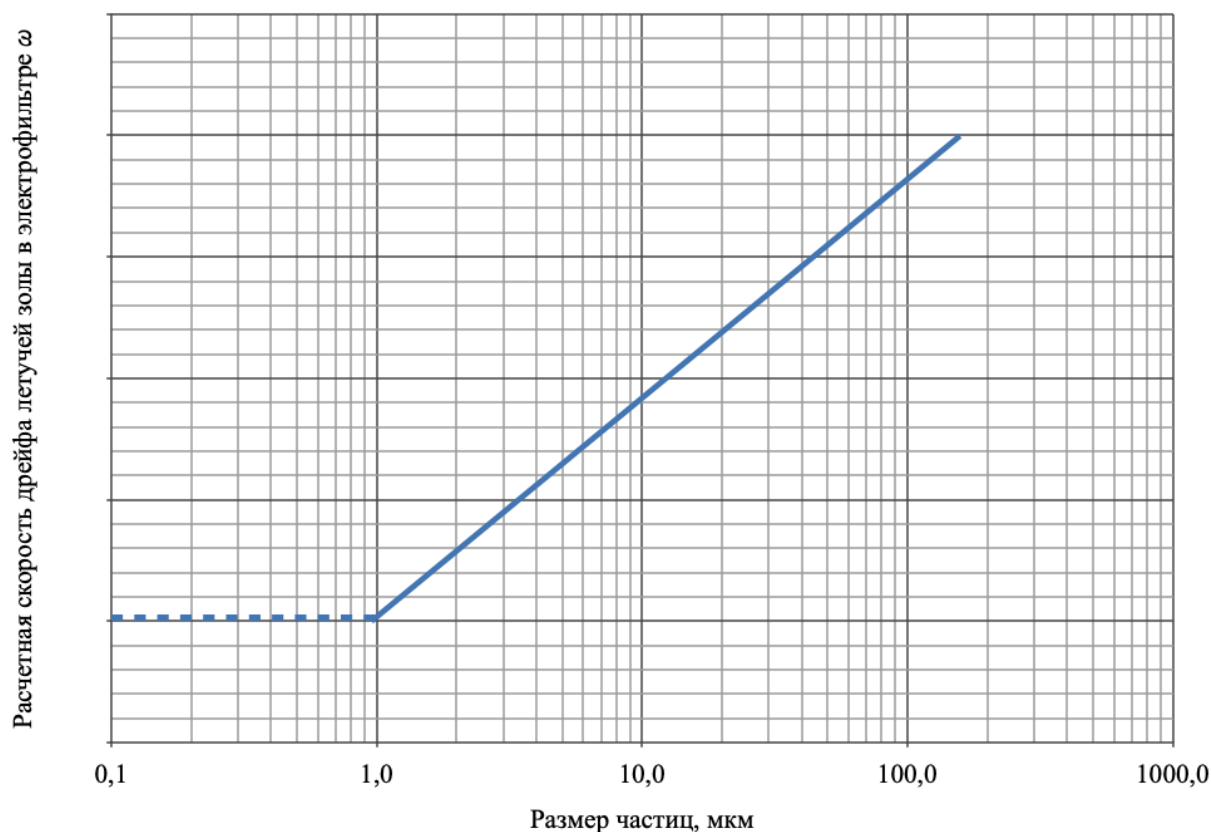


Рисунок 4. Расчетная скорость дрейфа летучей золы в ЭФ

Для того, чтобы найти фракционную эффективность улавливания золы в ЭФ воспользуемся уравнением Дейча [1]:

$$\eta = (1 - e^{-\omega/(A/Q)}) \cdot 100;$$

где η - эффективность улавливания золы, %; ω - скорость дрейфа частиц, м/с; A - площадь осаждения ЭФ, м²; расход очищаемых газов, м³/с (рабочие условия). На Рис. 5 показана расчетная фракционная эффективность улавливания золы в ЭФ.

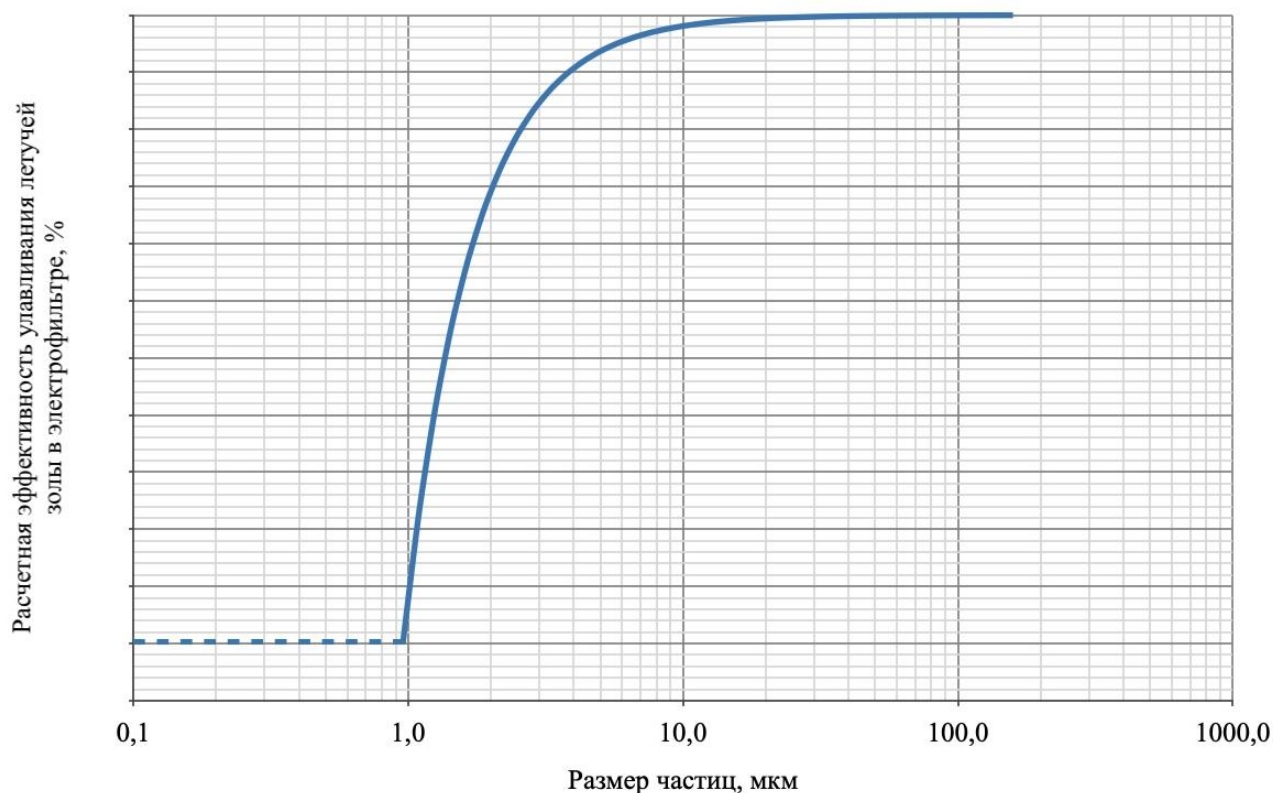


Рисунок 5. Расчетная фракционная эффективность улавливания летучей золы в ЭФ

Для дальнейшего анализа воспользуемся результатами испытаний, полученными на ЭФ котла ст. № 5 Иркутской ТЭЦ-6 и котла ст. № 8 Приморской ГРЭС. На Иркутской ТЭЦ-6 сжигается ирбейский бурый уголь в котлах с ЖШУ [6]. На Рис. 6 приведен фракционный состав золы, отобранной изокинетически из газохода перед ЭФ, и расчетный на выходе из ЭФ, полученный с учетом результатов испытаний и расчетной пофракционной эффективности улавливания летучей золы в ЭФ. При проведении расчетов было сделано допущение, что вторичный унос равномерно распределен по всем фракциям. Как было указано выше, на формирование мелкодисперсной подгруппы ключевое влияние имеет температура газов в ЗАГ. Высокие температуры газов в ЗАГ котла с ЖШУ способствуют формированию значительного количества мелкодисперсной пыли путем перколяционной фрагментации в результате увеличения пористости нелетучих (коксовых) остатков [4,9]. С другой стороны, сжигание бородинского бурого угля в котлах с ТШУ на Абаканской ТЭЦ и Красноярской ТЭЦ-1 не приводит к формированию отдельной подгруппы мелкодисперсной пыли или носит

слабовыраженный характер, т.е. фракционный состав летучей золы имеет мономодальное (с

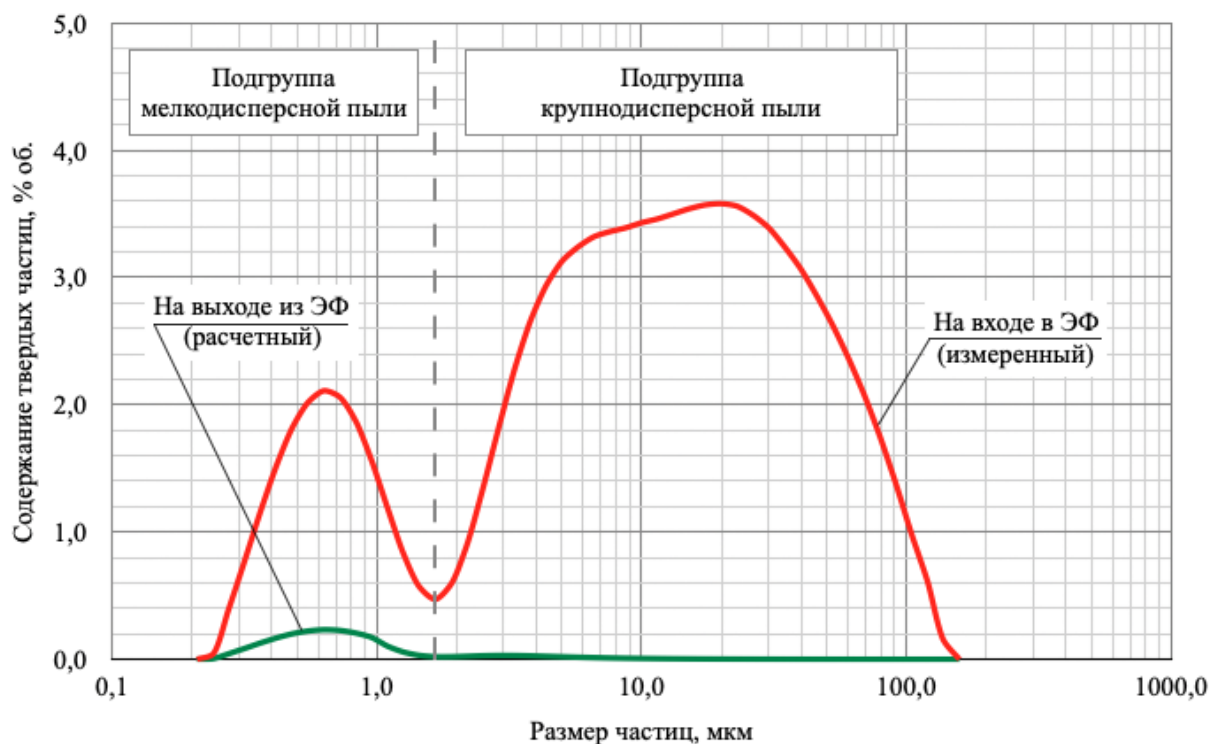


Рисунок 6. Фракционные составы летучей золы ирбейского бурого угля на входе и выходе ЭФ котла с ЖШУ ст. № 5 Иркутской ТЭЦ-6 при нагрузке 280 т/ч.

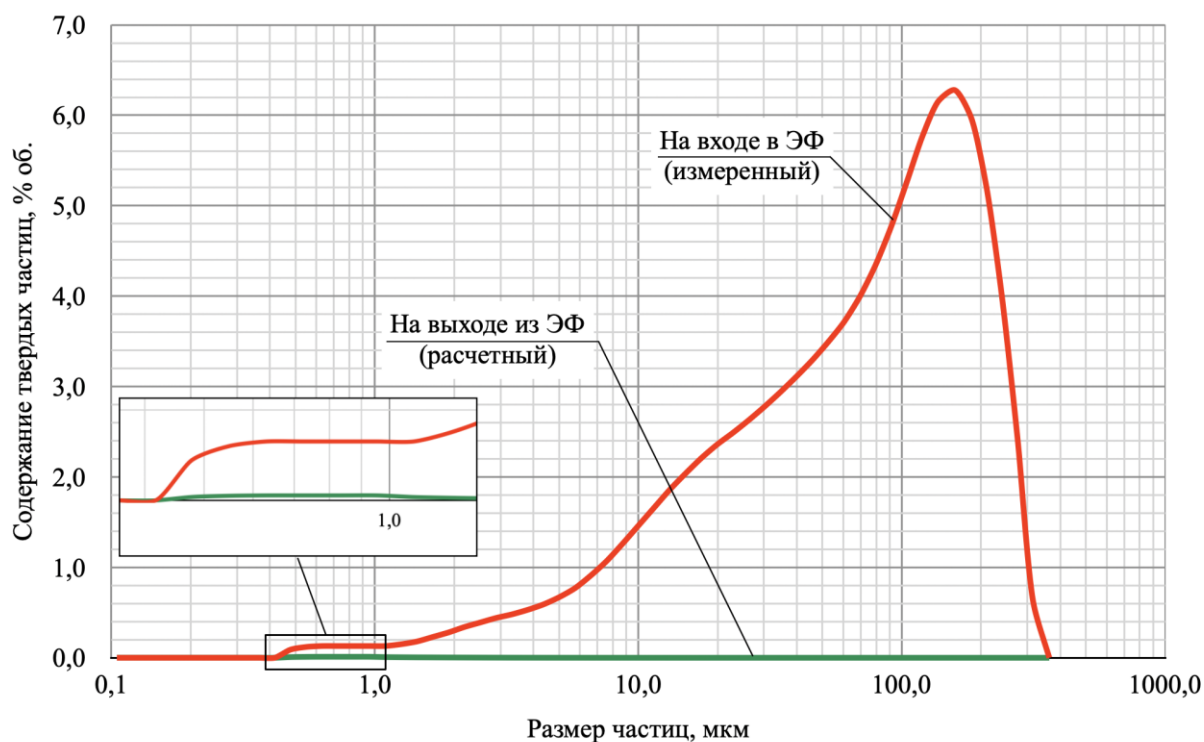


Рисунок 7. Фракционный состав летучей золы бикинского бурого угля на входе и выходе ЭФ котла с ТШУ ст. № 8 Приморской ГРЭС.

одним пиком) распределение [7]. То же самое можно сказать о сжигании бикинского бурого угля в котлах с ТШУ на Приморской ГРЭС [8]. На Рис. 7 показан фракционный состав летучей золы, отобранный изокинетически перед ЭФ котла ст. № 8. На графике видно, что слабовыраженная мелкодисперсная подгруппа плавно переходит в крупнодисперсную. Это типичный пример фракционного распределения летучей золы при низкотемпературном сжигании бурых углей в котлах с ТШУ и прямоточными горелками. Также приведен расчетный фракционный состав летучей золы на выходе из ЭФ. На Рис. 7 видно, что эффективность улавливания летучей золы в ЭФ достаточно высокая, несмотря на относительно низкую площадь осаждения ЭФ. В Таблице 1 приведены данные по двум объектам. Несмотря на кратно более высокую концентрацию золы на входе в ЭФ на Приморской ГРЭС, была достигнута значительно меньшая выходная запыленность, чем на Иркутской ТЭЦ-6. Это связано в первую очередь с различиями во фракционном составе золы, поступающей на газоочистку. Различия в составе угля, золы и других параметров в данном случае играли менее важную роль.

В завершение следует отметить, что фракционный состав пыли имеет существенное, но не единственное влияние на эффективность улавливания золы в ЭФ. В большей или меньшей степени на улавливание летучей золы в ЭФ влияют: состав угля, состав золы, температура, разрежение, состав газов, степень углефикации, удельное электрическое сопротивление пыли, тонина помола угольной пыли и пр.

Таблица 1.

**Основные результаты испытаний ЭФ котла ст. № 5 Иркутской ТЭЦ-6
и котла ст. № 8 Приморской ГРЭС**

Параметр	Ед. изм.	Значение	
		Иркутская ТЭЦ-6 котел ст. № 5	Приморская ГРЭС котел ст. № 8
Наименование угля		Ирбейский бурый уголь	Бикинский- павловский бурые угли
Способ шлакоудаления		ЖШУ	ТШУ
Запыленность дымовых газов перед ЭФ (нормальные условия, влажный газ, $\alpha=1.4$)	г/нм ³	7,2	50,8
Запыленность дымовых газов за ЭФ (нормальные условия, влажный газ, $\alpha=1.4$)	мг/нм ³	101	35
Эффективность улавливания золы в ЭФ	%	98,60	99,93

Авторы надеются, что данная публикация послужит началом для цикла статей по данной тематике, в том числе со сравнительным анализом для летучей золы одного и того же угля при сжигании в котлах с ТШУ и ЖШУ.

Заключение

1. При выборе типоразмера ЭФ необходимо обязательно учитывать способ шлакоудаления, наличие зажигательного пояса или уровень теплонапряжения ЗАГ. Из-за высоких температур в ЗАГ формируется значительное количество мелкодисперсной пыли, которая имеет относительно низкую эффективность улавливания в ЭФ.

2. Снижение температуры газов в ЗАГ при сохранении стабильного горения во всем диапазоне рабочих нагрузок котла сокращает долю мелкодисперсной пыли и увеличивает эффективность улавливания летучей золы в ЭФ.

3. Перевод котла с ЖШУ на ТШУ позволяет снизить выбросы твердых частиц в 2-3 раза, несмотря на увеличение доли золы в уносе и более высокую входную запыленность.

Авторы статьи благодарят организаторов конференции АО «ВТИ» за возможность обсудить актуальные вопросы в экологии энергетике.

Список литературы

1. **Ужов В.Н.** Очистка промышленных газов электрофильтрами. — М., Издательство «Химия», 1967 г., 344 с.
2. **Dunxi Yu, Minghou Xu, Hong Yao, Xiaowei Liu, Ke Zhou, Lin Li, Chang Wen.** Mechanisms of the central mode particle formation during pulverized coal combustion. *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009) 2075–2082.
3. **Алехнович А.Н.** Формирование и характеристики пылеугольной летучей золы. Сборник докладов V научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы», Челябинск, 7-9 июня 2011 г. – В трех томах – Том I. – 252 с.
4. **L.L. Baxter.** The Evolution of Mineral Particle Size Distribution During Early Stages of Coal Combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1990, Vol. 16, pp. 261-266.
5. **Porle, K., Francis, S., Bradburn, K.** (2005) Electrostatic Precipitators for industrial applications. *Federation of European Heating and Air-conditioning Associations*. 2005 by Rehva, 105 p.
6. **Коптев А.С., Коноплев С.А., Лукьяненко А.В., Петрушов И.В., Серков Д.Е., Соколов А.А.** Замена батарейных циклонов котла, стационарный № 5, Иркутской ТЭЦ-6 на современный электрофильтр в условиях габаритных ограничений // *Энергетик*. 2025. № 6.
7. **Калинин В.Г., Коптев А.С., Петров О.В., Серков Д.Е., Толубаев Д.Н.** Обеспечение перспективных норм выбросов при масштабной реконструкции золоулавливающего оборудования Красноярской ТЭЦ-1 // *Энергетик*. 2025. № 2.
8. **Коптев А.С., Антощук Е.С., Серков Д.Е., Толубаев Д.Н., Дубина Н.В.** Модернизация газоочистного оборудования на Приморской ГРЭС с установкой современных электрофильтров в условиях габаритных ограничений // *Энергетик*. 2024. № 10.
9. **S.G. Kang, A. F. Sarofim, J. M. Beer.** Effect of char structure on residual ash formation during PC combustion. *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1992/pp. 1153-1159.

ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АО «КОНДОР – ЭКО» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ ТЭС

ЖУЧЕНКО Е.Л., СМИРНОВ М.Е., ГУЗАЕВ В.А., КАПУСТИН Д.Е. (АО «Кондор-Эко», п. Семибратово, Ярославская обл., Россия)

Сегодня в России Федеральный проект «Чистый воздух» направлен на достижение национальной цели «Экологическое благополучие», определенной Указом Президента РФ № 309 от 07.05.2024. Среди целевых показателей и задач - поэтапное снижение к 2036 году в два раза выбросов опасных загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Существующие требования по выбросам твёрдых частиц на ТЭС актуализированы в ИТС НТД 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии». В условиях геополитической непредсказуемости разработка технических мероприятий и приоритетных методов снижения выбросов должны ориентироваться на развитие и внедрение прежде всего отечественного газоочистного и пылеулавливающего оборудования. На основании отечественных научных исследований разработаны новые технические решения, позволившие интенсифицировать процесс электрической очистки и реализовать возможности по увеличению габаритных размеров фильтров в целях снижения выбросов.

Практическое внедрение инновационных технических решений элементов конструкции электрофильтров путём модернизации и нового строительства показало возможность снижения выбросов до 10 раз в тех же габаритах, а предлагаемые инновационные электрофильтры позволяют решать задачи экологической безопасности отечественных ТЭС и быть независимыми от иностранных технологий.

Ключевые слова: электрофильтр, осадительные и коронирующие электроды, научные исследования, выбросы.

Введение.

Предприятие «Кондор-Эко» создано в 1993 году ведущими специалистами Семибратовского филиала научно-исследовательского института по промышленной и санитарной очистке газов «СФ НИИОГАЗ» с целью более эффективного внедрения разработок института с учётом открывшихся возможностей рыночной экономики и создания нового газоочистного и пылеулавливающего оборудования для очистки газов от загрязнённых выбросов в различных отраслях промышленности.

На базе института «СФ НИИОГАЗ» удалось сохранить квалифицированные кадры, уникальные лаборатории и стенды, а также технические разработки по новому оборудованию,

которые потребовали не только своего внедрения, но в условиях конкуренции возникла необходимость сосредоточиться на продолжении научно – исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) и реализации научных заделов в новые технические решения, направленные на повышение эффективности работы газоочистных и пылеулавливающих аппаратов.

Учитывая, что наибольшее распространение для очистки газов в различных отраслях промышленности и прежде всего в теплоэнергетике имеют электрофильтры, на разработку новых конструкций электрических фильтров и направлялись основные исследования.

Исторические аспекты. Ранее научные основы разработки электрофильтров в России осуществлялись в институте НИИОГАЗ (г. Москва) при активном участии Семибратовского филиала НИИОГАЗ (п. Семибратово, Ярославской области). По результатам НИОКР совместно с Семибратовским экспериментальным заводом газоочистительной аппаратуры (СЗГОА) осваивалось производство новых электрофильтров.

Основные достижения советского этапа развития отечественных электрофильтров состояли в следующем:

В отличие от электрофильтров типа УГ в 1980 году была разработана и освоена в серийном производстве конструкция электрофильтра типа ЭГА. Эти электрофильтры отличались пониженной на 28% металлоёмкостью осадительных электродов за счёт использования широкополосных элементов осадительного электрода типа СЧС-640, и исключения системы блоков в конструкции механизмов встряхивании электродов. Другая особенность в развитии электрофильтров состояла в поэтапном увеличении расстояния между электродами также с целью снижения металлоёмкости. В советское время удалось освоить электрофильтры типа ЭГБМ с расстоянием 350 мм между одноимёнными электродами, вместо 300 мм у аппарата ЭГА. По отношению к электрофильтрам ЭГА металлоёмкость была снижена до 15% [1].

В создании новых электрофильтров роль СФ НИИОГАЗа состояла в проведении исследований на полноразмерных образцах коронирующих и осадительных электродов электрофильтра и в испытаниях этих конструкций на долговечность под действием ударных нагрузок, необходимых для удаления с электродов осевшей под действием коронного разряда пыли. Достаточно отметить, что после первых стендовых испытаний опытных полноразмерных электродов электрофильтров ЭГА (конец 70-ых годов прошлого столетия) практически все ранее предложенные варианты конструкций разрушились после нескольких часов ударных нагрузок, что вызвало необходимость проведения дополнительных исследований, срочной корректировки рабочей документации и проведения новых испытаний.

При разработке электрофильтров важно было исследовать взаимозависимость между ударным воздействием и эффективным удалением слоя пыли с электродов, а при стендовых испытаниях – переход от ускоренного (форсированного) режима испытаний к реальному режиму ударного воздействия.

В этой связи в СФ НИИОГАЗ была создана методика определения и исследованы закономерности распределения уровня динамических ускорений при ударных нагрузках по элементам осадительных и коронирующих электродов, а также разработана методика ускоренных испытаний электродов на ударно – усталостную прочность. Достаточно отметить, что ускоренные испытания элементов коронирующих электродов позволили за 3-и часа оценить безотказность и долговечность элементов на период более 5-ти лет. Стенд для усталостных испытаний партии гибких стержней, к которым относятся элементы коронирующих электродов был выполнен на уровне авторского свидетельства № 1758497. На стенде и в настоящее время проводятся периодические испытания изготавливаемых элементов коронирующего электрода и исследования новых конструктивных решений по элементам.

В советский период при взаимодействии СФ НИИОГАЗ с заводом СЗГОА был разработан и внедрён новый способ изготовления электродов сухого электрофильтра (авторское свидетельство №1806855). Способ позволил существенно снизить затраты на изготовление осадительных электродов, а в частности балок встряхивания осадительных электродов.

Проблема заключалась в том, что в процессе изготовления балки подвергались отжигу в специальных печах. Отжиг использовался для снятия внутренних механических напряжений в сварных соединениях. Для снижения затрат на отжиг специализированным институтом Минхиммаша СССР (г. Волгоград) была разработана для Семибратовского завода установка, позволяющая проводить пульсирующее механическое воздействие на балки в течение определённого времени. При этом максимальные значения пульсаций напряжений кратковременно превышали предел текучести, что приводило к выравниванию напряжений в местах концентрации (в сварных соединениях) и к их снижению. Однако процесс снятия напряжений на предложенной установке также требовал немалых затрат.

Учитывая, что удар молотка по балке встряхивания, как и на установке, приводит к пульсациям механических напряжений, было предложено по разработанной методике СФ НИИОГАЗ оценить параметры ударного взаимодействия (масса балки, масса ударного молотка и скорость молотка в момент удара), которые обеспечивали бы максимальный уровень напряжений, превышающий предел текучести. Расчёт, стендовые испытания и последующая эксплуатация электрофильтров подтвердили долговечность системы осадительных электродов, выполненной с учётом расчёта параметров ударного взаимодействия, и возможность снятия

внутренних остаточных напряжений от ударных воздействий молотка по наковальне балки встряхивания при работе электрофильтра.

Таким образом, результаты проведённых исследований в СФ НИИОГАЗ позволили снизить металлоёмкость, повысить долговечность и уменьшить затраты на изготовление электрофильтров, чем заложили основу для дальнейшего их совершенствования, и в настоящее время большинство конструктивных решений и технологий изготовления основных узлов, отработанных ранее в СФ НИИОГАЗ для электрофильтров ЭГА, используются многими отечественными и зарубежными поставщиками электрофильтров.

Для создания нового поколения электрофильтров совместно с профильным институтом ЗАО «СФ НИИОГАЗ» в 2003 году была образована Холдинговая Группа.

Требования к электрофильтрам. Существующие требования по выбросам твёрдых частиц на ТЭС актуализированы в ИТС НТД 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» [1], и в соответствии с датой ввода установки очистки газов и зольностью угля для установок, введённых в строй с 01.01.2001. по 31.12.2025 г. нормативный уровень выбросов золы для ТЭС составляет 150–250 мг/м³ при нормальных условиях, а для установок, введённых в строй с 01.01.2026. – от 50 до 150 мг/м³ при нормальных условиях. В качестве газоочистных аппаратов предлагается использовать электрофильтры и рукавные фильтры.

Следует отметить, что в ИТС НДТ 38-2022 норма выбросов ужесточилась в 4–6 раз для установок, введённых с 01.01.2001. по 31.12.2025, и составила 150–250 вместо 900–1000 мг/м³ при нормальных условиях по ИТС НДТ 38-2017 [2]. Так, в связи с резкой актуализацией норм выбросов золы возникла проблема по разработке предложений по снижению выбросов ТЭС, которые позволили бы в оптимальном режиме осуществить мероприятия для выполнения более жёстких природоохранных требований.

К тому же сегодня в России Федеральный проект «Чистый воздух» направлен на достижение национальной цели «Экологическое благополучие», определенной Указом Президента РФ № 309 от 07.05.2024. Среди целевых показателей и задач - поэтапное снижение к 2036 году в два раза выбросов опасных загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

В условиях геополитической непредсказуемости разработка технических мероприятий и приоритетных методов снижения выбросов должны ориентироваться на развитие и внедрение прежде всего отечественного газоочистного и пылеулавливающего оборудования. Такое оборудование находится в ведении отрасли экологического машиностроения в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. № 1512-р «Сводная

стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 г. и на период до 2035 г.» с изменениями от 07.11.2023 г. [3] (далее Стратегия).

Стратегия направлена на формирование в Российской Федерации устойчивого промышленного сектора с высоким экспортным потенциалом, способного конкурировать на мировом рынке и обеспечивающего достижение национальных целей развития и технологического суверенитета.

В отрасли экологического машиностроения доля оборудования для фильтрования и очистки газов составляет около 40 %.

Согласно Стратегии, приоритеты развития газоочистного и пылеулавливающего оборудования включают:

- инновационное и форсированное развитие путём формирования научно-технической среды, обеспечивающей отрасль современными техническими и технологическими разработками и проектами;
- внедрение отечественного оборудования в проекты, направленные на значительное снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, обеспечение приоритетного использования отечественной продукции при решении задач модернизации.

Прогнозируемые показатели развития оборудования для фильтрования и очистки газов к концу 2035 года:

- объём производства возрастёт в 1,52 раза и составит 36,6 млрд. руб.;
- доля российского газоочистного и пылеулавливающего оборудования увеличится в 1,40 раза и составит 56 %. При этом, приоритетные группы отечественного газоочистного и пылеулавливающего оборудования (электрофильтры и рукавные фильтры) отстают от общего уровня импортозамещения в отрасли экологического машиностроения, и их доля на внутреннем рынке составила в 2024 г. лишь 40 % [4].

Согласно Стратегии, развитие и организация производства газоочистного и пылеулавливающего оборудования должны быть направлены на освоение инновационных отечественных технологий очистки загрязнённых выбросов с использованием технологичных методов изготовления оборудования.

Инновационный уровень отечественных технологий очистки выбросов электрофильтрами базируется на фундаментальных знаниях [5], которые представляются основой для достижения практических целей по снижению выбросов и решения конкретных задач по созданию новых типов продукции. Всё это в равной мере касается и технологий, необходимых для изготовления нового оборудования.

Результаты исследований и внедрений. На основании отечественных научных исследований были разработаны новые технические решения, позволившие интенсифицировать процесс электрической очистки и реализовать возможности по увеличению габаритных размеров фильтров в целях снижения выбросов. К ним относятся следующие решения.

1. Увеличение расстояния между электродами.
2. Разработка новых элементов коронирующих электродов.
3. Разработка новых элементов осадительного электрода.
4. Оптимизация межэлектродного расстояния.
5. Увеличение активной зоны по высоте электрофильтра.
6. Снижение полуактивных зон в конструкции электрофильтра.
7. Увеличение активной зоны по длине электрофильтра.
8. Разработка эффективной системы встряхивания электродов в электрофильтре.
9. Разработка нового алгоритма управления агрегатами питания электрофильтров.

Рассмотрим, как научные исследования реализовывались в конкретные технические решения, которые стали научно-технической основой для модернизации действующих и создания электрофильтров нового поколения для нового строительства.

1. Увеличение расстояния между электродами

Положительный эффект (сохранение эффективности электрофильтра) в результате увеличения межэлектродного расстояния в электрофильтре обусловлен ростом напряжённости у поверхности осадительного электрода [6].

История вопроса по увеличению расстояния между одноимёнными электродами начиналась с расстояния 275 мм для электрофильтров типа УГ, далее расстояние увеличивалось до 300, 350 400, 460 мм. В такой последовательности осуществлялось в последние десятилетия развитие электрофильтров, используемых в качестве аппаратов общепромышленного назначения [7].

Сложность создания электрофильтров с увеличенным расстоянием между электродами заключалась в том, что требовалась разработка нового электротехнического оборудования (опорные изоляторы, агрегаты питания и т. п.) для обеспечения повышенного уровня рабочего напряжения.

2. Разработка новых элементов коронирующих электродов

Широко используемые сегодня ленточно-игольчатые элементы исследованы и изобретены в СФ НИИОГАЗ ещё в 1967 г. [8]. Этот тип элемента выполнен в виде иголок,

расположенных на жёсткой профилированной ленте. Элемент обеспечивает повышенную эффективность и надёжность работы электрофильтра.

В настоящее время разработана конструкция элемента типа СФ-1, у которой по сравнению с ленточно-игольчатым элементом обеспечен меньший радиус кривизны конца иголки. Конструкция элемента защищена патентами RU 2229939 [9], RU 2448779 [10] и RU 2806207 [11].

Конструкция электрофильтра с такими элементами защищена патентом RU 159849 [12].

3. Разработка новых элементов осадительного электрода

Проведённые исследования показали, что одной из причин пониженной эффективности электрофильтров является недостаточная плоскостность осадительного электрода.

Элементы осадительных электродов и технология их производства, разработанные в АО «Кондор–Эко», защищены патентами RU 2377071 [13], RU 2729817 [14], RU 2743551 [15] и RU 2810475 [16].

4. Оптимизация межэлектродного расстояния

С учётом особенностей конструкции элемента СФ-1, разработано новое техническое решение RU 2655691 [17], обеспечивающее оптимальное расположение электродов в межэлектродном пространстве электрофильтра. Оптимальное размещение элементов электродных систем позволяет снижать выбросы по сравнению с первоначальной конструкцией межэлектродного промежутка, выполненного из ленточно-игольчатых элементов и элементов осадительного электрода типа СЧС-640.

5. Увеличение активной зоны по высоте электрофильтра

Для повышения эффективности электрофильтра при его реконструкции и модернизации возникает необходимость увеличения высоты электродов. Например, в теплоэнергетике, где реконструкция или модернизация часто возможны только на существующей площадке под электрофильтром.

С высотой электродов увеличивается расцентровка между осадительными и коронирующими электродами. Установлено, что расцентровка зависит от плоскостности электродов [18]. Проблема плоскостности осадительного электрода была решена путём применения новой технологии изготовления элемента осадительного электрода (см. п. 3).

6. Снижение полуактивных зон в конструкции электрофильтра

Конструкция коронирующего электрода электрофильтра состоит из отдельных рам. Отдельные рамы по высоте стыкуются между собой. Расстояние между иголками соседних рам в местах стыковки оказывается увеличенным.

Предлагаемая конструкция коронирующего электрода [19] выполнена с уменьшением количества полуактивных зон до 2,5 раза, что позволяет обеспечить повышение эффективности работы электрофильтра и снижение выбросов.

7. Увеличение активной зоны по длине электрофильтра

Повышение эффективности электрофильтра за счёт увеличения длины аппарата предлагалось реализовать путём установки дополнительных полей электрофильтра по ходу газового потока [6].

Учитывая, что при реконструкции размеры площадки под электрофильтром сохраняются, установка дополнительных электрических полей возможна только при новом строительстве.

В конструкции отечественных электрофильтров механизм встряхивания коронирующих электродов расположен в пространстве между электрическими полями по ходу газового потока, что требует увеличенного расстояния между полями. В связи с этим было принято решение по установке механизма встряхивания над электродами, в верхней части электрофильтра.

8. Разработка эффективной системы встряхивания электродов в электрофильтре

Эффективное встряхивание электродных систем позволяет уменьшить отложения пыли на поверхности электродов, тем самым активизировать электрическим режим работы электрофильтра и повысить эффективность очистки. Так, для встряхивания коронирующего электрода предложено использовать верхнее ударное воздействие (патент RU 2694661 [19]).

9. Разработка нового алгоритма управления агрегатами питания электрофильтров

Проведены испытания прибора управления агрегатом питания в целях обеспечения оптимального уровня предпробойного состояния электрофильтра.

Оценка влияния инновационных технических решений на повышение эффективности электрофильтров

В табл. 1 представлены основные технические решения, которые позволяют снижать выбросы путём обеспечения повышенной скорости дрейфа частиц к осадительному электроду и увеличения габаритных размеров электрофильтров, а также проведена оценка снижения выбросов в результате повышения скорости дрейфа.

Таблица 1

№ п/п	Направление исследований	Основные технические решения, патенты, год внедрения	Снижение выбросов
1.	Снижение напряжения зажигания короны	Элемент коронирующего электрода с минимальным радиусом кривизны, RU 2806207 [11], применяется с 2023 г.	в 2,2 раза
2.		Технология изготовления элементов осадительного электрода повышенной	в 1,5 раза

№ п/п	Направление исследований	Основные технические решения, патенты, год внедрения	Снижение выбросов
	Повышение пробивного напряжения	плоскостности RU 2810475 [16], применяется с 2023 г.	
		Оптимальная конструкция межэлектродного расстояния, RU 2655691 [17], применяется с 2018 г.	в 1,5 раза
3.	Снижение полуактивных зон	Выполнение коронирующего электрода рамной конструкции с пониженным числом полуактивных зон, RU 2694661 [19], применяется с 2019 г.	в 1,64 раза
4.	Алгоритм управления агрегатами питания	Для электрофильтров, в том числе улавливающих твёрдые частицы с высоким УЭС, применяется с 2019 г.	в 1,5 раза
Всего по п. 1-4			в 12,2 раза
5.	Увеличение активного объёма электрофильтра	Увеличение активной высоты электродов на 25 % (до 15 м), RU 2377071 [13], применяется с 2013 г., и RU 2694661 [19], применяется с 2019 г.	в 2,6 раза
		Увеличение активной длины полей на 16,6 % (до 4,48 м), RU 2694661 [19], применяется с 2019 г.	в 1,9 раза
Всего по пятому пункту			в 5,0 раз

Оценка получена на основании допущения о пропорциональности скорости дрейфа частиц к осадительному электроду квадрату напряжённости электрического поля, которая определяется уровнем напряжения и разрядным расстоянием. Ранее в [20] по аналогичному допущению были получены расчётные зависимости параметров работы электрофильтра (степени очистки газов и выходной запылённости) от расцентровки электродов электрофильтра.

Анализ данных табл. 1 показывает, что новые технические решения (п. 1–4) позволяют в тех же габаритных размерах снизить выбросы более чем в 12,2 раза. К тому же увеличение активного объёма электрофильтра (п. 5) позволяет практически решать вопросы снижения выбросов путём модернизации электрофильтра при улавливании твёрдых частиц с особыми свойствами, в том числе с высоким удельным электрическим сопротивлением [21].

С использованием новых технических решений на действующих электрофильтрах ТЭС в целях снижения выбросов реализованы следующие варианты модернизации.

Вариант 1. Использование в действующих электрофильтрах инновационных технических решений, допускающих взаимозаменяемость нового и существующего

оборудования. При этом достаточно осуществить замену электродов на такие же электроды, но с новыми элементами коронирующих и осадительных электродов.

Вариант 2. В дополнении к варианту 1 можно увеличить габаритные размеры электрофильтра с сохранением размеров площадки под электрофильтры:

- по высоте путём наращивания корпуса и использованием электродов высотой до 15 м;
- по ширине путём строительства общего корпуса вместо прежних двух;
- по длине путём переноса встряхивания коронирующих электродов из пространства между полями в верхнюю часть аппарата.

Результаты модернизации действующих электрофильтров в теплоэнергетике приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты модернизации электрофильтров ТЭС

Объект модернизации	Расстояние между электродами, мм	Объём газа, тыс. м ³ /ч	КПД, % / выходная запылённость, г/м ³ при нормальных условиях, до модернизации	КПД, % / остаточная запылённость, г/м ³ , после модернизации	Снижение выбросов
Омская ТЭЦ-5	350	612	97,9/1,47	99,83/0,119	12,35*
Новосибирская ТЭЦ-4	400	850	98,0 / 0,420	99,83/0,024	11,76**
Краснокаменская ТЭЦ	400	256	97,9/0,150	99,7/0,037	7,00*
Красноярская ТЭЦ-4	460	340	99,56/0,05	99,7/0,041	1,47***
Котельная «КрасМаш»	400	520	98,7/0,052	99,52/0,0126	2,71***
ТЭЦ «Вунг Анг», Вьетнам	400	2120	99,68/0,120	99,87/0,087	2,46***
Ново-Иркутская ТЭЦ	400	808	97,9 / 0,378	99,87 / 0,022	16,15*
Рефтинская ГРЭС, блок № 1	400	349,2	97,8/1,200	99,62/0,234	5,79**
Рефтинская ГРЭС, блок № 9	400	941	98,60/0,854	99,79/0,135	6,33**

* Модернизация в тех же габаритных размерах корпуса.

** Модернизация с увеличением габаритных размеров корпуса.

*** Новое строительство установок с электрофильтрами по типу ЭГАВ.

Анализ данных табл. 2 показывает, что после модернизации действующих электрофильтров выбросы золы снизились более чем в 10 раз, а при новом строительстве требуемый результат обеспечен с гарантией, достигнута эффективность очистки 99,87 %, а остаточная запылённость составила 0,012 мг/м³ при нормальных условиях. На Красноярской ТЭЦ-4 впервые пущен в эксплуатацию электрофильтр с расстоянием между одноимёнными электродами 460 мм, обеспечена остаточная запылённость 0,041 мг/м³ (по проекту 0,050 мг/м³ при нормальных условиях).

В целом разработанные научно-технические основы позволили создать новый инновационный электрофильтр типа ЭГАВ.

Оценка технического уровня электрофильтров. Электрофильтры нового поколения обеспечивают снижение уровня загрязняющих выбросов до десяти раз в сравнении с популярными на рынке аппаратами тех же габаритов, а по итогам XXVI Всероссийского Конкурса Программы «100 лучших товаров России» 2023 года, организуемого Академией проблем качества, электрофильтр типа ЭГАВ стал победителем.

За разработку способов изготовления элементов конструкции электрофильтров для снижения выбросов в атмосферу АО «Кондор – Эко» стало ЛАУРЕАТОМ национальной премии в области экологических технологий «ЭКОТЕХ-ЛИДЕР 2025».

Результаты разработок опубликованы в ведущих научно – технических журналах и докладывались на конференциях. Только за последние пять лет получено 11 патентов на изобретение и полезные модели, опубликовано 5 статей, в т.ч. в изданиях ВАК и за рубежом, сделано 11 докладов на международных конференциях по экологической тематике.

За разработку инновационных электрофильтров типа ЭГАВ и признанный вклад в развитие электротехнической науки и промышленности АО «Кондор – Эко» в 2018 году принято в члены ассоциации «Центр инноваций Академии Электротехнических Наук Российской Федерации». В настоящее время в обществе трудятся два доктора электротехники, четыре кандидата технических наук, академик и член – корреспондент АЭН РФ.

Заключение:

1. Достигнутый инновационный уровень электрофильтров ТЭС является результатом отечественных научных исследований и разработок. Актуальность и полезность исследований признаны Высшей научной общественностью.

2. Практическое внедрение инновационных технических решений элементов конструкции электрофильтров путём модернизации и нового строительства показало возможность снижения выбросов до 10 раз в тех же габаритах.
3. Предлагаемые инновационные электрофильтры позволяют решать задачи экологической безопасности отечественных ТЭС и быть независимыми от иностранных технологий.

Список литературы

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» – ИТС НТД 38-2022. – М.: Бюро НДТ, 2022. – 289 с., ил.
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» – ИТС НТД 38-2017. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 280 с., ил.
3. Распоряжение Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р (с изменениями на 7 ноября 2023 г.) «Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 г. и на период до 2035 г.» с.
4. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 27.10.2022 г. № 4516 «Об утверждении Плана мероприятий по импортозамещению в отрасли экологического машиностроения до 2024 г.».
5. **Чекалов Л. В.** Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. – М.: МЭИ, 2007. – 40 с.
6. **Верещагин И. П.** Очистка дымовых газов от угольной золы с высоким удельным электрическим сопротивлением / И. П. Верещагин, П. С. Платонов, Г. И. Субботина и др. // Электрические станции. 2010. № 10. С. 28–33.
7. **Гришечкин А. К.** Фильтры индустриальные газоочистные / А. К. Гришечкин, А. А. Грачёв, В. Д. Новиков; под ред. В. К. Севрюкова, Б. С. Фёдорова. – Ярославль: Русь, 2000. – 72 с.
8. Авторское свидетельство № 204322 СССР. Ленточный элемент коронирующего электрода / А. Д. Мальгин, В. П. Махин, И. К. Решидов // Бюл. Изобретения. 1967. № 22.
9. Пат. 2229939 РФ. Элемент коронирующего электрода электрофильтра / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, Н. А. Курицын, Ю. И. Санаев // Бюл. Изобретения. 2004. № 16.
10. Пат. 2448779 РФ. Коронирующий электрод / Л. В. Чекалов, М. Е. Смирнов, Ю. И. Санаев // Бюл. Изобретения. 2012. № 12.
11. Пат. 2806207 РФ. Элемент коронирующего электрода электрофильтра / Е. Л. Жученко, М. Е. Смирнов, В. А. Гузаев // Бюл. Изобретения. 2023. № 31.
12. Пат. 159849 РФ. Электрофильтр / Л. В. Чекалов, Ю. И. Санаев // Бюл. Изобретения. 2016. № 5.
13. Пат. 2377071 РФ. Способ изготовления элементов осадительных электродов для электрофильтра / Л. В. Чекалов, С. А. Шапошник // Бюл. Изобретения. 2009. № 36.
14. Пат. 2729817 РФ. Способ изготовления осадительных электродов электрофильтра / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, И. Л. Чекалов и др. // Бюл. Изобретения. 2020. № 23.
15. Пат. 2743551 РФ. Способ изготовления элементов осадительного электрода для электрофильтра / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, П. М. Смирнов // Бюл. Изобретения. 2021. № 5.
16. Пат. 2810475 РФ. Способ изготовления элемента осадительного электрода электрофильтра / Е. Л. Жученко, М. Е. Смирнов, В. А. Гузаев // Бюл. Изобретения. 2023. № 36.
17. Пат. 2655691 РФ. Электрофильтр / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, М. А. Копансков // Бюл. Изобретения. 2018. № 16.
18. **Чекалов Л. В.** Повышение эффективности электрофильтров тепловых электростанций путём совершенствования осадительных электродов / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, М. Е. Смирнов // Электрические станции. 2021. № 7. С. 48–54.
19. Пат. 2694661 РФ. Электрофильтр / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, М. Е. Смирнов // Бюл. Изобретения. 2019. № 20.
20. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Под ред. Л. В. Чекалова. – Ярославль: Русь, 2004. – 424с. – С. 193.



21. **Чекалов Л. В.** Решение проблемы улавливания высокоомной золы электрофильтрами / Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, М. Е. Смирнов // Электрические станции. 2020. № 4. С. 54–59.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В КЕРАМИЧЕСКИХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ

КРАСНЫЙ Б.Л., Д.Т.Н., КРАСНЫЙ А.Б., К.Т.Н., СЕРЕБРЯНСКИЙ Д.А., К.Т.Н,
САНДИН А.В., БУДАНОВ И.А. (ООО «НТЦ «Бакор»)

Статья посвящена актуальной проблеме снижения выбросов загрязняющих веществ от теплоэнергетического комплекса России, вклад которого составляет 11,6 % от общероссийского объема выбросов. Основное внимание уделяется выбросам диоксида серы (SO_2) и оксидов азота (NO_x), образующимся при сжигании угля. Авторы констатируют, что значительная доля пылеугольных котлов в РФ не соответствует технологическим нормативам по выбросам SO_2 и NO_x согласно справочникам НДТ, при этом концентрации загрязняющих веществ могут достигать 3000 мг/м^3 и 1000 мг/м^3 соответственно. В работе проанализированы применяемые на российских ТЭС методы очистки, такие как мокрые золоуловители, электрофильтры и рукавные фильтры, а также первичные и вторичные методы снижения выбросов, включая селективное некаталитическое восстановление (SNCR) и скрубберы. Особое внимание уделено рассмотрению перспективных зарубежных технологий комплексной очистки, таких как $SNOX^{\text{TM}}$ и $SNRB^{\text{TM}}$, демонстрирующих высокую эффективность (до 95 % для SO_2 и 94 % для NO_x) и экономические преимущества. В качестве ключевого направления для отечественной энергетики представлены разработки отечественной компании «НТЦ «Бакор» в области высокотемпературных керамических фильтрующих элементов с интегрированным катализатором. Приведены результаты успешных полупромышленных испытаний экспериментальной установки, где была достигнута комплексная эффективность очистки от NO_x на уровне 92 % и от SO_2 на уровне 96 % при температуре 370°C . Делается вывод о применимости разработанной технологии каталитической фильтрации как для модернизации существующих угольных энергоблоков, так и для других энергоемких производств со схожей структурой выбросов.

Ключевые слова: керамический каталитический фильтр, сорбция, катализ, эффективность очистки, термическое обезвреживание отходов.

Теплоэнергетический комплекс России выбрасывает в атмосферный воздух около 11,6 % от всего объема загрязняющих веществ. В структуре данных выбросов, образуемых при сжигании, например, угля, это: диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода и зола. Данные загрязняющие вещества приняты в виде маркерных и приведены в ИТС 38-2024 для топливо-сжигающих энергетических установок от 50 МВт.

Среди основных аппаратов очистки на российских ТЭС применяют мокрые золоуловители (МВ, МС, МП, ММК), на котлах малой и средней мощности применяют батарейные циклоны, на котлах большой мощности – электрофильтры. Рукавные фильтры установлены лишь на нескольких ТЭС в настоящее время [1]. По данным [1], более 40 %

пылеугольных колов в РФ не удовлетворяют технологическим нормативам на выбросы диоксида серы в соответствии с ИТС НДТ 38-2022. С выходом нового справочника ИТС 38-2024 эта цифра стала больше. Так, при сжигании малосернистых углей, концентрация SO_2 в дымовых газах достигает 1500 мг/м^3 , а при сжигании углей с содержанием серы более 0,5 % – до 3000 мг/м^3 . У более чем 25 % котлов выбросы оксидов азота не удовлетворяют технологическим показателям. Концентрация NO_x при сжигании бурых углей достигает 800 мг/м^3 , а при сжигании каменных углей – до 1000 мг/м^3 (справедливо для «старых» котлов, введенных в эксплуатацию до 31.12.2000 г., что составляет 95 % от всех пылеугольных котлов (или свыше 550 котлов)).

Среди методов для снижения выбросов оксидов азота в [2] рекомендуется: умеренный контролируемый недожог топлива, нестехиометрическое сжигание, двух и трехступенчатое сжигание, рециркуляция продуктов сгорания в зону горения, применение малоэмиссионных горелок. Среди вторичных мер – установки очистки от окислов азота по технологии селективного некаталитического восстановления оксидов азота (СНКВ).

Среди методов для снижения выбросов оксидов серы в [2] рекомендуется: применение скрубберов Вентури или кольцевых эмульгаторов с орошением щелочными растворами. Положительный опыт имеется на Дорогобужской ТЭЦ, где с 1995 по 2003 год работала установка сероочистки по аммиачно-сульфатной технологии с получением сульфата аммония в качестве азотного удобрения. Эффективность очистки газов от SO_2 в данной установке достигала 35 %.

Компания Alstom реализовала систему сероочистки NID на Черепетской ГРЭС, расположенной в Тульской области. Смонтированная газоочистная установка блоков № 8, 9 электростанции была запроектирована для работы в автоматизированном режиме с поддержанием требуемой степени пылесероочистки. Система работает по технологии с циркулирующей инертной массой и предполагает рециркуляцию в системе большого количества пыле-сорбентной смеси золы и извести, в результате чего запыленность дымовых газов на входе в электрофильтр может достигать 1000 г/м^3 . При такой запыленности дымовых газов обеспечение стабильной работы электрофильтров является трудноосуществимой задачей, так как необходимая степень золоулавливания в 99,995 % является крайне высоким показателем для электрофильтров. В 2017 году на Черепетской ГРЭС проводился ряд работ, в том числе и НИОКР, по доработке оборудования сероочистки, а также по достижению показателей содержания диоксида серы в дымовых газах (до 400 мг/м^3 при н.у.), твердых частиц (до 50 мг/м^3 при н.у. на сухой газ) и 6 % об. O_2 .

В качестве перспективной технологии в [2] рассматривается возможность применения селективного каталитического восстановления оксидов азота аммиаком или аммиачной водой. Данная технология была внедрена на Московской северной ТЭЦ 27 в 1997 году за газомазутными котлами. Данная система позволяет достичь до 90 % эффективности очистки. Ограничивающим фактором широкого внедрения такой технологии в том числе являлось отсутствие отечественного производителя сменных каталитических блоков.

В 1990-х годах по заказу министерства энергетики США и при участии различных коммерческих компаний была проведена масштабная работа по отработке технологий комплексной очистки газов от SO₂ и NO_x за угольными энергоблоками. Для сравнения различных технологий очистки были внедрены пилотные установки, работающие по следующим технологиям (расходы очищаемых газов через пилотные установки составили 10 тыс. нм³/час) [3]:

- **SNOXTM** – технология компании Haldor Topsoe с получением серной кислоты. Процесс начинается с охлаждения и очистки газов от золы в рукавном фильтре, далее нагрев отфильтрованного газа до 400 °С для подготовки к селективному каталитическому восстановлению (SCR). В реакторе SCR оксиды азота восстанавливаются аммиаком на катализаторе до безвредного азота. После SCR газ, содержащий остаточный NH₃, дополнительно нагревается до 415 °С для оптимальной работы конвертера SO₂. В нем на катализаторе более 95 % диоксида серы окисляется до SO₃. Попутно происходит полное окисление непрореагировавшего аммиака, что исключает его выброс и позволяет использовать компактную систему SCR. Далее горячий газ охлаждается в теплообменнике до ~100 °С в конденсаторе WSA. При охлаждении SO₃ и пары воды реагируют с образованием серной кислоты (H₂SO₄), которая конденсируется и собирается в виде товарного концентрата.

Технология SNOXTM продемонстрировала высокую эффективность, стабильно достигая целевые показатели по удалению NO_x (KNO_x=93-94 %) и более 95 % SO₂. Побочный продукт в виде серной кислоты (H₂SO₄) имеет концентрацию 94,7 %, что соответствует высокой степени очистки и успешно реализуется на рынке как побочный продукт системы очистки газов. Экономическая оценка для электростанции 500 МВт показывает, что капитальные затраты на установку составляют 305000 \$/МВт или около 12 млрд. рублей на электростанцию данной мощности (по курсу 80 руб/\$). По сравнению с комбинацией традиционных технологий (мокрый скруббер + SCR), система SNOXTM требует на 13 % меньше капитальных вложений и более чем на 50 % меньше эксплуатационных расходов.

- **SNRB™** Технология SNRB™ интегрирует удаление SO_2 , NO_x и твердых частиц в едином высокотемпературном фильтре, установленном между экономайзером и воздухоподогревателем. SO_2 удаляется путем впрыска сухого сорбента на основе кальция или натрия перед фильтром. Твердые частицы улавливаются высокотемпературными волокнистыми керамическими фильтрующими элементами, а NO_x восстанавливается по технологии SCR: аммиак впрыскивается перед фильтром, а катализатор размещен непосредственно в теле фильтрующих элементов. Ключевые преимущества — снижение загрязнения и коррозии воздухоподогревателя за счет очистки газов до него, что позволяет снизить их температуру на выходе, повысить рекуперацию энергии и общий КПД котла.

Данная технология показала высокую эффективность при рабочей температуре керамического фильтра 433 °C и выше. При молярном соотношении Ca/S 1,8 удаление SO_2 превышает 80 % с использованием 40-45 % сорбента на основе гашеной извести, что значительно превосходит типичные показатели в 60 % при 30 % использовании сорбента в других процессах. Для натриевых сорбентов эффективность превышает 90 % при стехиометрическом соотношении (NSR) 1,0. Каталитическое восстановление NO_x обеспечивает 90 % эффективность с проскоком аммиака менее 5 ppm в температурном диапазоне 370-480 °C. Ключевое преимущество SNRB™ — минимальное окисление SO_2 в SO_3 (менее 0,5 %), что предотвращает проблемы коррозии и загрязнения. Эффективность удаления частиц превышает 99 %, включая большинство следовых элементов. Система показала надежность 99 % без деградации компонентов. Технология наиболее применима для модернизации существующих котлов мощностью 100-200 МВт.

- **интегрированная система NO_x/SO_2** включает в себя некаталитическое селективное восстановление оксидов азота путем впрыска аммиака в высокотемпературную зону топки, применение горелочного устройства с низкой эмиссией NO_x , полусухую систему подачи щелочных реагентов и очистку газов от взвешенных частиц в рукавном фильтре.

В ходе испытаний интегрированная система на основе СНКВ (с впрыском мочевины) и сухой сорбционной инъекции натриевых сорбентов показала высокую эффективность. Горелки с низким уровнем NO_x (LNB) обеспечили снижение выбросов NO_x на 62-69 %. Дополнительное применение СНКВ увеличило общее снижение NO_x до 80 % и более. Полусухой скруббер с подачей бикарбоната натрия достиг эффективности очистки около 70 % по удалению SO_2 при стехиометрическом соотношении 1,0. Ключевым синергетическим

эффектом является поглощение полусухим скруббером избыточного аммиака из СНКВ, что решает проблему его проскока и позволяет оптимизировать процесс.

Данная интеграция технологий, запатентованная PSCo, представляет собой экономичную альтернативу традиционным мокрым скрубберам и системам SCR, особенно применимую для модернизации угольных энергоблоков малой и средней мощности.

ООО «НТЦ «Бакор» на основе собственных разработок освоил серийный выпуск керамических волокнистых высокотемпературных фильтрующих элементов и фильтровальных установок на их основе [4-12]. В период с 2021 года компанией были проведены полупромышленные испытания фильтровальных установок на основе ФГБК в различных отраслях промышленности: в черной и цветной металлургии, на горно-обогатительных предприятиях, предприятиях по производству минеральной изоляции, предприятиях по термическому обезвреживанию отходов и др. Полученные результаты по эффективности очистки газов от взвешенных частиц показывают, что во всех приведенных случаях остаточная концентрация после керамического фильтра не превышает 10 мг/м³. Также специалистами НТЦ «Бакор» проводились экспериментальные работы по селективному каталитическому восстановлению NO_x аммиаком в условиях действующего производства стекла. Как известно, производство стекла сопряжено с выделением в атмосферный воздух следующих маркерных веществ: NO_x, SO₂, взвешенные частицы. Данные загрязняющие вещества характерны как для стекольного производства, так и для производства электрической и тепловой энергии на угольных ТЭС. Типичные значения концентраций загрязняющих веществ этих производств приведены в таблице 1.

Таблица 1

Типичные значения выбросов загрязняющих веществ

Название вещества	Типичные значения выбросов в атмосферу от стекловаренных печей	Типичные значения выбросов в атмосферу от КТЭУ при сжигании твердых топлив на «старых» котлах	Типичные значения выбросов в атмосферу от КТЭУ при сжигании твердых топлив на «новых» котлах
	Концентрация, мг/м ³ (н.у.)		
Пыль	17-430	250-900	150-250
Оксиды азота (NO _x)	384 - 3355	600-1000	500-650
Диоксид серы (SO ₂)	150 - 2100	1400-3000	700-1400
СО	-	300-400	300-400

Как видно из приведенных в таблице данных, типичные значения выбросов NOx в случае стекловаренных печей существенно превосходят выбросы от КТЭУ при сжигании твердых топлив, поэтому можно говорить о применимости данной технологии селективного каталитического восстановления оксидов азота к производству электрической и тепловой энергии на угольных ТЭС.

Для проведения работ по отработке технологии СКВ, в ООО «НТЦ «Бакор» были изготовлены опытные образцы керамических волокнистых фильтров с интегрированным внутрь катализатором DeNOx и специальная экспериментальная установка с системой подготовки газа, представляющая собой фильтрационную ячейку с установленным каталитическим фильтром (рис. 1, 2). Опытная экспериментальная установка работает следующим образом: очищаемые газы из газохода отбираются при помощи пылеотборной трубки и через гибкий шланг направляются в обогреваемую линию, снабженную точкой ввода восстановительного агента (аммиачная вода, мочевины), который подается в линию при помощи дозирующего насоса. Внутри обогреваемой линии для равномерного перемешивания очищаемых газов с восстановителем смонтирован завихритель потока. Далее реакционная смесь подается на фильтровальную ячейку, в которой установлен каталитический керамический фильтр. Фильтровальная ячейка состоит из двух камер: нижней для неочищенного газа и верхней – для очищенного газа. Верхняя и нижняя камеры оснащены нагревательным кольцевым устройством, которое обеспечивает нагрев по уставке блока управления потока до 600 °С. Поток, направленный в камеру неочищенного газа, догревается до необходимой температуры и, проходя пористую структуру керамического фильтрующего элемента, очищается от пыли, взаимодействуя с катализатором, закреплённым на его волокнах. При этом происходит восстановление присутствующих NOx до молекулярного азота. Также внутрь фильтра загружается гашеная известь для проведения экспериментальных работ по оценке эффективности одновременного протекания процессов сероочистки и денитрификации. Очищенный газ отводится из фильтрационной ячейки через верхнюю камеру очищенного газа в окружающую среду.



Рисунок 1. Фотография экспериментального каталитического фильтра



Рисунок 2. Фотография экспериментальной установки

За время проведения экспериментальных работ среднее содержание NO_x в отходящих газах стекловаренной печи составило 1850 мг/нм^3 , при этом среднее содержание SO_2 было 720 мг/нм^3 . После пропускания газа через каталитический фильтрующий элемент при 370°C , остаточное содержание оксидов азота и диоксида серы составляло 148 и 28 мг/нм^3 соответственно. Эти показатели отвечали степеням конверсии 92 и 96% для NO_x и SO_2 , соответственно.

Стоит отметить, что керамические фильтрующие элементы с каталитической пропиткой выпускаются в НТЦ Бакор диаметром до 150 мм и длиной до 8000 мм (рис.3), а фильтровальные установки на их основе имеют модульную конструкцию с объемом очищаемых газов от 1850 до более чем $1 \text{ млн.м}^3/\text{час}$ (рис.4).

Керамические фильтрующие элементы с каталитической пропиткой способны надежно обеспечивать существующие и перспективные технологические нормативы на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Срок службы фильтрующих элементов составляет от двух до трех лет.

В структуре компании НТЦ Бакор работает научно-исследовательский центр «Экология» с лабораторией газоочистки. Лаборатория газоочистки оснащена парком поверенных средств измерений и компетентным персоналом для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В настоящее время сотрудниками лаборатории выполнено более 25 -ти работ в различных отраслях промышленности, среди которых: цветная и черная металлургия, химическая и цементная отрасль, предприятия по термическому обезвреживанию отходов. Результатом данных работ является отработка различных технологий комплексной очистки

газов с проведением экспериментальных исследований на пилотных экспериментальных установках, имеющихся в НТЦ Бакор, проектирование систем и аппаратов очистки газов и составление технико-коммерческих предложений для предприятий-заказчиков.



Без каталитической пропитки



С каталитической пропиткой



Рисунок 4. Модульная фильтровальная установка на основе керамических каталитических фильтров

Рисунок 3. Высокотемпературный волокнистый керамический фильтрующий элемент

Заключение.

1. Снижение выбросов взвешенных частиц, оксидов азота и диоксида серы для отечественных угольных электростанций является актуальной задачей. Технологические показатели маркерных веществ в настоящее время отражены в информационно – техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2024.

2. В соответствии с данными, приведенными в ИТС 38-2024, 37 % котлов, пущенных в эксплуатацию после 2001 года, превышают нормативный показатель по выбросам оксидов азота. Техническим решением для таких котлов могут быть как ряд режимных технологических методов снижения их образования, так и применение селективного некаталитического восстановления оксидов азота. Однако для котлов, запущенных в эксплуатацию с 01.01.2026 г, целесообразным является установка селективного каталитического восстановления оксидов азота для достижения более жёсткого норматива (для БУ – ТШУ/ЖШУ: 300/300; для КУ - ТШУ/ЖШУ: 470/640 мг/м³).

3. Развитие технологии высокотемпературной комплексной очистки газов от взвешенных частиц, диоксида серы и оксидов азота в температурном окне 350-400 0С в последние годы находит широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как металлургия,

производство стекла и т.д. Основа данного решения – применение фильтрующих элементов из муллитокремнеземистого волокна с пропиткой восстановительным катализатором.

4. Приведенные в данной статье результаты промышленных испытаний пилотной опытно-экспериментальной установки в условиях действующего производства флоат линии производства стекла показали высокую эффективность данной технологии, обеспечив конверсии 92 и 96 % для NO_x и SO₂, соответственно. Концентрация взвешенных частиц после очистки составила менее 10 мг/м³.

5. Предлагаемая технология может быть использована в энергетике при комплексной очистке газов твердотопливных котлов от взвешенных частиц, SO₂ и NO_x.

Список литературы

1. ИТС 38-2024 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии».
2. **Росляков П.В., О.Е. Кондратьева, Гусева Т.В.,** Проблемы адаптации оборудования ТЭС к технологическим показателям выбросов ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» Теплоэнергетика, 2023, № 10, с 115-123.
3. Technologies for the Combined Control of Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides Emissions from Coal-Fired Boilers The U.S. Department of Energy MAY 1999
4. **Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б., Вальдберг А.Ю. и др.** Высокотемпературная очистка горячих дымовых газов промышленных печей от пыли фильтрующими элементами из пористой проницаемой керамики. Новые огнеупоры № 11 – 2006 С. 43-48.
5. Устройство для изготовления изделий с волокнистой структурой. Красный Б.Л., Киселев В.Г. и др. Патент №2307702. 10.10.2007 Бюл. №28.
6. Способ изготовления керамического фильтрующего элемента с волокнистой структурой. Красный Б.Л., Красный А.Б. и др. Патент №2371423. 27.10.2009 Бюл. №30.
7. Способ изготовления фильтрующего элемента для очистки горячего газа: пат. 2789585 Рос. Федерация № 2022100662; заявл. 14.01.2022; опубл. 06.02.2023; Бюл. № 4. 29 с.
8. **Sizova A., Rodimov O., Galganova A.** Influence of drying process on the aluminosilicate fiber hot gases filter element properties// Ceramics International. 2022. Vol. 48., Is. 19., Part B. P. 29165-29174.
9. Комплексная химическая очистка дымовых газов установок термического обезвреживания отходов с помощью каталитического фильтра. Б.Л. Красный, М.Н. Королев, Д.А. Серебрянский, А.А. Сластилов, С.Р. Хайрулин, С.А. Яшник, З.Р. Исмаилов. Экология и промышленность России. 2023. №27(7). С. 4-10.
10. Comprehensive Chemical Cleaning of Flue Gases of Thermal Waste Treatment Plants Using a Catalytic Filter" B.L. Krasny, M.N. Korolev, D.A. Serebryansky et.al. Ecology and Industry of Russia. July 2023. PP 4-10.
11. Термическое обезвреживание отходов в печах с инновационной системой газоочистки в керамическом каталитическом фильтре. Б.Л. Красный, А.Б. Красный, М.Н. Королев, Д.Д. Бернт, Д.А. Серебрянский, М.О. Дорохин, М.В. Антонов, А.А. Сластилов. Материалы международной научно – технической конференции. Экология в энергетике ВТИ 2023 г.
12. Формирование структуры высокотемпературного фильтрующего элемента на основе алюмосиликатных волокон с применением криотехнологии. Сизова А.С. автореферат к.т.н. Москва 2024 г.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ РАСТОПКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ И ПОДЪЕМА УГОЛЬНЫХ ТЭЦ «С НУЛЯ»

**МАЛЬЧУГОВ А.С.¹, КУЧАНОВ С.Н.¹, КОЧЕРГИН Д.О.¹, ПОЧТАРЬ А.С.^{1,2},
ВИНОГРАДОВ С.В.^{1,2}, ПОТКИН Н.А.^{1,2}** (¹ – ООО «КОТЭС – Инновационные технологии», ² – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» РФ, г. Новосибирск)

В статье представлены результаты промышленной эксплуатации системы безмазутного розжига КОТЭС в условиях подъема Новосибирской ТЭЦ-3 с «нуля». Отмечены особенности использования системы, которые позволяют улучшить экологические и экономические показатели угольного энергетического объекта.

Ключевые слова: Система безмазутного розжига, растопка, безмазутная растопка, розжиг, угольная пыли, пылевоздушная смесь, мазут, ТЭЦ, ТЭС

Введение

В настоящее время сжигание мазута создаёт ряд проблем, которые становятся всё более актуальными особенно для угольных теплоэлектростанций (ТЭС), где этот вид топлива является растопочным. Мазут – дорогостоящее топливо, требующее наличия и функционирования на каждой ТЭС мазутного хозяйства, строительство и содержание которого связано со значительными капитальными вложениями. Помимо этого, в момент растопки пылеугольного котлоагрегата мазутом, все системы фильтрации дымовых газов должны быть отключены по технологическим соображениям. В связи с этим возникают серьёзные экологические проблемы, особенно в момент подъема станции с «нуля», а значит разработка и внедрение эффективной системы безмазутного розжига (СБР) несет целый ряд полезных возможностей с технико-экономической точки зрения.

Растопка и подсветка пылеугольного котлоагрегата является одним из ключевых и крайне важных этапов эксплуатации. Одним из путей развития угольной энергетики является исследование и внедрение систем, с помощью которых возможно растапливать пылеугольные котлоагрегаты и стабилизировать угольный факел.

В настоящее время стоимость мазута превышает стоимость угля в 4-5 раз. Кроме того, с переходом на более глубокую переработку нефти с высокой долей выхода светлых нефтепродуктов для российской энергетики мазут будет становиться более дефицитным топливом.

Развитие системы безмазутного розжига КОТЭС

КОТЭС ведет длительную деятельность по разработке способов безмазутной растопки пылеугольных котлов. В 2009 году был получен первый патент с использованием физико-химических свойств газового электрического разряда. Формирование такого типа разряда осуществляется с использованием источников питания, построенных на элементной базе силовой электроники, которая стала широкодоступной начиная с 2000-х годов.

Начиная с 2019 года и по сегодняшний день в компании КОТЭС выполнен большой объем работ, которые дали возможность создать серию горелок типа ГРПУ (горелка растопочная пылеугольная), для пылеугольной растопки с использованием устройства воспламенения электроионизационного (УВЭИ), технология защищена патентами РФ. В конструкции горелок ГРПУ с УВЭИ используются циклонный принцип подачи топлива и воздуха для воспламенения, с дополнительным разделением такой подачи на ступени горения, что обеспечивает гарантированное воспламенение и широкий диапазон регулирования производительности горелки ГРПУ. Такая технология, с использованием УВЭИ, включена в список наилучших доступных технологий (НДТ) актуализированного справочника ИТС 38-2024 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии».

Исторически, в РФ технология сжигания угольной пыли с использованием плазмы имела название - электротермохимическая подготовка топлива к сжиганию (ЭТХПТ) с использованием плазменно-топливных систем (ПТС). В качестве базового оборудования для ПТС использовался электродуговой плазмотрон. Химическая активность такой плазмы обеспечена в основном за счет термической активации. Основными недостатками такой технологии являются низкая эксплуатационная надежность и повышенные требования к стационарному оборудованию.

Начиная с 2009 г. начала развиваться технология с названием –электрохимическая технология сжигания (ЭХТС), в основе которой лежал газовый разряд с низкотемпературной неравновесной плазмой и смещением спектра излучения в ультрафиолетовую зону. Конструктивные решения на первых этапах развития технологии ЭХТС предполагали горелки проточного типа с электродной системой, размещаемой в потоке пылеугольного топлива, в результате чего такие горелки обладают очень узким диапазоном по производительности. За

пределами этого узкого диапазона нагрузки не обеспечивалось стабильное воспламенение и устойчивое горение в полости горелки.

Начиная с 2020 года был предложен новый подход к конструированию растопочных пылеугольных горелок с использованием циклонного принципа подачи топлива с воздухом и дополнительным разделением такой подачи топлива с воздухом на ступени горения. При этом электродный узел был вынесен из потока пылеугольного топлива. Новые технологические подходы были объединены общим названием – технологии с использованием электроионизационных воспламенителей – УВЭИ. Конструкторско-технологические возможности УВЭИ обеспечивали новые технологические возможности с широким диапазоном регулирования тепловой нагрузки и повышенным ресурсом непрерывной работы ГРПУ.

Описание системы безмазутного розжига на Новосибирской ТЭЦ-3

Комплекс СБР на Новосибирской ТЭЦ-3 для котлоагрегата БКЗ-320-140 ПТ-5 ст. №10 представляет собой две ГРПУ разных модификаций с современной системой управления и мониторинга, а также оснащён удобным и информативным автоматизированным рабочим местом (АРМ).

На момент сентября 2025 года на котлоагрегате в стационарные горелочные устройства (ГУ) №1 и №4 смонтированы ГРПУ 3.0 и ГРПУ 2.0, отличие между вышеупомянутыми моделями заключается в организации ступенчатого сжигания угольной пыли и выходным диаметром ГУ. ГРПУ 3.0 (Рисунок 1) является циклонным коаксиальным двухступенчатым ГУ с разным диаметром первой и второй ступени, а также обладает повышенной тепловой мощностью. В свою очередь ГРПУ 2.0 является циклонным двухступенчатым горелочным устройством с одним диаметром по всей длине.

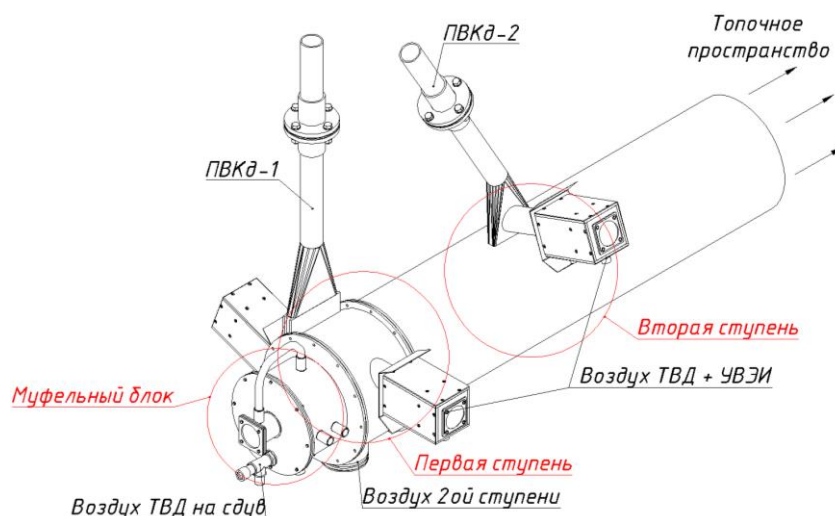


Рисунок 1. Общий вид ГРПУ 3.0

Установленная СБР на Новосибирской ТЭЦ-3 имеет следующие сходства по горелочным устройствам:

- Обе горелки целиком изготовлены из жаропрочной нержавеющей стали, для максимально продолжительного срока эксплуатации.
- Каждая горелка оснащается встроенным внутренним муфельным блоком, обеспечивающем предварительный разогрев горелки для надежного и безопасного старта из холодного состояния, а также для расширения диапазона работы системы при отклонениях качества пыли по тонине помола, влажности и составу.
- Каждая горелка оснащается модульными воспламенителями типа УВЭИ. Конструкция воспламенителей обеспечивает визуальный контроль наличия электрического разряда в каждой горелке, а также возможность оперативной замены всего модуля воспламенителя в случае его отказа. Каждый воспламенитель комплектуется специализированным источником питания электрического разряда среднего напряжения 10 кВ и высокой частоты более 20 кГц, размещаемыми на рабочей площадке у котлоагрегата.
- СБР оборудована двумя идентичными наборами датчиков измерения температуры, расположенных в характерных местах каждого горелочного устройства. Это позволяет оценивать режим работы системы и следить за изменениями температуры металла горелок и газов в их внутреннем объеме. Также организован контроль расхода воздуха на каждую горелку, контроль работы внутреннего электромuffеля и контроль работы источников питания воспламенителей.
- Управление СБР может быть обеспечено, как в местном режиме с рабочей площадки у горелок с лицевой панели шкафа местного управления, так и в дистанционном режиме с АРМ-а оператора в ГРЦУ.
- Топливоподача на обе ступени каждой ГРПУ организована с применением технологии пыли высокой концентрации под давлением (ПВКд) по вновь смонтированным растопочным пылепроводам со своими смесителями (эжекторами), для транспортировки угольной пыли. Предварительно перед эксплуатацией СБР, необходимо переключить течку угольной пыли со штатного пылепровода на растопочный, с помощью специализированной гибкой вставки (Рисунок 2). Пылепитатели участвующие в растопке имеют возможность переключения от штатной системы управления на растопочную.

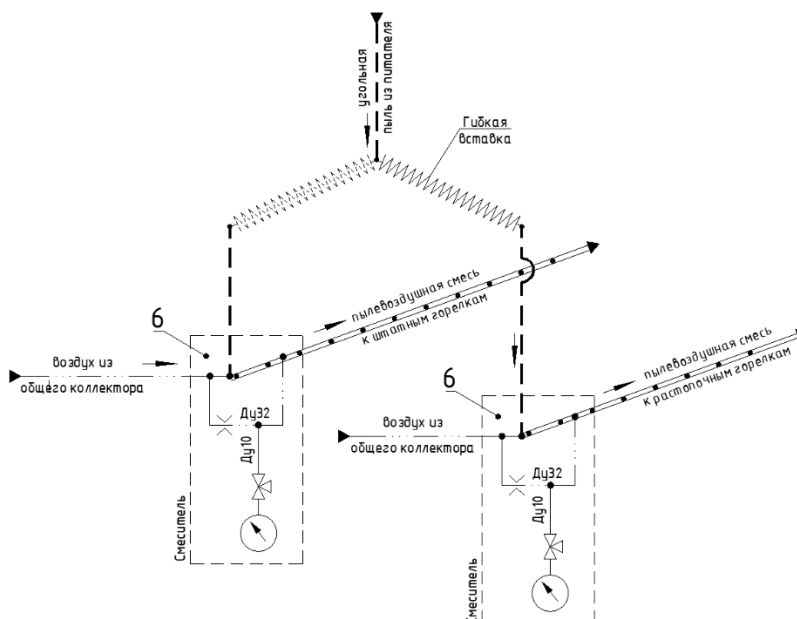


Рисунок 2. Система переключения потока пылевоздушной смеси от штатных горелок к растопочным

Первый пуск Новосибирской ТЭЦ-3 с «нуля»

Растопка пылеугольного котлоагрегата БКЗ-320-140 ПТ-5 мазутом обычно продолжается 5-6 часов. В 2021-2022 году КОТЭС внедрило систему безмазутного розжига, состоящую из двух растопочных пылеугольных горелок (ГРПУ) и комплекса автоматизации и управления. С помощью установленной системы удаётся растапливать котлоагрегат без применения мазутного топлива.

На момент июня 2024 года проведена растопка котлоагрегата ст. № 10 и удержание его в режиме развёртывания парового контура станции «с нуля». В период с 14.05.24 по 10.06.24 НТЭЦ-3 была остановлена по причине ремонта дымовой трубы. По завершении периода останова, у эксплуатации станции был вариант растопки первого котла с помощью системы безмазутного розжига. С первых минут работы системы безмазутного розжига был включен электрофильтр, что позволило существенно улучшить экологические показатели процесса растопки котлоагрегата и подъема станции с «нуля» в целом. Растопка котла длилась ~ 6 часов, последующая работа горелок (порядка 15 часов) была необходима для подсветки и удержания низкой нагрузки котлоагрегата для нагрева мазута и обеспечения его циркуляции в мазутном кольце, а также прогрева паропроводов.

К окончанию растопки на хвостовых поверхностях нагрева отсутствовали отложения сепарации несгоревшей пыли, что подтвердило одну из важных особенностей системы – минимальный объём уноса несгоревшего топлива. Технологию также отличают низкие выбросы оксидов азота, управляемость и стабильность. Собственная система автоматики

обеспечивает простоту управления, удобный мониторинг данных для обслуживающего персонала, а также помогает поддерживать работоспособность системы УВЭИ при помощи самодиагностики. Безопасность технологии подтвердила экспертиза промышленной безопасности.

Второй пуск Новосибирской ТЭЦ-3 с «нуля»

В периоде с июль по август 2025 г. Новосибирская ТЭЦ-3 был произведен полный останов станции, в связи с выводом ее в холодное состояния для проведение капитального ремонта основного оборудования. По завершении периода останова было принято решение повторение успешного опыта 2024 г. по разворачиванию парового контура станции с «нуля» с помощью системы безмазутного розжига. Немаловажным фактором использования СБР является высокая степень маневренности выработки тепловой нагрузки, которую обеспечивает система безмазутной растопки КОТЭС.

Растопка и поддержание котла в режиме обеспечения поднятия станции с «нуля» началась двумя растопочными пылеугольными горелками. Во время начала растопочных действий был включен электрофильтр котла, для повышения экологических показателей работы котлоагрегата в момент подъема. Повышение тепловой мощности ГРПУ осуществлялся с контролем перекося температуры барабана, без скачков тепловой нагрузки в связи с отсутствием парового обогрева барабана котлоагрегата. Первые 10 часов котлоагрегат работал на низких параметрах, для прогрева мазута и обеспечения его циркуляции в мазутном кольце станции. Спустя 8 часов растопки были достигнуты необходимые параметры в поворотной камере котлоагрегата для запуска штатной системы пылеподачи и были запущены два штатных пылепитателя, пылепровода которых входят в нижние яруса основных ГУ. В последующие часы работа велась в аналогичной конфигурации. На полученных параметрах котла запускалась пылесистема, для пополнения бункера пыли, в это время были введены ещё два пылепитателя, с попеременным включением, для выравнивания температуры газов между полутопками котла. Давление пара в барабане варьировалось в диапазоне 60-80 кгс/см² и осуществлялся разбор пара на обогрев основных паропроводов и теплотехнического оборудования станции. Спустя 30 часов давление в барабане составляло 130 кгс/см², производительность двух ГРПУ снижена на 15% по причине ввода в работу в общей сложности пяти штатных пылепитателей. В последующем был запущен прогрев турбоагрегата и через 3 часа турбина ст. №12 была синхронизирована с сетью и начался набор нагрузки, в это же время котлоагрегат ст. №10 вышел на номинальные параметры пара.

Общее время непрерывной работы СБР КОТЭС составило 38 часов, поднятие станции с «нуля» удобно и безопасно осуществлять путем пуска из холодного состояния котла,

оснащенного СБР КОТЭС. В процессе работы системы на хвостовых поверхностях котла отсутствуют видимые отложения сепарации несгоревшей пыли. По данным лабораторного анализа пробы на этот «нештатный» период по доле недожога, получено значение 1,7%. На весь период растопки и разогрева парового контура станции можно включать электрофильтр растапливаемого котла, оснащённого СБР, что обеспечивает требуемые экологические показатели при работе системы очистки газов на весь этот «нештатный» период.

Экологический эффект

Для оценки экологического эффекта была использована адаптирована методика определения экологических показателей при сжигании твердого и жидкого топлива для растопочного режима и проведен сравнительный анализ экологических характеристик для котлоагрегата БКЗ-320-140 ПТ-5 при использовании мазутной и безмазутной растопки. Результат сравнительного анализа демонстрирует преимущества угольного топлива перед мазутом по всем экологическим показателям. Выбросы твердых частиц при сжигании угля на 75 % меньше, чем при сжигании мазута, оксидов серы (SO_x) на 91 % меньше, оксид углерода (CO) на 62 % меньше, также в отличие от угля при сжигании мазута в атмосферу выбрасываются токсичные загрязняющие вещества: оксид ванадия (V_2O_5) и бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$). Переход на использование твердого топлива во время растопки может способствовать снижению выбросов вредных веществ и улучшению экологической ситуации. Разработка и внедрение технологий безмазутного воспламенения являются перспективным направлением для повышения экологической безопасности работы котлоагрегатов и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Заключение

Внедрение подобной технологии позволяет полностью освободиться от дополнительного растопочного топлива, оптимизировать режимы сжигания топлива и расширить диапазоны стабильного горения пылевого факела. Перспективы технологии УВЭИ КОТЭС достаточно серьезные. Уже завершено оснащение котлов БКЗ-320-140 и БКЗ-420-140 и получен положительный опыт пуска котла с холодного состояния, а также выполняется проектирование новых энергоблоков Улан-Удэнской ТЭЦ-2 с применением технологии безмазутного розжига.

Полный отказ от использования мазутного хозяйства на угольных ТЭС представляется одним из путей совершенствования технологии производства тепловой и электрической энергии. Применение технологии безмазутной растопки позволит улучшить экономические показатели эксплуатации угольных ТЭС за счет уменьшения стоимости растопок котлоагрегатов. Безмазутный розжиг предотвращает образование выбросов серы, оксидов ванадия и бензапирена, которые сопровождают растопку с использованием мазута, тем самым,

существенно снижает влияние ТЭС на окружающую среду. Операции растопки и подсветки на пылеугольных котлах с использованием технологии УВЭИ позволяют полностью отказаться от использования мазута на ТЭС и проводить растопку с включенными электрофильтрами, что уменьшает выбросы загрязняющих веществ на несколько порядков. С использованием технологии безмазутного розжига, этап работы, который был самым неблагоприятным для окружающей среды, становится штатной работой с минимальным объемом выбросов.

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ЗА СЧЁТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРИТОПОЧНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ В СУЩЕСТВУЮЩИЕ ГОРЕЛКИ (FLUE-GAS INTERNAL RECIRCULATION – FIR ТЕХНОЛОГИЯ) ДЛЯ МАЛОЗАТРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ППЭЭ ГАЗОВЫХ ТЭС РОССИИ

ГРИГОРЬЕВ Д.Р. (ООО «ЭКОГОР», г. Москва, Россия)

В статье рассмотрен вопрос малозатратной реализации программ повышения экологической эффективности газовых станций за счёт модернизации горелочных устройств путём надстройки в горелке дополнительного периферийного газового канала с организацией внутритопочной рециркуляции дымовых газов. Данная технология имеет широкое распространение в Мирове в горелках третьего поколения (Flue-gas Internal Recirculation – FIR технология). Суть технологии заключается в том, что газовые сопла периферийного канала, выведенные за пределы воздушного потока из горелки, размещены по периметру амбразуры в топке и обеспечивают организацию внутритопочной рециркуляции дымовых газов, за счёт эжекции струями природного газа дымовых газов из топки. Природный газ разбавляется дымовыми газами, что обеспечивает сжигание природного газа с меньшими концентрациями реагирующих веществ. В статье представлены иллюстрации демонстрирующие технические решения по модернизации горелок для котлов ТГМП-314, ТГМП-314П и ТГМП-204.

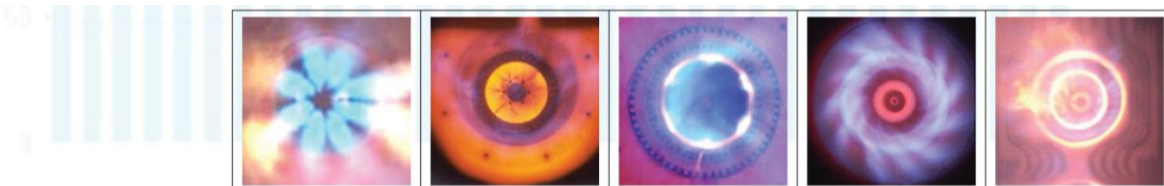
Ключевые слова: ТЭС, программа повышения экологической эффективности, котел, оксиды азота, горелочное устройство, внутритопочная рециркуляция дымовых газов

В соответствии с законодательством России по охране окружающей среды более 5000 предприятий разработали КЭР с обязательным приложением – программой повышения экологической эффективности (ППЭЭ). В соответствии с утвержденными ППЭЭ газовые ТЭС такие как: Костромская ГРЭС (ПАО ИнтерРАО, котлы ТГМП-114, ТГМП-314, ТГМП-1202), Кармановская ГРЭС (ИнтерРАО, ПК-41), Ириклинская ГРЭС (ИнтерРАО, ПК-41, ТГМП-114, ТГМП-314), Печерская ГРЭС (ИнтерРАО, ТГМЕ-206), Сургутская ГРЭС-2 (Юнипро, ТГМП-204) и др., запланировали природоохранные мероприятия (в основном замена горелок) с целью снижения выбросов оксидов азота с существующего уровня 500-700 мг/м³, до требований нормативных документов – 350 мг/м³. Котлы, установленные на рассматриваемых ГРЭС, имеют высоконапряженные топочные устройства и в соответствии с классификацией газомазутных котлов по характеристикам зоны активного горения для выбора

воздухоохранных мероприятий, описанной в литературе [1], являются котлами с высоким теплонапряжением зоны активного горения и большой продолжительностью пребывания продуктов сгорания в области высоких температур, что говорит о весьма благоприятных условиях формирования высокого уровня выбросов NO_x .

В заводском исполнении рассматриваемые котлы имеют ограничения по доли подачи рециркуляции дымовых газов, связанные с особенностью конструкции котла и работы пароперегревателя. Некоторые блоки рассматриваемых ГРЭС прошли модернизацию турбинного оборудования с увеличением мощности на 10%, что привело к работе котла в форсированном режиме, и накладывает дополнительные ограничения по применению как ДРГ, так и ступенчатого сжигания.

В соответствии с озвученными ограничениями, производимые в России горелочные устройства, такие как ГМВИ, ГМПВ, ГМУ (первого поколения в соответствии с описанной классификацией в [2, 3] рисунок 1), не способны снизить оксиды азота до целевых показателей, без снижения надёжности и экономичности работы котла.



Поколение горелок	Первое (1-е)	Второе (2-е)	Третье (3-е)	Четвёртое (4-е)	Пятое (5-е)
Достижимый уровень NO_x без РДГ, мг/м ³	100	80	60	—	—
с РДГ, мг/м ³	80	60	30	20	10
Метод подавления оксидов азота	Ступенчатость по топливу и воздуху	Предварительное частичное смешение, ступенчатость по топливу и воздуху	Организация внутритопочной рециркуляции дымовых газов	Организация полного быстрого смешивания + газы рециркуляция до 40 %	Организация полного быстрого смешивания + газы рециркуляция до 40 %

Рисунок 1. Поколения низкотоксичных горелок.

Решить проблему способны горелки третьего поколения и выше [4, 5], которое в Россию не производится.

В настоящее время многие компании разработали горелки третьего поколения, использующие организацию внутритопочной рециркуляции дымовых газов (Flue-gas Internal Recirculation – FIR технология) [6]. На рисунке 2 представлены схемы горелок различных зарубежных фирм, использующих внутритопочную рециркуляцию.



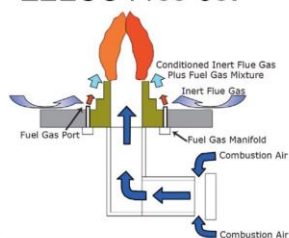
Горелки Третьего поколения

Наилучшие доступные технологии сжигания

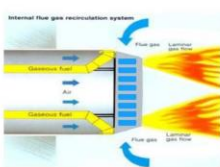


Третье (3-е) поколение: Организация внутритопочной рециркуляции дымовых газов. NOx без ДРГ – 60 мг/м³, с ДРГ – 30 мг/м³

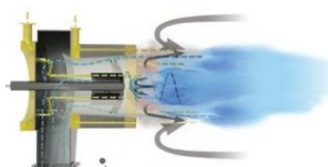
ZEECO Free-Jet



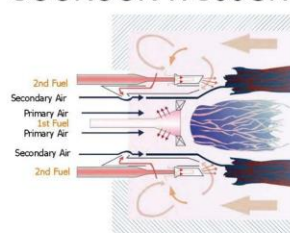
EBICO ECGNQR(D)



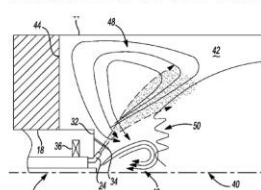
SAACKE DDZG - LN



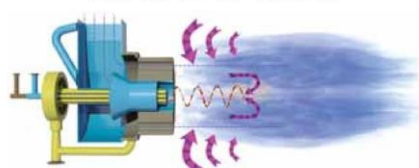
SOOKOOK WS90GN



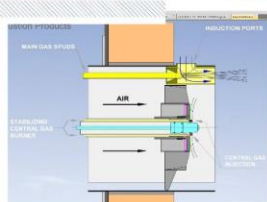
ELCO RPD GL-EUF



SAACKE TF-DDZG



Pillard LoNOxFlam® G2



THG-30-ME-TS-LF

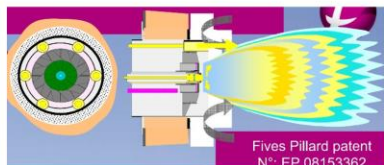
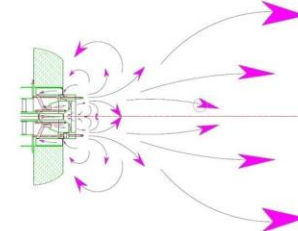


Рис. 2 Схемы организации горения с внутритопочной рециркуляцией дымовых газов (FIR) в горелочных устройствах различных зарубежных компаний.

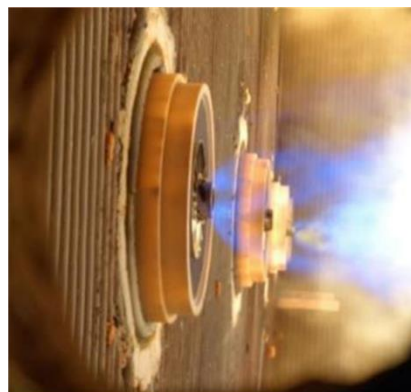
В России есть несколько объектов на которых внедрены горелки третьего поколения. Компания «ЭКОГОР» принимал участие в реализации проектов с горелками компании ZEECO (США) [7, 8], рисунок 3.



Котел Е-210 (210 т/ч),
4-е горелки Zeeco FJ по 40 МВт
NO_x = 60 мг/м³
без ДРГ и третичного дутья.

Современная система сжигания, обеспечивающая требования гётеборгского протокола за счет применения низкотоксичных горелочных устройств Zeeco Free Jet

Григорьев Д.Р., Гамбург М., Котлер В.Р.
Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 56-63.



Котел ТПЕ-430 (500 т/ч),
8-м горелок Zeeco FJ по 45 МВт
NO_x = 92 мг/м³
без ДРГ

Внедрение на энергетическом котле горелочных устройств с внутритопочной рециркуляцией дымовых газов.

Н. А. Зройчиков, Д. Р. Григорьев, М. Gamburg, А. В. Пай.
Теплоэнергетика, 2021. № 11, с. 71-79.

8

Рис. 3. Результаты внедрения горелок третьего поколения с внутритопочной рециркуляцией дымовых газов (FIR) компании ZEECO (США).

На основании проведенных исследований на реконструированных котлах с иностранными горелками третьего поколения и в результате проведения расчётных и стендовых исследований, специалистами компании «ЭКОГОР» разработан и запатентован [9], способ модернизации существующих горелок, который обеспечит снижение выбросов NO_x более чем на 50%, без существенных капитальных и временных затрат. Суть модернизации заключается в установке дополнительного газораздающего канала, которое выводит газовые сопла в топку котла по периметру амбразуры за пределы воздуха. Сама горелка и система управления горением не меняются.

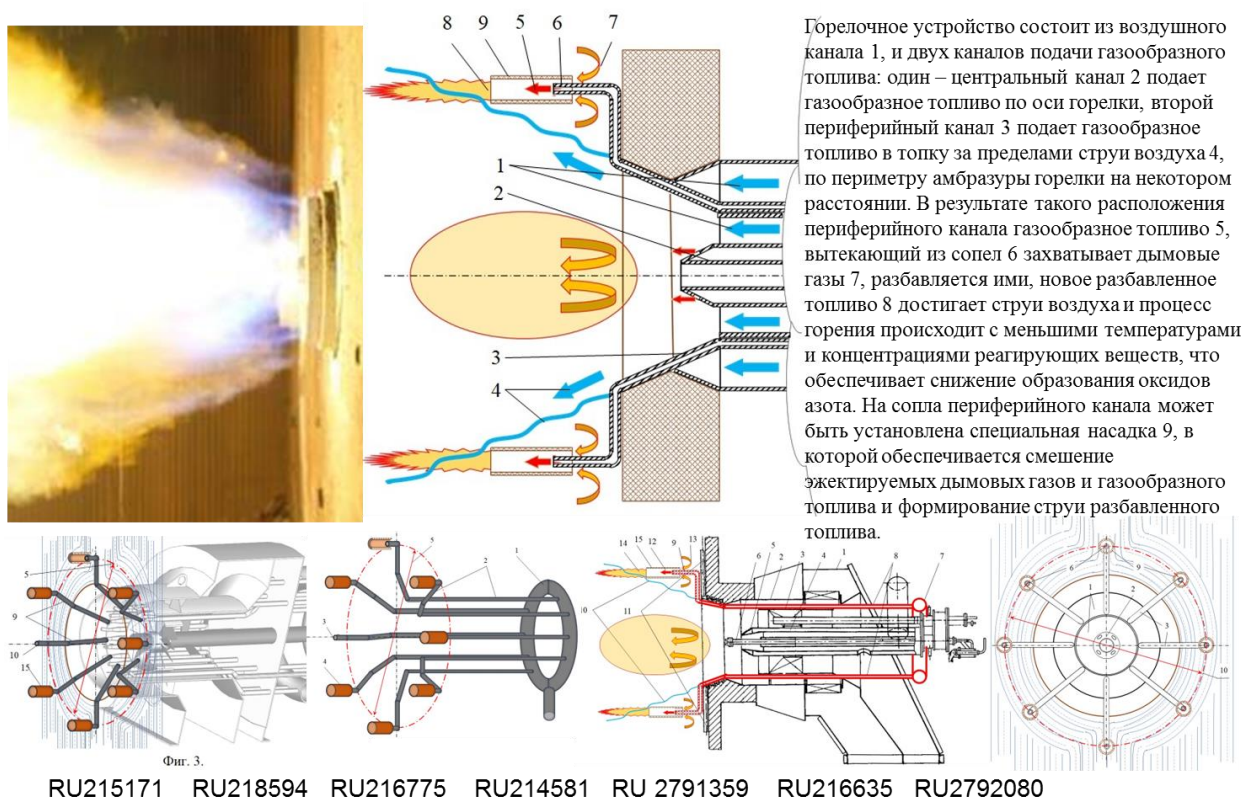


Рис. 4. Технические решения, описанные в патентах по модернизации существующих горелок в горелки третьего поколения с организацией внутритопочной рециркуляции дымовых газов

В настоящее время компания «ЭКОГОР» ведёт совместные работы с котельным заводом в России по разработке конструкции газораздающих сопел периферийного канала для модернизации заводской горелки первого поколения в горелку третьего поколения за счёт установки периферийного газового канала. Проведён большой объём расчётных работ и стендовых испытаний горелки с различными вариантами насадок периферийного канала. Результаты стендовых испытаний показали, что, при равных условиях топочного пространства стенда, применение насадок периферийного канала снижают выбросы оксидов азота в 4-е раза относительно заводского исполнения горелки с центральной подачей природного газа. Идут подготовительные работы по испытанию технологии на котле.

Анализ расчётных и экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о возможности успешного применения разработанного способа модернизации существующих горелок для реализации ППЭЭ газовых ТЭС России без дорогостоящей и трудозатратной замены горелок. Предлагается на существующую на котле горелку установить дополнительный газовый канал с соплами для организации внутритопочной рециркуляции дымовых газов.

На рисунке 5, 6, 7 представлены поперечные разрезы горелок с дополнительным газовым каналом (выделен красным), и схема организации внутритопочной рециркуляции при сжигании

газа в периферийном канале. Дополнительный газовый канал состоит из общего коллектора и газораздающих трубок, выводящих внешние газовые сопла в топку котла. На газовых соплах устанавливаются смесительные устройства. Газовые сопла периферийного канала, выведенные за пределы воздушного потока из горелки, размещены по периметру амбразуры в топке и обеспечивают организацию внутритопочной рециркуляции дымовых газов, за счет эжекции струями природного газа дымовых газов из топки. Природный газ разбавляется дымовыми газами, что обеспечивает сжигание природного газа с меньшими концентрациями реагирующих веществ.

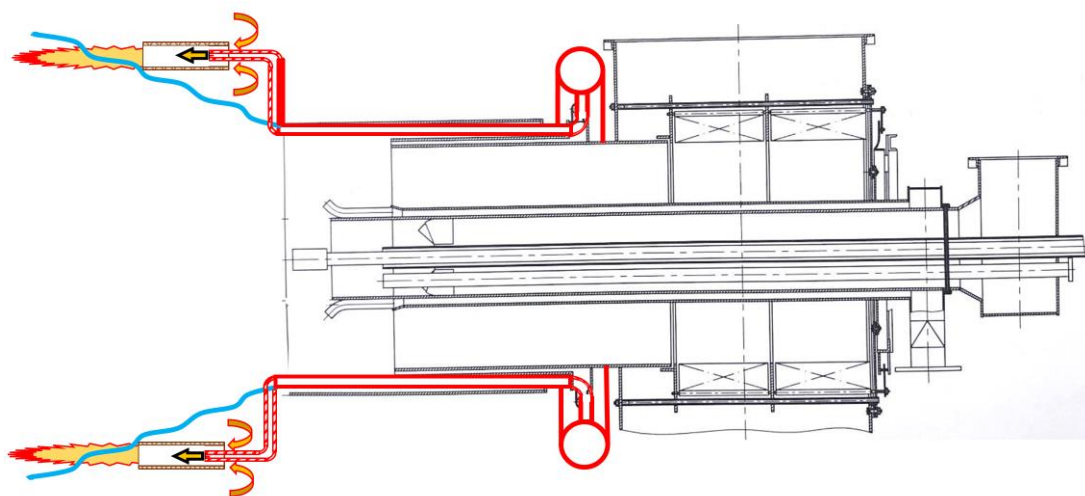


Рис. 5. Поперечный разрез модернизированной горелки котла ТГМП-314, указана схема организации внутритопочной рециркуляции при сжигании газа с использованием периферийного газового канала

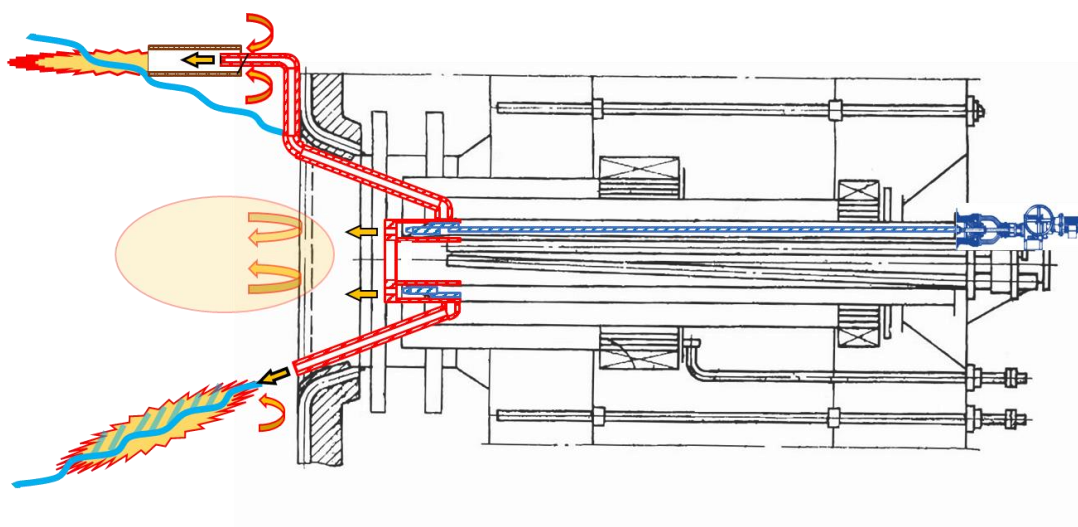


Рис. 6. Поперечный разрез модернизированной горелки котла ТГМП-204, с устройством для регулирования расхода топливного газа между центральным и периферийным каналом топливного газа

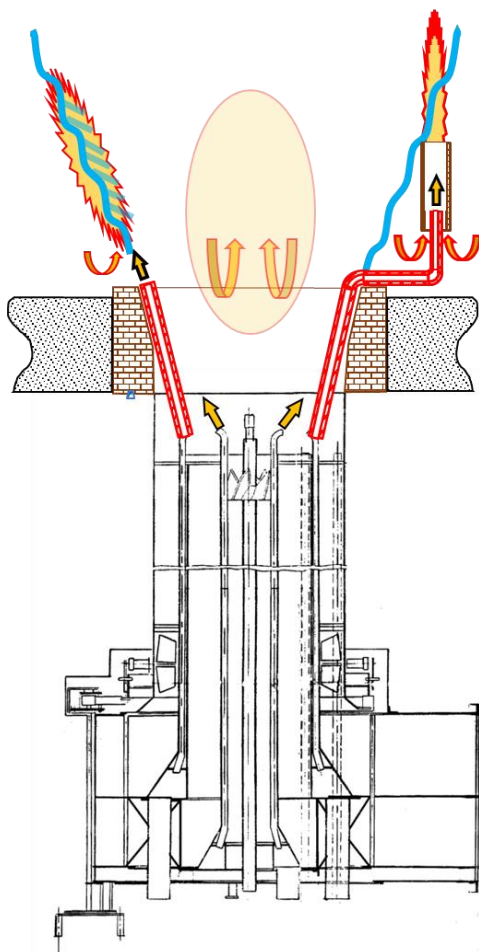


Рис. 7. Поперечный разрез модернизированной подовой горелки котла ТГМП-314П.

На ринке 8, 9 представлены виды из топки на модернизированную горелку.

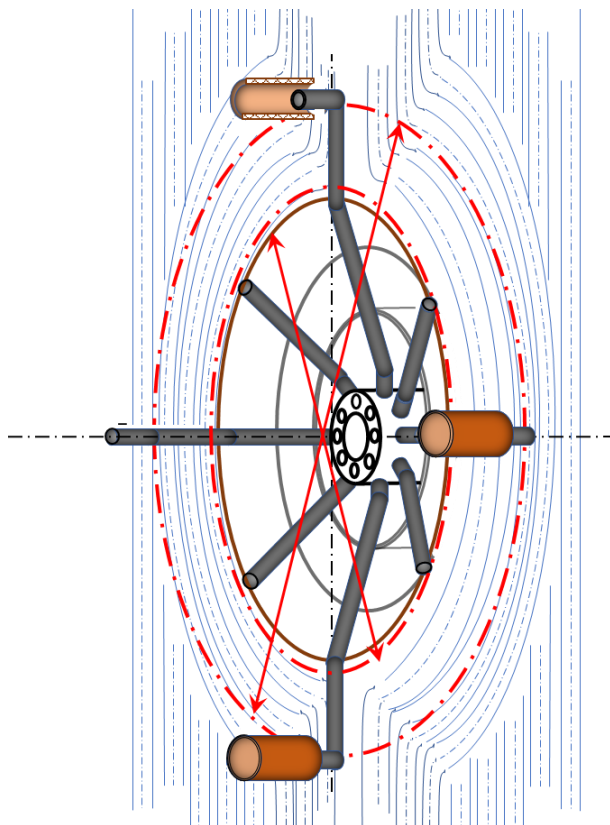


Рис. 8. Вид из топки на модернизированную горелку с вынесенными соплами дополнительного газового канала

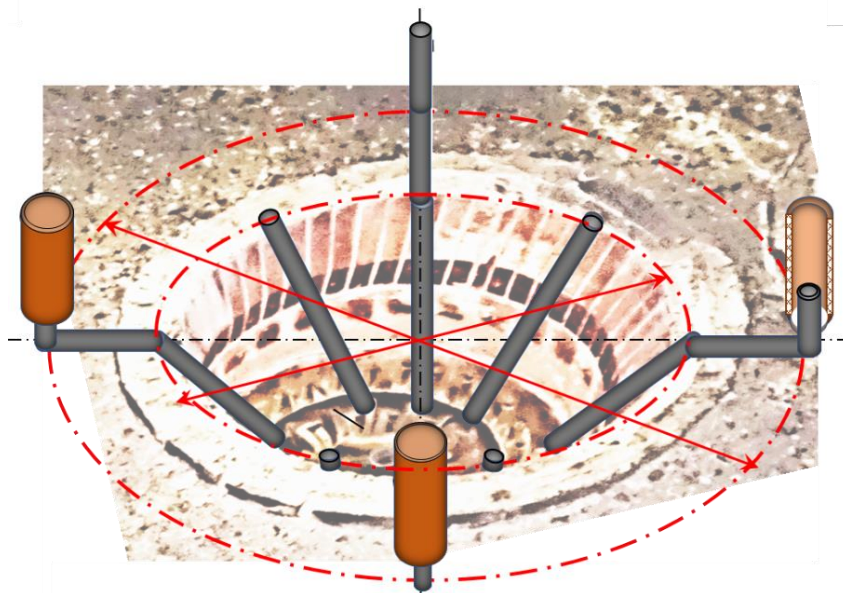


Рис. 9. Вид из топки на модернизированную подовую горелку котла с вынесенными соплами дополнительного газового канала

Строительно-монтажные работы на один котёл будут состоять из: монтажа дополнительного газораздающих устройств периферийного канала, строительство лесов в

топке, монтажа сопел внутритопочной рециркуляции, обвязки коллектора дополнительного газораздающих устройств с установкой регулирующей газовой задвижки.

Предлагаемая реконструкция горелок не требует изменение экранов топки, амбразур горелок и внешних конструкций котла в пределах горелок.

Схема работы горелки выглядит следующим образом: пуск котла происходит на центральном канале горелки, сопла которого находятся внутри воздушного потока горелки. После набора нагрузки выше 20% и разогрева топки до достаточных температур природный газ подают в периферийный газовый канал. Дальнейший набор нагрузки происходит на периферийном газовом канале, центральный газовый канал используется для обеспечения устойчивого воспламенения.

Заключение.

Реализация федерального проекта «Чистый воздух» в плане снижения выбросов оксидов азота на газовых тепловых станциях может быть реализована без больших капитальных затрат, связанных с заменой горелочных устройств или внедрением вторичных методов подавления оксидов азота. Технология сжигания природного газа с организацией внутритопочной рециркуляцией дымовых газов широко распространена в мире и апробирована в России. Затраты на реализацию ППЭЭ с использованием предлагаемого способа снижения выбросов оксидов азота за счёт внедрения технологии внутритопочной рециркуляции в существующие горелки составят в 5–10 раз меньше, а срок реализации мероприятия в 3–5 раз быстрее чем установка новых горелочных устройств. Стоит обратить внимание, что в настоящее время нет горелок третьего поколения Российского производства способных снизить выбросы NOx до целевых показателей на крупных энергетических котлах с высоконапряженным топочным пространством.

Список литературы

1. Классификация газомазутных котлов по характеристикам зоны активного горения для выбора воздухоохраных мероприятий. Ионкин И.Л., Росляков П.В., Егорова // Л.Е. «Теплоэнергетика» / 2000, № 1, с. 69-74.
2. Опыт штата Калифорния в снижении выбросов оксидов азота. Майкл Гамбург, Уильям Теста, Григорьев Д.Р. Тезисы доклада научно-технического совещания «Нормативно-методическое и технологическое обеспечение воздухоохранной деятельности энергопредприятий» 16-17 февраля 2011г. ОАО «ВТИ». г. Москва
3. **Григорьев Д.Р.** Экология без потерь эффективности – это возможно! Григорьев Д.Р. Вести в электроэнергетике. 2020. № 5. С. 22-23
4. Требования к выбросам оксидов азота при сжигании газа в КНР, горелочные устройства обеспечивающие требования. Д.Р. Григорьев. С 93-96. Техническое перевооружение ТЭС — масштабы и приоритеты. Совершенствование основного и вспомогательного оборудования, технологических схем и систем [Текст]: сб. докл. / под общ. ред. канд. техн. Наук Д.В. Тарадая // Международная научно-техническая конференция. — М.: АО «ВТИ», 2024.

5. Усовершенствованная технология снижения выбросов NOx при сжигании газа. Шпаков Д.В., Никулин А.О., «Промышленная Энергетика» № 12 (2018), 51-52 с.
6. **Zhu, Lingli & Wang, Xiaojia & Shen, Dekui.** (2023). Review and Perspectives of Novel Flue-Gas Internal Recirculation Combustion Technology for Low Nitrogen Emission: Fundamentals, Performance, Method, and Applications for Conventional Fossil Fuels and Sustainable e-Fuels. *Energy & Fuels*. 37. 10.1021/acs.energyfuels.3c00611.
https://www.researchgate.net/publication/371747937_Review_and_Perspectives_of_Novel_Flue-Gas_Internal_Recirculation_Combustion_Technology_for_Low_Nitrogen_Emission_Fundamentals_Performance_Method_and_Applications_for_Conventional_Fossil_Fuels_and_Sust
7. **Григорьев Д.Р., Гамбург М., Котлер В.Р.** Современная система сжигания, обеспечивающая требования гётеборгского протокола за счет применения низкотоксичных горелочных устройств zeeco free jet Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 56-63.
8. **Зройчиков Н. А., Григорьев Д. Р., Gamburg М., Пай А. В.** Внедрение на энергетическом котле горелочных устройств с внутритопочной рециркуляцией дымовых газов. Теплоэнергетика, 2021. № 11, с. 71-79.
9. Патент на изобретение RU 2777164 C1 «Способ снижения выбросов оксидов азота и преобразования горелки в низкотоксичную, устройство для его реализации».

ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ АММИАЧНЫМ МЕТОДОМ С ПОЛУЧЕНИЕМ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: СВЕРХНИЗКИЕ ВЫБРОСЫ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИКА ВЛАДЕНИЯ

АХСАНОВ А.В., РЕШЕТНИКОВ Е.А. (АО ТПИ «ЭКОМАШ-М»)

Представлен опыт проектирования и внедрения аммиачной десульфуризации дымовых газов. Технология обеспечивает целевые уровни «сверхнизких» выбросов: пыль $< 5 \text{ мг/м}^3$, $\text{SO}_2 < 35 \text{ мг/м}^3$, $\text{NH}_3 < 3 \text{ мг/м}^3$ при эффективности удаления $\text{SO}_2 \geq 98 \%$. Важной особенностью является получение товарного $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, что улучшает экономику владения по сравнению с известняково-гипсовой схемой.

Практическая ценность подхода проявляется не только в лабораторных показателях, но и в устойчивости параметров на реальных площадках, где условия эксплуатации редко бывают идеальными.

Ключевые слова: десульфуризация, аммиак, SO_2 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, сверхнизкие выбросы, мокрая абсорбция, демистер, экономическая эффективность.

Введение

Ужесточение норм по диоксиду серы и твёрдым частицам требует перехода к технологиям, способным гарантированно обеспечивать «сверхнизкие» значения и одновременно снижать совокупную стоимость владения. Аммиачная десульфуризация удовлетворяет этим требованиям: производит товарный продукт, допускает компактное исполнение и демонстрирует низкие удельные энергозатраты при высоком уровне очистки.

В этих условиях заказчики ожидают решений, которые работают предсказуемо и не требуют постоянной «ручной» подстройки. Поэтому акцент смещается на технологии с прозрачной логикой управления и понятной экономикой владения.

1. Технологическая схема и режимы

Дымовой газ температурой до 180–200 °С направляется в башню десульфуризации. В нижней зоне организуется охлаждение до ~60 °С для повышения растворимости SO_2 и эффективности массообмена. В секции абсорбции аммиачная циркуляционная жидкость поглощает SO_2 с образованием $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3/(\text{NH}_4)\text{HSO}_3$. Далее раствор поступает в резервуар окисления, где при тонкодисперсной аэрации сульфитные формы полностью превращаются в

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (степень окисления $> 99 \%$). Демистер и секция промывки предотвращают унос капель и аэрозоля, обеспечивая «чистый» хвостовой газ.

Товарный продукт получается в блоке концентрирования, кристаллизации и сушки: тепло ДГ используется для сгущения раствора; суспензия подаётся на центрифугу и сушилку с псевдоожиженным слоем. Маточные растворы возвращаются в контур, формируя замкнутый водный цикл без сброса при штатной эксплуатации.

2. Основные узлы и подсистемы

1. Башня десульфуризации с многоступенчатыми оросителями для устойчивого массообмена при переменных нагрузках.
2. Резервуар окисления с воздухоподогревом Рутса и мелкопузырчатой аэрацией (степень окисления $> 99 \%$).
3. Секция промывки и высокоэффективный демистер для улавливания капель/аэрозолей.
4. Блок концентрирования $\rightarrow$ кристаллизации $\rightarrow$ центрифугирования $\rightarrow$ сушки $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.
5. Система подготовки и дозирования аммиачной воды (устойчивость режима, безопасность обращения).
6. Замкнутый водный контур с внутренней очисткой и рециклом.
7. АСУ ТП: контроль pH, плотности, температуры; газоанализ SO_2/NH_3 ; управление окислением и циркуляцией.

3. Целевые показатели и гарантии

Технология ориентирована на достижение: пыль $< 5 \text{ мг/нм}^3$; $\text{SO}_2 < 35 \text{ мг/нм}^3$; $\text{NH}_3 < 3 \text{ мг/нм}^3$ при эффективности удаления $\text{SO}_2 \geq 98 \%$. Показатели подтверждены промышленными внедрениями и расчётной проверкой режимов.

Численные ориентиры служат не только пунктом в паспорте. Это ориентиры для настройки алгоритмов АСУ ТП, по которым служба эксплуатации оценивает, насколько устойчив процесс в сменных режимах.

4. Экономическая эффективность и ТСО

Для референсного проекта с объемом ДГ $550\,000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ при 8000 ч/год и $\text{SO}_{2\text{in}} \approx 4500 \text{ мг/нм}^3$ суммарные ежегодные расходы известняково-гипсовой схемы примерно на 200 млн рублей выше, чем у аммиачной. Дополнительно доход от реализации $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ компенсирует существенную часть реагентных затрат; отсутствие внешней станции очистки сточных вод снижает CAPEX/OPEX и занимаемые площади.

Отдельно стоит отметить фактор предсказуемости — когда продукт реализуется на рынке удобрений, часть расходов превращается в планируемый денежный поток, что упрощает бюджетирование и согласование инвестиций.

5. Сравнение с известняково-гипсовой схемой

Известняковая технология широко распространена, но для «сверхнизких» норм требует усложнения узлов и повышенных энергозатрат; побочный продукт (гипс) часто низколиквиден. Аммиачная десульфуризация создаёт товарный $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, работает компактно и допускает замкнутый водный контур без сброса.

Преимущества аммиачной технологии

- Высокая эффективность десульфуризации: глубокое удаление SO_2 и достижение «сверхнизких» выбросов.
- Высокая абсорбционная способность аммиака и сниженное L/G (жидкость/газ).
- Низкие энергозатраты циркуляции и компактная компоновка оборудования.
- Переработка SO_2 в товарный $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ с выручкой от реализации.
- Отсутствие вторичного загрязнения и сброса сточных вод при внутренней очистке и рецикле.
- Отсутствие увеличения выбросов CO_2 по сравнению с альтернативными схемами.
- Высокая экономическая эффективность (ниже OPEX, сокращение CAPEX на очистку стоков).
- Долгосрочная стабильная эксплуатация; модульность и простота интеграции в действующие тракты.

Суммарный эффект от перечисленных преимуществ проявляется в снижении операционных рисков: меньше незапланированных остановок, меньше корректировок рецептов и технологических пауз.

6. Управление рисками эксплуатации

Инженерные решения (демистер, аэрация, распределение жидкости), алгоритмы АСУ ТП и регламенты обслуживания обеспечивают стабильность процесса, снижение аэрозольного уноса и предупреждение отложений/коррозии.

7. Промышленный референс

Система «1 печь — 1 башня» с производительностью 370 000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ при $\text{SO}_{2\text{in}} \approx 6800 \text{ мг}/\text{нм}^3$ показала 97–99 % удаления SO_2 и выпуск $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ порядка 20 т/сут, что подтверждает достижимость целевых показателей и устойчивость режима.

Для потенциальных заказчиков это означает предсказуемость сроков ввода и достижение проектных показателей без затяжных этапов доводки.

8. Интеграция в действующие комплексы

Компоновочные решения учитывают габариты площадки, доступные энергоресурсы и требуемую обслуживаемость. Модульный подход сокращает сроки монтажа и пусконаладки.

Модульная поставка упрощает логистику и уменьшает вмешательство в существующую инфраструктуру, что особенно важно на действующих производствах с ограниченным «окном» для монтажных работ.

Заключение

Аммиачная десульфуризация объединяет экологическую эффективность (сверхнизкие выбросы), технологическую надёжность (полное окисление до $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, замкнутый водный контур) и улучшенную экономику владения (товарный продукт, снижение энергопотребления и отказ от внешней очистки сточных вод).

Именно сочетание технологической прозрачности и финансовой логики делает технологию удобной для защиты на инженерных советах и инвестиционных комитетах.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО НЕКАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ NO_x НА ЗАВОДАХ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТКО В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

КИРЕЕНКО В.С., ТУГОВ А.Н., СТРОКОВ А.А., (АО «ВТИ»)

Представлены описание и результаты анализа в обоснование технических решений по снижению выбросов оксидов азота системы селективного некаталитического восстановления (СНКВ), внедряемой на строящихся в Московской области заводах для энергетической утилизации твёрдых коммунальных отходов. Приводятся результаты расчетов глубины проникновения восстановителя в поток дымовых газов, а также диаметров капель при вводе реагента в высокотемпературную зону котла и времени их испарения в этой зоне. Показано, что выбранная конструкция системы СНКВ, включая конфигурацию форсунок и параметры подачи реагента, обеспечивают требуемую эффективность снижения выбросов NO_x .

Ключевые слова: СНКВ, мольное соотношение, карбамид, сжатый воздух, диаметр капли, время испарения.

Термический способ переработки твердых коммунальных отходов (ТКО) с отпуском потребителю тепловой и электрической энергии играет ключевую роль в решении проблемы санитарной очистки городов. Однако данный процесс сопровождается выбросами загрязняющих веществ, среди которых значительную долю составляют оксиды азота (NO_x). Для снижения выбросов NO_x применяют различные топочные методы: рециркуляцию дымовых газов, малоэмиссионные горелки, многоступенчатое сжигание, а также технологии селективного восстановления оксидов азота [1]. Мировой опыт показывает, что на установках для термической переработки ТКО наибольшее распространение получила технология селективного некаталитического восстановления NO_x (СНКВ) в различных модификациях. Основными преимуществами технологии СНКВ являются низкие капитальные затраты по сравнению с технологией селективного каталитического восстановления, невосприимчивость процесса к загрязнителям в дымовых газах (летучей золе, серы и ее соединениям), а также более высокая эффективность по сравнению с топочными методами подавления NO_x , поскольку условия для осуществления процесса СНКВ (равномерность характеристик газового потока, а

также время пребывания дымовых газов в зоне оптимальных для СНКВ температур) для установок по термической переработке ТКО более подходящие, чем для энергетических котлов.

В системе СНКВ на заводах в Московской области в качестве реагента используется водный раствор карбамида, подача которого осуществляется при помощи сжатого воздуха через размещенные в три яруса на боковых и фронтальном экранах топочной камеры устройства, состоящие из двух сопел диаметром 3 и 5 мм, установленных под углом 10 и 30 градусов (рис. 1). В зависимости от качества ТКО (в первую очередь, от влажности) и нагрузки, температура дымовых газов по высоте топочной камеры котла может изменяться, и оптимальная для СНКВ температура смещаться. Поэтому в топочной камере расположены пирометры для измерения температуры дымовых газов. Водный раствор карбамида подается на уровень впрыска, имеющий оптимальную температуру дымовых газов. Если эта температура находится между двумя уровнями впрыска, водный раствор карбамида подается на эти два уровня одновременно в определенной пропорции. Расход раствора карбамида, а также распределение его по уровням регулируется специальным распределительным модулем, на который поступают сигналы по температурам в топочной камере и по концентрации оксидов азота в уходящих дымовых газах на входе в дымовую трубу. Форсунки на каждом отдельном уровне срабатывают одновременно, такое решение позволяет покрыть восстановителем все сечение первого газохода топочной камеры котла.

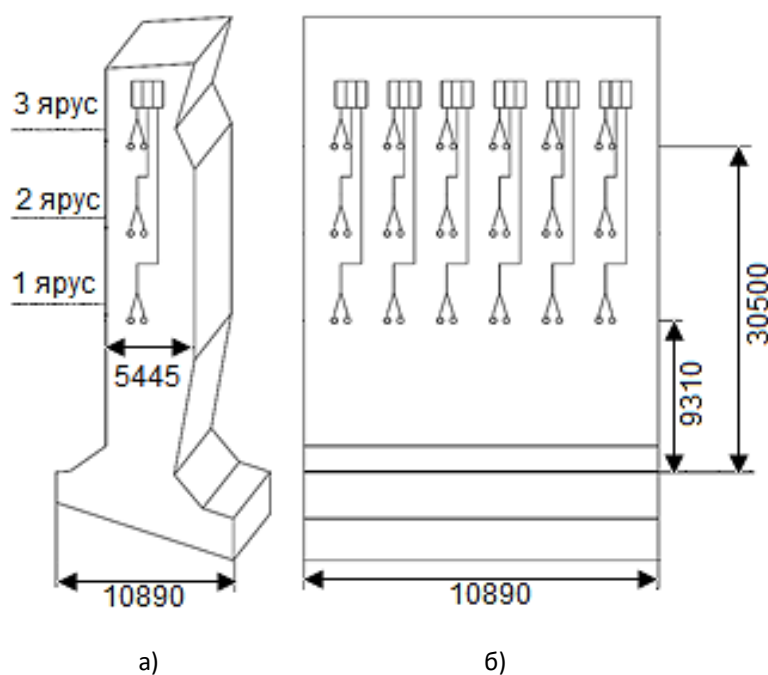


Рис. 1. Расположение распылительных сопел системы СНКВ в топочной камере:
а) на боковых экранах; б) на фронтальном экране

В настоящее время регламентом завода установлено, что концентрация NO_x в уходящих газах не должна превышать 160 мг/м^3 на сухие газы при 11% O_2 и при нормальных условиях (0°C , $101,3 \text{ кПа}$). Фактическая концентрация NO_x без использования СНКВ составляет примерно 210 мг/м^3 . Это обстоятельство предопределяет необходимость использования СНКВ практически постоянно.

Основными факторами, влияющими на эффективность работы системы СНКВ являются температура дымовых газов (восстановитель должен подаваться в зону с температурой $850\ldots1100^\circ\text{C}$) [2], время пребывания восстановителя в этой температурной зоне (не менее $0,5 \text{ с}$) [3], мольное соотношение восстановителя и NO_x (как правило, $\text{NH}_3/\text{NO}_x = 1,1\ldots1,5$) и хорошее смешение восстановителя и дымовых газов.

Последний фактор определяется глубиной проникновения восстановителя в поток дымовых газов и продолжительностью реакции восстановления после испарения капель раствора карбамида.

Для расчета глубины проникновения восстановителя в поток дымовых газов была использована модель осесимметричных струй в сносящем поперечном потоке [4]. Расчёты выполняли при следующих допущениях: температура дымовых газов принималась постоянной по высоте топочной камеры (первого футерованного газохода котла) на уровне 900°C , скорость дымовых газов принята равномерной по сечению топочной камеры, а критерием полного перемешивания восстановителя с дымовыми газами считается достижение струи, истекающей из сопел, расположенных по фронту котла, противоположной стенки (тыла) топочной камеры.

Расчёт выполнялся для ТКО среднего состава при номинальном режиме работы котла (расход сжигаемых ТКО - 30 т/ч). Исходя из начальной концентрации NO_x на выходе из топки, расхода дымовых газов и оптимального при эксплуатации систем СНКВ мольного соотношения NH_3/NO_x , расход 33 %-ного водного раствора карбамида принимался равным примерно 75 кг/ч . Было рассмотрено пять режимов подачи этого раствора в топочную камеру, отличающихся значениями расхода транспортирующего агента (воздуха). На основе полученных данных была выполнена оценка продолжительности реакции восстановления NO_x (время прохождения дымовыми газами участка по высоте топочной камеры от места соприкосновения струи противоположной стенки до их выхода из футерованной зоны) (таблица 1).

Таблица 1

Продолжительность (в секундах) реакции восстановления NO_x в топочной камере котла в зависимости от места подачи карбамидо-воздушной смеси (яруса сопел) при различных расходах воздуха

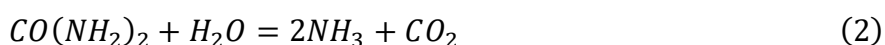
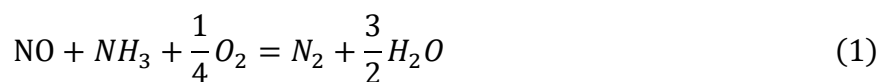
Расход воздуха на систему СНКВ, нм ³ /ч	565	645	800	970	1050
Время реакции восстановления NO _x (с) при подаче карбамидо-воздушной смеси через:					
1 ярус	3,1	3,3	3,55	3,6	3,65
2 ярус	1,55	1,75	2	2,05	2,1
3 ярус	0	0,25	0,5	0,54	0,55

Из табл. 1 видно, что время пребывания дымовых газов после полного их смешения с карбамидо-воздушной смесью, необходимое для полного протекания реакций восстановления (не менее 0,5 с), достигается при расходе воздуха 800 нм³/ч. При его уменьшении время реакции в третьем ярусе сокращается. Дальнейшее увеличение расхода воздуха не приводит к существенному увеличению необходимого времени пребывания. Более подробно результаты данного исследования представлены в [5].

Еще раз следует отметить, что важную роль в эффективности восстановления NO_x играет молярное соотношение NH₃/NO_x. Для повышения эффективности процесса желательно увеличивать молярное отношение NH₃/NO_x, но следует помнить, что при этом возрастает проскок аммиака, что при определенных условиях может приводить к загрязнению конвективных поверхностей нагрева котла и их коррозии вследствие протекания реакции NH₃ с SO₃, содержащимся в дымовых газах, с образованием бисульфата аммония при температурах ниже 350 °С, а также приводит к вторичному загрязнению атмосферы, поскольку аммиак является токсичным соединением.

Механизм реакций, приводящих к снижению содержания оксидов азота при использовании раствора карбамида, достаточно сложен и может быть описан с учетом термолиза и гидролиза.

Для оценки количества реагента примем, что восстановление оксидов азота осуществляется при их взаимодействии с аммиаком (1), образующимся в результате гидролиза (2) раствора карбамида [6]:



Было рассмотрено несколько вариантов мольного соотношения для снижения концентрации NOX с 210 мг/нм³ до 160 мг/нм³. На основе полученных данных была выполнена оценка расхода восстановителя для каждого из них (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость расхода карбамида от мольного соотношения NH₃/NO_x.

Мольное соотношение	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Расход раствора карбамида на систему СНКВ, кг/ч	27,2	29,7	32,2	34,6	37,1

Из табл. 2 видно, что при увеличении мольного соотношения от 1,1 до 1,5 расход увеличивается с 27,2 до 37,1 кг/ч.

При пневматическом распылении струя жидкости дробится на капли под действием скоростного газового потока. Медианный диаметр капель можно оценить по эмпирическим зависимостям, учитывающим свойства жидкости, массовые расходы фаз, скорость газа и диаметр сопла [7,8]:

$$d_{SMD} = 0,48 * d_0 * \left(\frac{\sigma}{\rho_{air} * U_{air}^2} \right)^{0,4} * \left(1 + \frac{G_{liq}}{G_{air}} \right)^{0,4} + 0,15 * d_0 * \left(\frac{G_{liq}^2}{\rho_{liq} * d_0 * \sigma} \right)^{0,5} * \left(1 + \frac{G_{liq}}{G_{air}} \right) \quad (3)$$

На основе данных таблицы 2 была установлена зависимость диаметра капель от расхода сжатого воздуха для форсунок диаметром 3 и 5 мм (таблица 3) при максимальном расходе раствора карбамида для системы СНКВ, равном 37,1 кг/ч. Полученные данные будут использованы для расчёта времени испарения капель.

Таблица 3

Диаметр капель при разных расходах воздуха на систему СНКВ.

Расход воздуха на систему СНКВ, нм ³ /ч	Медианный диаметр капли, мкм (d= 3 мм)	Медианный диаметр капли, мкм (d= 5 мм)
564,9	122,6	191,5
645,6	110,1	171,8
807,00	92,0	143,6
968,4	79,6	124,0
1049,1	74,7	116,4

После образования капли начинают двигаться в турбулентном потоке горячих газов. Они имеют значительную начальную скорость, соответствующую скорости струи, из которой они

образовались. Их скорость относительно газа быстро снижается под действием сил сопротивления и гравитации, достигая установившегося значения — скорости витания [9]:

$$u_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4 * g * d * (\rho_{\text{liq}} - \rho_{\text{gas}})}{3 * \xi * \rho_{\text{gas}}}} \quad (4)$$

Где: d - диаметр капли, м;

ρ_{liq} - плотность жидкости, кг/м³;

ρ_{gas} - плотность дымового газа, кг/м³;

ξ - коэффициент аэродинамического сопротивления;

Расчёты проводились для форсунок диаметром 3 и 5 мм со следующим допущением: коэффициент диффузии паров жидкости в дымовом газе равен коэффициенту диффузии воды в воздухе.

Для определения времени испарения капли было использовано соотношение [10]:

$$d = d_0^2 - K * t_i \quad (5)$$

Где: t_i — временной интервал, с;

d_0 — начальный диаметр капли;

$K = \frac{8 * \lambda_{\text{gas}}}{\rho_{\text{liq}} * \Gamma} * (T_{\text{gas}} - T_w) * (1 + 0,27 * Re^{0,5} * Sc^{0,33})$ — коэффициент испарения, который

учитывает термодинамические свойства газа, такие как теплопроводность (λ_{gas}), температуру газа (T_{gas}); число Рейнольдса (Re) отражает степень турбулентности и интенсивность перемешивания газа вокруг капли; число Шмидта (Sc) характеризует относительную роль процессов переноса количества движения (вязкость) и переноса массы (диффузия) в жидкости или газе.

Полное время испарения капли определяется из соотношения (5):

$$t_{\text{vapor}} = \frac{d_0^2}{K} \quad (6)$$

Данное уравнение допустимо применять при равенстве u и $u_{\text{витания}}$, так как капля будет испаряться с одинаковой скоростью; Re и Sc не оказывают на нее влияния, так как далее происходит испарение и разрушение капли.

При помощи данных соотношений удалось определить зависимость времени испарения от расхода сжатого воздуха на систему СНКВ для форсунок с диаметрами 3 и 5 мм (таблица 4).

Таблица 4.

Зависимость времени испарения от расхода воздуха на систему СНКВ.

Расход воздуха на систему СНКВ, $\text{нм}^3/\text{ч}$	Время испарения, с ($d=3$ мм)	Время испарения, с ($d=5$ мм)
565	0,38	1,03
646	0,29	0,85
800	0,19	0,63
968	0,17	0,55
1049,1	0,16	0,53

Данные таблицы 4 показывают, что увеличение расхода воздуха сопровождается уменьшением времени испарения капель.

Из таблицы 1 видно, что время пребывания дымовых газов после полного их смешения с карбамидо-воздушной смесью, необходимое для полного протекания реакций восстановления (не менее 0,5 с), достигается при расходе воздуха $800 \text{ нм}^3/\text{ч}$. При его уменьшении время реакции в третьем ярусе сокращается. Дальнейшее увеличение расхода воздуха не приводит к существенному увеличению необходимого времени пребывания. Таким образом, для системы СНКВ строящихся в Московской области заводов расход воздуха на уровне $800 \text{ нм}^3/\text{ч}$ является оптимальным. Расчёты также показали, что выбранная конструкция форсунок (с диаметрами 3 и 5 мм) позволяет добиться значительного охвата зоны распыла и эффективного перемешивания газов с восстановителем.

Заключение.

Проведённые расчёты диаметров капель и времени испарения показали, что при расходе сжатого воздуха $800 \text{ нм}^3/\text{ч}$ совместная работа форсунок с диаметрами сопел 3 и 5 мм обеспечивает оптимальные условия для протекания реакций селективного некаталитического восстановления оксидов азота. Капли диаметром порядка 90 мкм, формируемые соплами 3 мм, испаряются за 0,2 с и полностью вовлекаются в процесс в пределах температурного окна, обеспечивая быстрое начало восстановления NOX. Более крупные капли диаметром около 140 мкм (сопла 5 мм) испаряются за 0,6 с, что сопоставимо с временем пребывания в реакционной зоне, и тем самым поддерживают реакцию до выхода газов из зоны оптимальных температур. Такое комбинированное решение позволяет эффективно снижать концентрацию NO_x и обеспечивать соответствие экологическим нормативам, что обосновывает выбор конструктивных решений для системы СНКВ на заводах в Московской области.

Дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию работы системы СНКВ на данном объекте, планируется выполнять с использованием численного моделирования. В качестве исходных данных (расходы сред, геометрия сопел) будут приняты значения, полученные на данной стадии.

Список литературы

1. **Никитина И.С. и др.** Природоохранные технологии на ТЭС //учебник под общ. редакцией Роголёва Н.Д. и Прохорова В.Б.–М.: Издательство МЭИ. – 2021.
2. **Кулиш О.Н. и др.** Повышение эффективности систем некаталитической очистки дымовых газов от оксидов азота //Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2019. – №. 1. – С. 15-19.
3. **Кулиш О.Н., Кужеватов С. А., Бородин Е. В.** Развитие технологии некаталитической очистки дымовых газов от оксидов азота и результаты ее промышленного внедрения //Технологии нефти и газа. – 2005. – №. 2. – С. 29-36.
4. **Трофимченко С.И.** Организация смешения газовых сред путем внедрения струй в поперечный поток в МГД установках: дис.канд. техн. наук. М.: МЭИ,1981.
5. **Киреев В.С., Тугов А.Н., Безруков В.А.** Система селективного некаталитического восстановления NOx на заводах по энергетической утилизации ТКО в Московской области: обоснование принятых решений // Теплоэнергетика. – 2025. – № 9. – С. 94–102.
6. **Ходаков Ю.С.** Оксиды азота и теплоэнергетика. Проблемы и решения //М.: ООО «ЭСТ-М. – 2001.
7. **Lefebvre A.H., McDonell V.G.** Atomization and sprays. – CRC press, 2017.
8. **Ashgriz N. (ed.).** Handbook of atomization and sprays: theory and applications. – Springer Science & Business Media, 2011.
9. **Памм В.М.** Абсорбция газов. – 1976.
10. **Osgerby I.T.** Fuel evaporation rate in intense recirculation zones //AIAA Journal. – 1975. – Т. 13. – №. 3. – С. 394-395.

ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ УДАЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В УСЛОВИЯХ АММИАЧНО-СУЛЬФАТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЕРООЧИСТКИ

РЯШЕНЦЕВ М.С., ЕПИХИН А.Н., к.т.н., (АО «ВТИ»)

В докладе представлены экспериментальные способы интенсификации удаления оксидов азота из дымовых газов в условиях перспективной аммиачно-сульфатной технологии сероочистки, в том числе и с использованием катализаторов.

Ключевые слова: аммиачно-сульфатная сероочистка, сульфит аммония, бисульфит аммония, оксиды азота, соединения меди (II).

Технологии мокрой сероочистки дымовых газов являются наиболее эффективными методами снижения уровня выбросов диоксида серы - их эффективность достигает 90% и выше. Они основаны на поглощении диоксида серы как кислого газа водными растворами или суспензиями активных веществ, имеющих, как правило, основную реакцию - соединения щелочных и щелочноземельных металлов (известняк, известь, сода), а также аммиак и соли аммония. Основной недостаток данных технологий - высокие капитальные и эксплуатационные затраты и требуемая под размещение установки большая площадь.

Одной из перспективных среди методов мокрой сероочистки является аммиачно-сульфатная технология. Упрощенный вид аммиачно-сульфатной технологии приведен на рисунке 1.

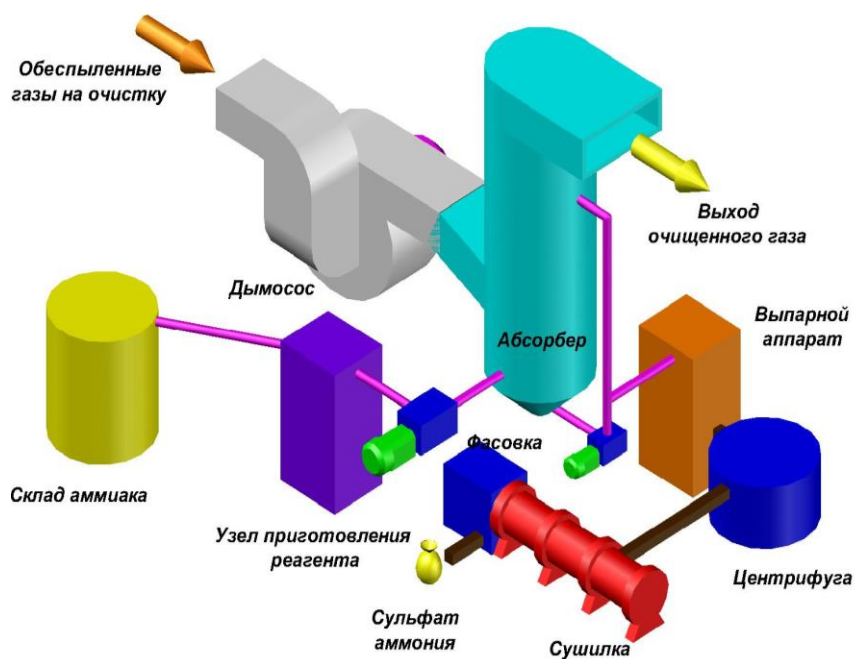
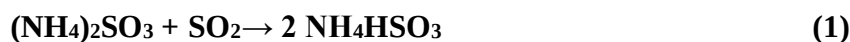


Рисунок 1. Упрощенный вид аммиачно-сульфатной технологии сероочистки.

Активным веществом в данной технологии является сульфит аммония. При абсорбции протекает реакция (1) с образованием бисульфита аммония:



Поглотительная способность раствора восстанавливается добавлением реагента - аммиака или 25%-ной аммиачной воды, в результате чего в растворе снова образуется сульфит аммония (2):



Однако, поскольку в дымовых газах содержится кислород, то в поглотительном растворе протекают побочные реакции (3, 4) с образованием сульфата и бисульфата аммония:



Таким образом, процесс абсорбции ведут раствором сульфита-бисульфита-сульфата аммония с определенным содержанием общего диоксида серы и эффективного аммиака в растворе.

Отработанный раствор направляется на контролируемое окисление воздухом по реакциям (3, 4) с последующей нейтрализацией раствора по реакции (5) и получением сульфата аммония как продукта.



Аммиачно-сульфатная технология по сравнению с другими методами сероочистки обладает высокой (до 99,8 %) достижимой степенью сероочистки, а также имеет наименьшие удельные капитальные затраты. Кроме того, существенными технико-экономическими преимуществами данной технологии сероочистки являются безотходность производства и получение товарного продукта – сульфата аммония, являющегося азотно-серным удобрением с содержанием 21% масс. азота и 24% масс. серы, а также использование того же реагента, что и для технологий очистки дымовых газов от оксидов азота (СКВ и СНКВ), что позволяет дополнительно экономить капитальные затраты при совместном применении серо- и азотоочистки на ТЭС.

АО «ВТИ» имеет успешный опыт внедрения опытно-промышленной установки аммиачно-сульфатной сероочистки в РФ на Дорогобужской ТЭЦ производительностью до 500 тыс. м³/час при н.у. по дымовому газу. В качестве топлива использовался высокосернистый подмосковный уголь, дающий содержание SO₂ в дымовых газах - 5,3-6,4 г/м³ при н.у.; степень очистки от SO₂ составляла 95-98% [1]. Получаемый товарный сульфат аммония имел необходимый гигиенический сертификат соответствия требованиям ТУ 113-03-625-90 «Сульфат аммония – побочный продукт».

Известно, что сульфит-ионы в водном растворе за счет своих восстановительных свойств проявляют химическую активность в отношении монооксида азота (NO) [2-5], при этом возможно протекание различных реакций, основной из которых является следующая:



Это подтвердилось полученными при эксплуатации аммиачно-сульфатной сероочистки на Дорогобужской ТЭЦ данными: было обнаружено уменьшение начальной концентрации оксидов азота (NO_x) в дымовых газах, что является дополнительным преимуществом аммиачно-сульфатной сероочистки. Эти данные являются ценными, так как являются основой для разработки технологии совместной серо- и азотоочистки дымовых газов. Разработка совместной серо- и азотоочистки дымовых газов в едином аппарате позволяет снизить

капитальные затраты газоочистного оборудования, а также занимаемую им площадь. Однако по причине низкой растворимости NO в воде достигнутая эффективность его удаления не превышает 35%. Кроме того, несмотря на важность полученных результатов в вышеуказанных статьях, все исследования проводились в отсутствии сульфата аммония и при значениях pH = 6,5–8,5, т.е. в условиях, не отвечающих рабочим параметрам аммиачно-сульфатной технологии. Некоторые опыты также проводились в отсутствии кислорода в газовой фазе и при эквимольном соотношении NO:NO₂, хотя в реальных дымовых газах ТЭС содержание монооксида азота составляет 90-95% от общего их количества.

Для увеличения степени поглощения NO мокрыми методами очистки обычно предлагается его предварительное окисление в дымовых газах воздухом, озоном или другим сильным окислителем до N₂O₃, что для больших расходов очищаемых газов экономически не оправдано. Также предлагается использование в качестве катализаторов поглощения NO_x различных соединений переходных металлов.

Поэтому целью данной работы было изучение способов интенсификации удаления NO_x из дымовых газов в условиях перспективной аммиачно-сульфатной технологии сероочистки. Установка для исследования реакции поглощения монооксида азота водными растворами аммиачных солей показана на рис. 2. На входе в реактор подсоединена система подачи газовой смеси, состоящая из баллона (поз. 1) с поверочной газовой смесью NO/N₂ (концентрация 0,325% об – 3250 ppm), компрессора для подачи воздуха (поз. 3), смесителя, ротаметров, контролирующих расход отдельных газовых компонентов (поз. 2, 4), а также соединительных шлангов. Перед входом в реактор предусмотрен трехходовой кран, при помощи которого перед началом опыта и после него газовая смесь идет байпасом мимо реактора. Расход воздуха и газа, содержащего NO, является постоянной величиной. Начальная концентрация монооксида азота лежит в диапазоне 800-850 ppm.

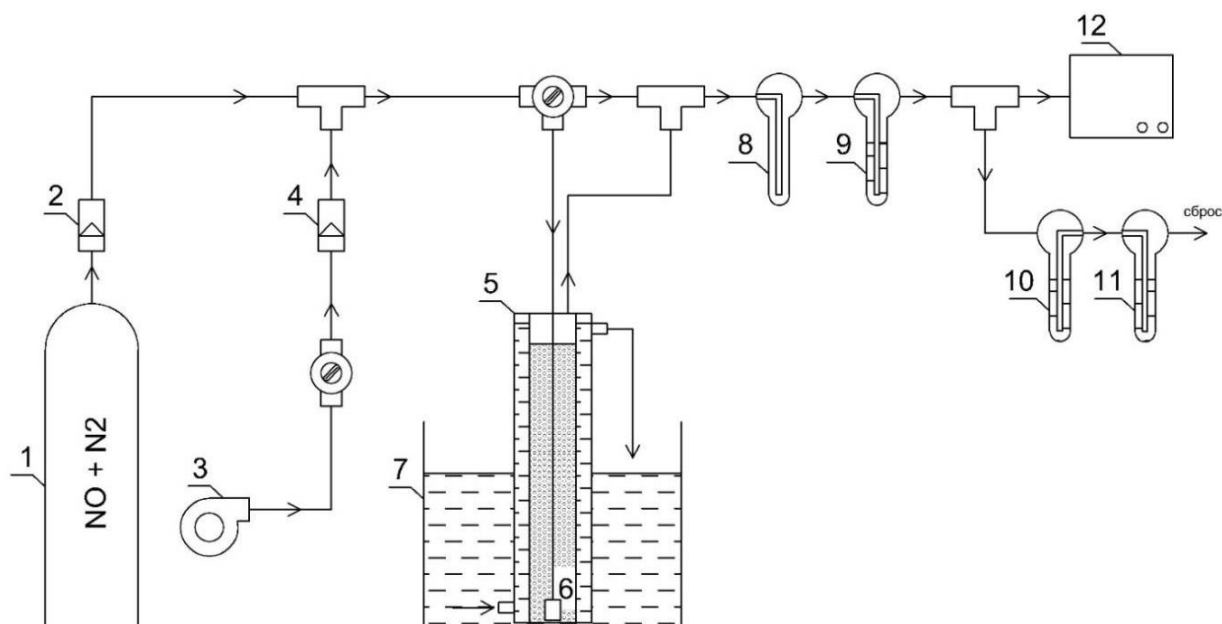


Рисунок 2. Установка для исследования реакции поглощения монооксида азота водными растворами аммиачных солей. 1 – баллон с ПГС NO в N₂; 2, 4 – ротаметры; 3 – компрессор; 5 – реактор с рубашкой; 6 – распылитель; 7 – термостат; 8-11 – поглотители Зайцева; 12 – газоанализатор.

На выходе из реактора перед входом в газоанализатор (поз. 12) расположены два последовательно расположенных поглотителя Зайцева (поз. 8, 9): первый – пустой, предназначенный для улавливания образующихся в ходе эксперимента паров раствора СБСА; второй – с 0,1 Н раствором H₂SO₄, предназначенный для улавливания паров аммиака. От линии входа в газоанализатор идет отвод, на котором последовательно расположены два поглотителя Зайцева (поз. 10, 11), один из которых заполнен 0,1 М раствором гидроксида натрия. Данные поглотители выполняют одновременно функции гидрозатвора и очистки избытка газа, поступающего на линию газоанализатора. В качестве анализатора отходящей газовой пробы на содержание оксидов азота используется газоанализатор NOVA plus.

Проведенные в АО «ВТИ» лабораторные исследования, проводимые на растворах, максимально приближенных по составу к рабочим (температура процесса – 48–58 °С; содержание сульфата аммония – 0,303-0,682 моль/л (40-90 г/л); общая концентрация диоксида серы, представляемая как сумма сульфит- и бисульфит-ионов – 0,1; 0,5 моль/л; начальный pH раствора – 5,2–6,2; начальная концентрация монооксида азота – 830 ppm).

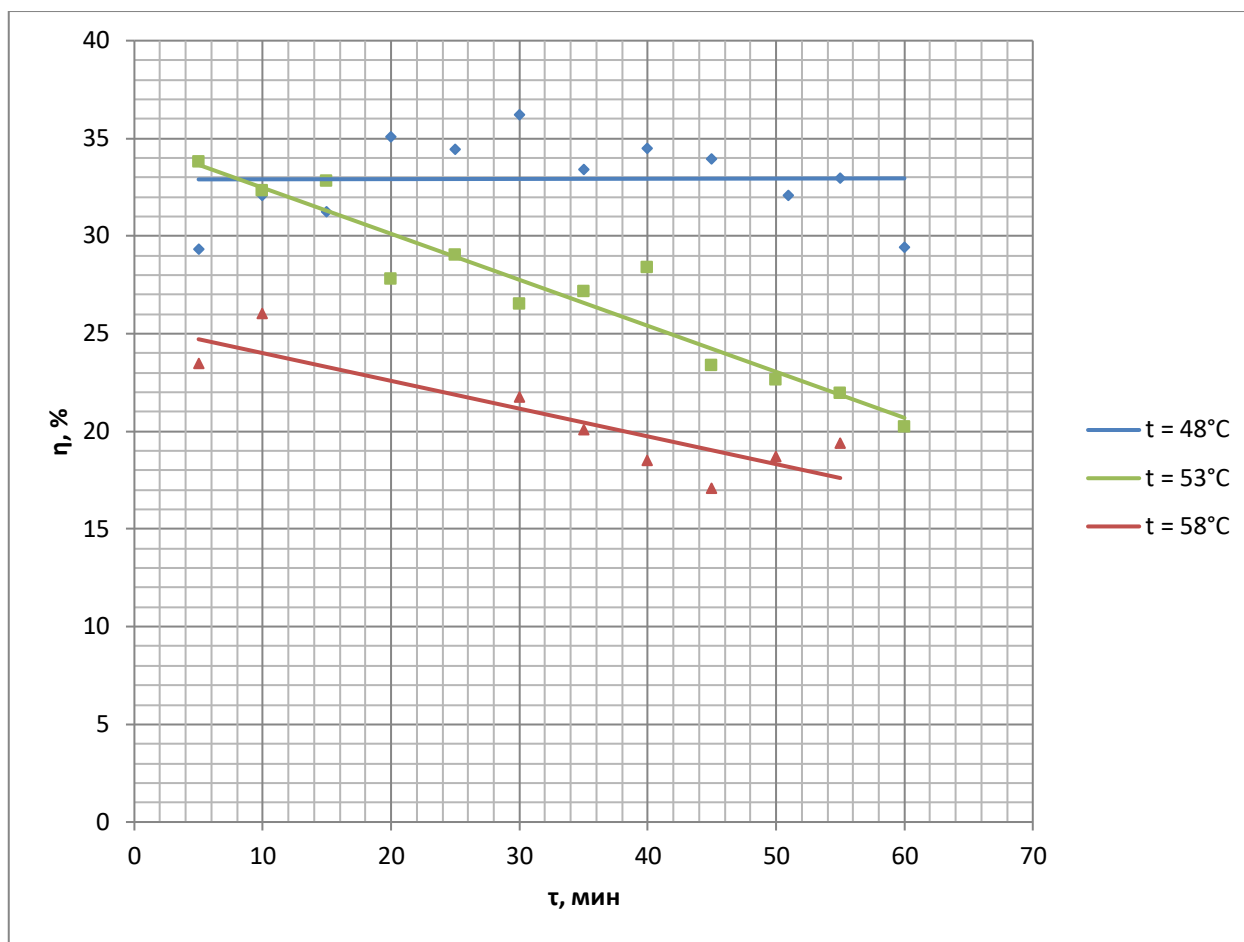


Рисунок 3. Зависимости степени поглощения монооксида азота η растворами сульфит-бисульфит-сульфата аммония от времени τ при различных температурах. Условия: $\text{CSO}_2 = 0,5$ моль/л; $\text{C}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 0,303$ моль/л; $\text{pH}_{\text{нач}} = 6,2$.

Результаты, приведенные на рис. 2–4, показали, что степень поглощения монооксида азота растворами солей аммония увеличивается с понижением температуры, уменьшением концентрации сульфата аммония и увеличением концентрации диоксида серы как активного компонента. Снижение степени поглощения при увеличении концентрации сульфата аммония и температуры связано со снижением растворимости газа в воде, поскольку данный процесс, будучи гетерогенным, определяется в первую очередь скоростью массопереноса через границу раздела фаз.

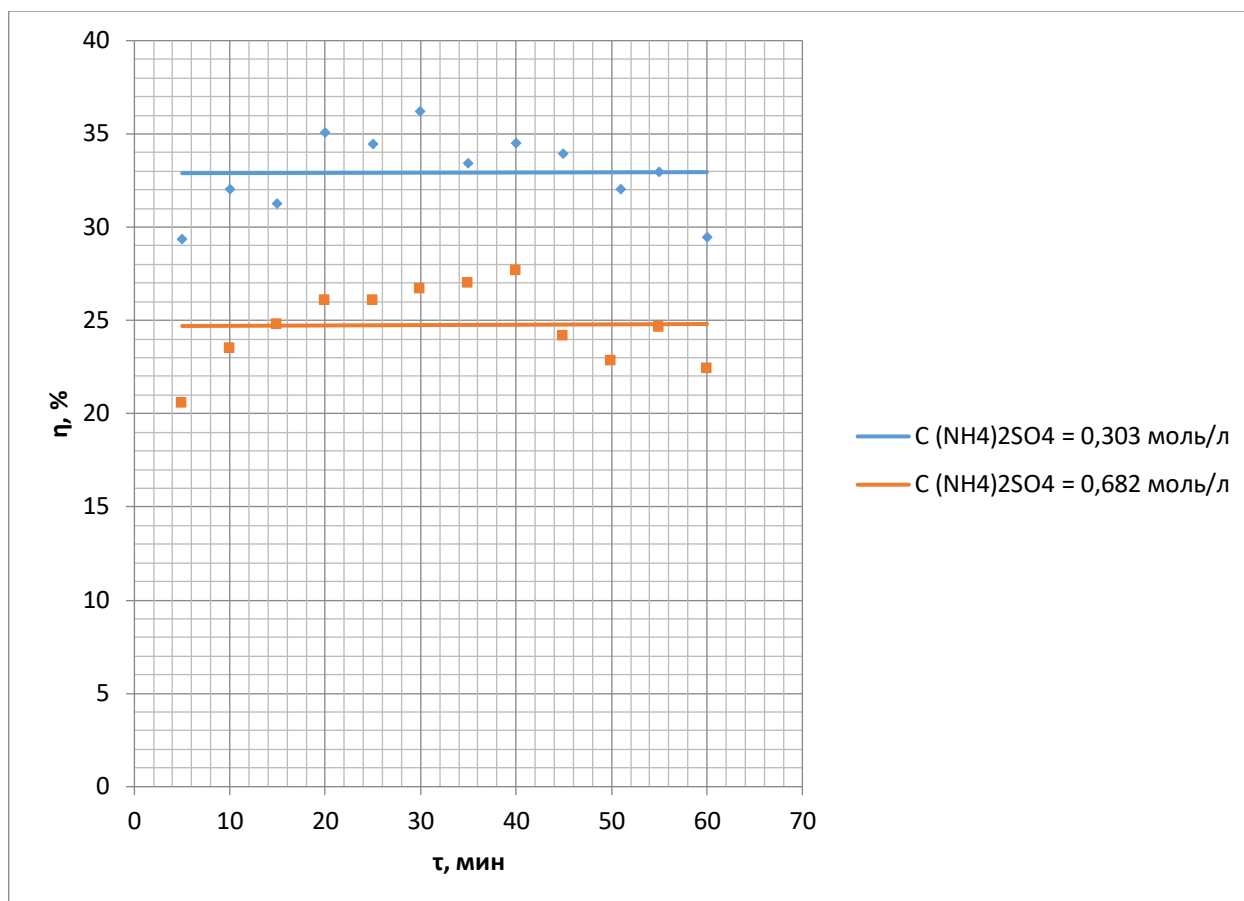


Рис. 4. Зависимости степени поглощения монооксида азота η растворами сульфит-бисульфит-сульфата аммония от времени τ при различных концентрациях сульфата аммония. Условия: $t = 48^\circ\text{C}$; $C\text{SO}_2 = 0,5 \text{ моль/л}$; $\text{pH}_{\text{нач}} = 6,2$.

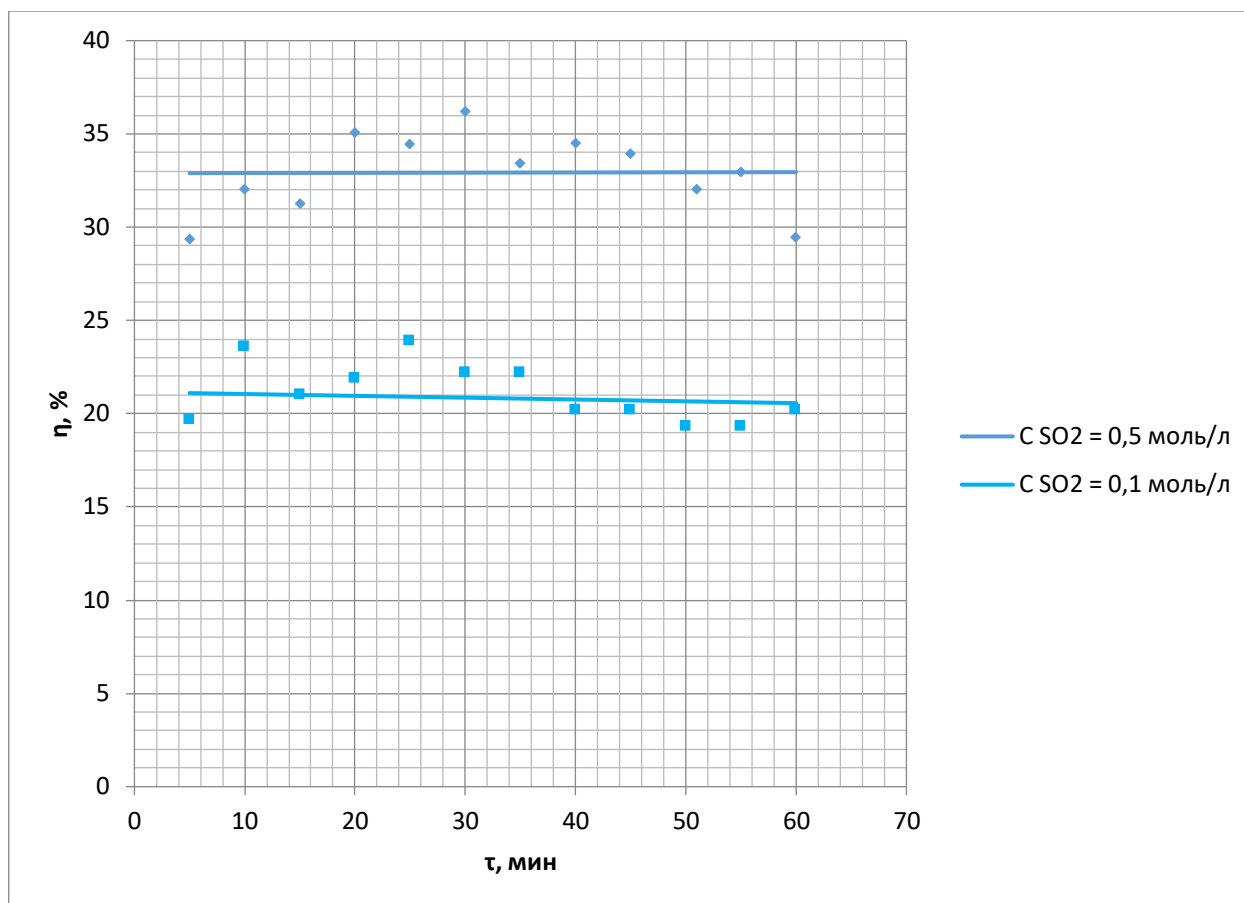


Рисунок 5. Зависимости степени поглощения монооксида азота η от времени τ при различных концентрациях активного SO_2 . Условия: $t = 48^\circ\text{C}$; $C(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 0,303$ моль/л; $\text{pH}_{\text{нач}} = 6,2$.

Влияние pH в пределах от 5,2 до 6,2 малосущественно (рис. 6), однако поскольку в ходе окисления поглотительного раствора происходит снижение его pH , то, начиная с некоторого момента времени, для раствора с начальным pH , равным 5,2, эффективность поглощения резко снижается. Экспериментально показано, что критическое значение pH , при котором происходит снижение эффективности поглощения, примерно равно 4.

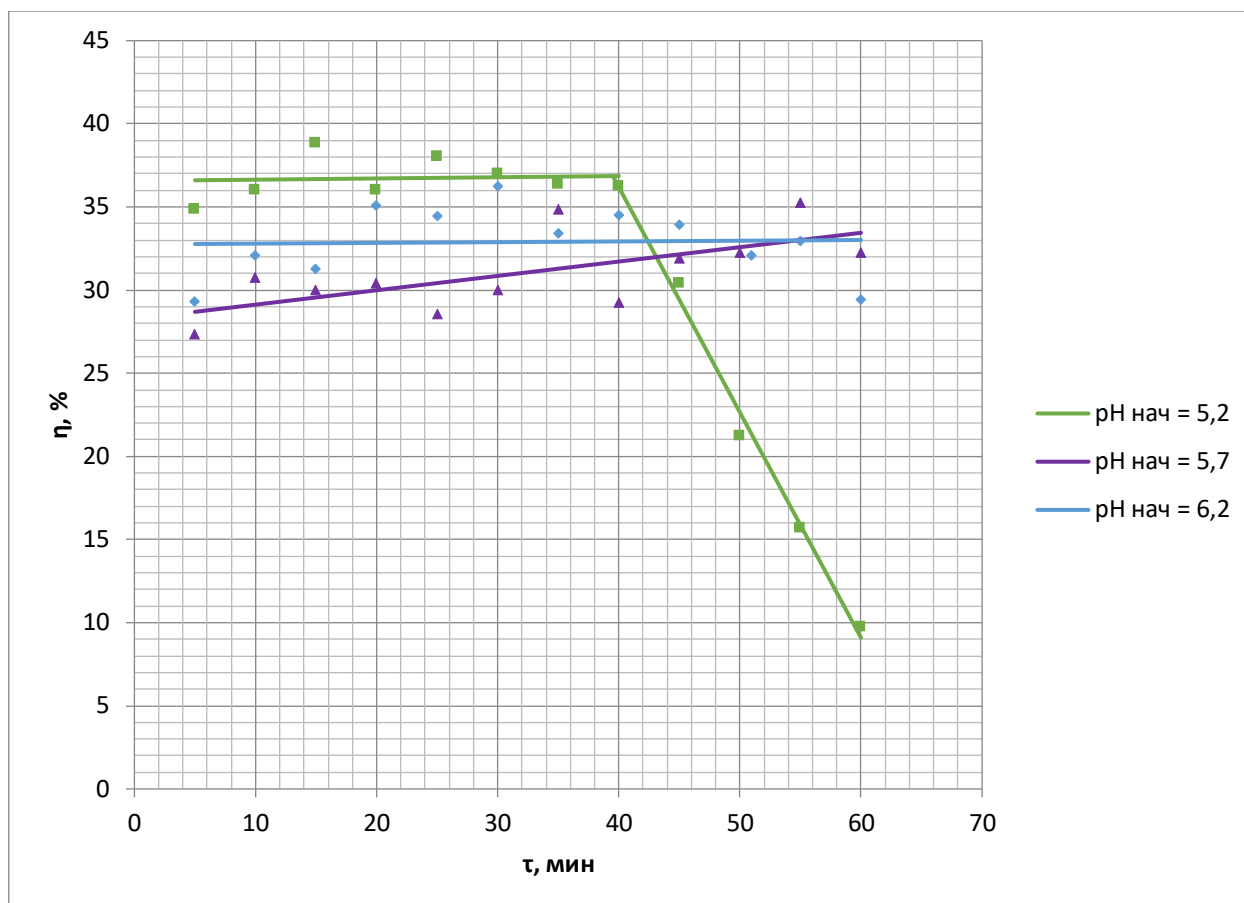


Рисунок 6. Зависимости степени поглощения монооксида азота η от времени τ при различных значениях начального pH раствора. Условия: $t = 48^\circ\text{C}$; $\text{CSO}_2 = 0,5$ моль/л; $\text{C}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 0,303$ моль/л.

Вместе с тем средняя степень улавливания не превысила 35 %, поэтому для ее увеличения было рассмотрено применение добавок ионов переходных металлов в качестве катализаторов. Согласно результатам, приведенным на рис. 7, ионы железа (II) и марганца (II) не влияют на эффективность поглощения монооксида азота, а введение ионов меди (II) привело к существенному увеличению степени улавливания NO - до 70-80%.

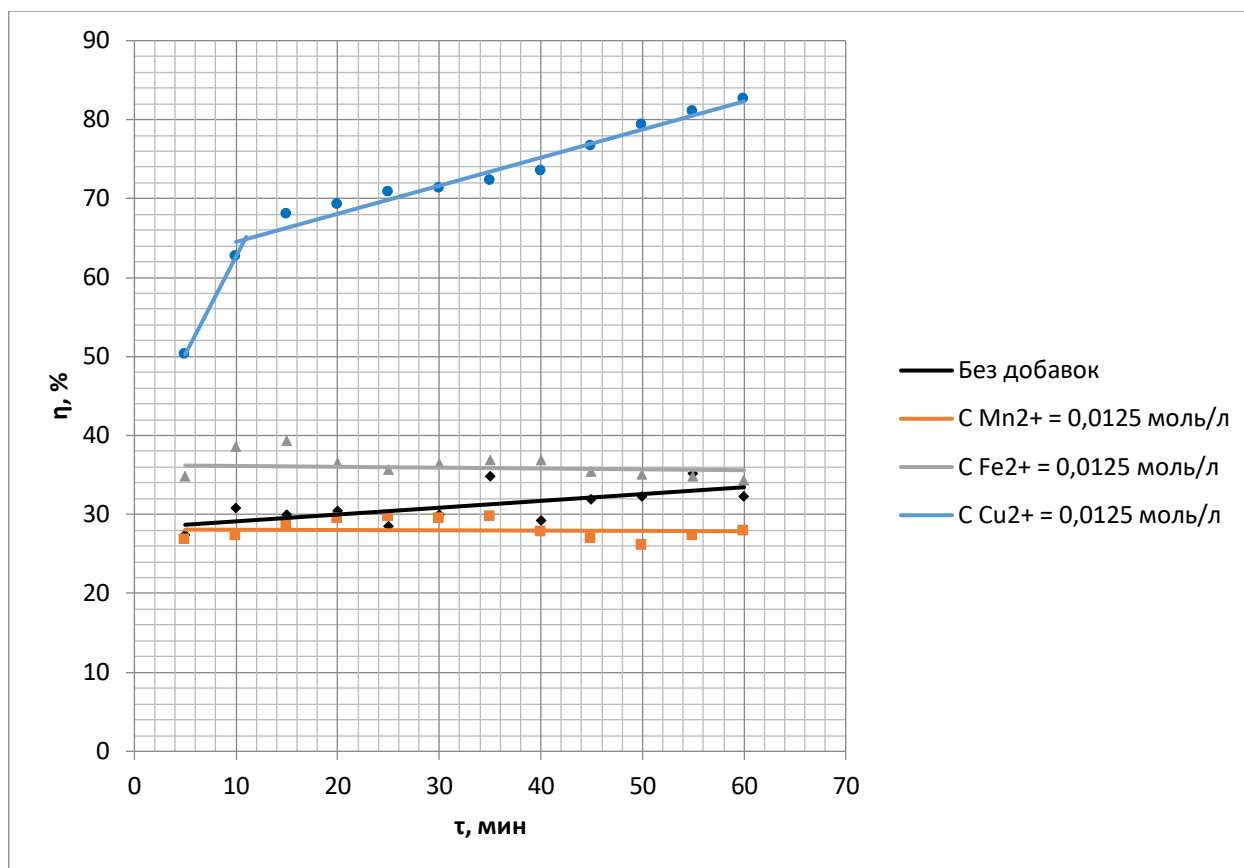


Рисунок 7. Зависимости степени поглощения монооксида азота η растворами аммиачных слоев от времени τ от концентрации ионов Cu^{2+} . Условия: $t = 48^\circ\text{C}$; $C\text{SO}_2 = 0,5$ моль/л; $C(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 0,303$ моль/л; $\text{pH}_{\text{нач}} = 5,7$.

Однако дополнительные эксперименты показали, что существует предельная концентрация ионов меди (II), по достижении которой дальнейшее ее повышение не оказывает влияния на эффективность поглощения NO. Исходя из рис. 8, оптимальное значение концентрации ионов меди (II), при которой средняя степень улавливания достигает 70%, составляет 0,0125 моль/л. При данной концентрации ионов меди (II) высокая степень поглощения сохраняется в широких пределах условий аммиачно-сульфатной сероочистки.

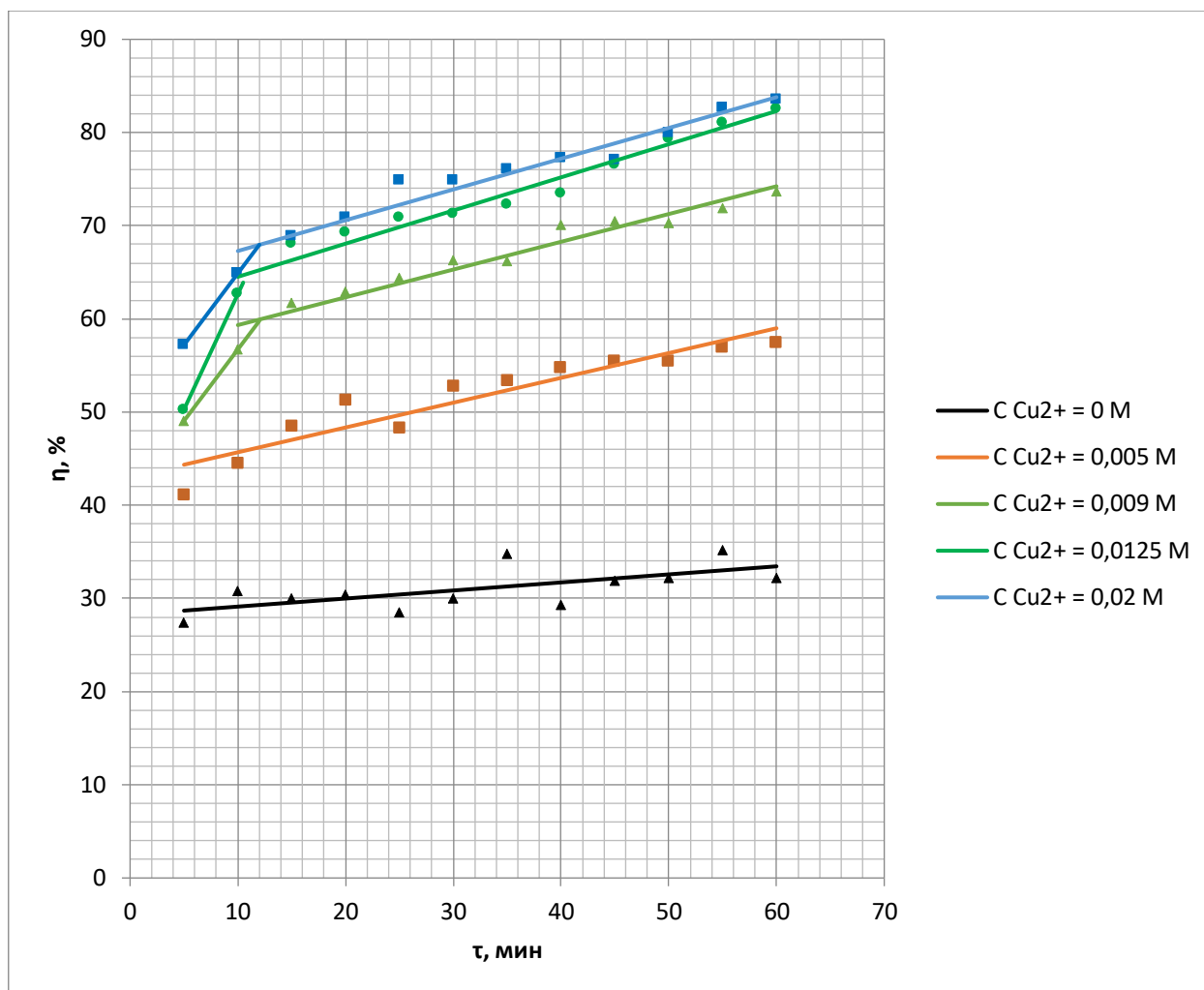


Рисунок 8. Зависимости степени поглощения монооксида азота η растворами сульфит-бисульфит-сульфата аммония от времени τ при различных концентрациях ионов Cu^{2+} . Условия: $t = 48^\circ\text{C}$; $\text{CSO}_2 = 0,5$ моль/л; $\text{C}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 0,303$ моль/л; $\text{pH}_{\text{нач}} = 5,7$.

Для оценки характера зависимости средней степени поглощения монооксида азота $\eta_{\text{ср}}$ от содержания ионов меди (II) был построен график, зависимости $\eta_{\text{ср}}$ от квадратного корня концентрации ионов меди (II) $(\text{CCu}^{2+})^{0,5}$, представленный на рис. 9.

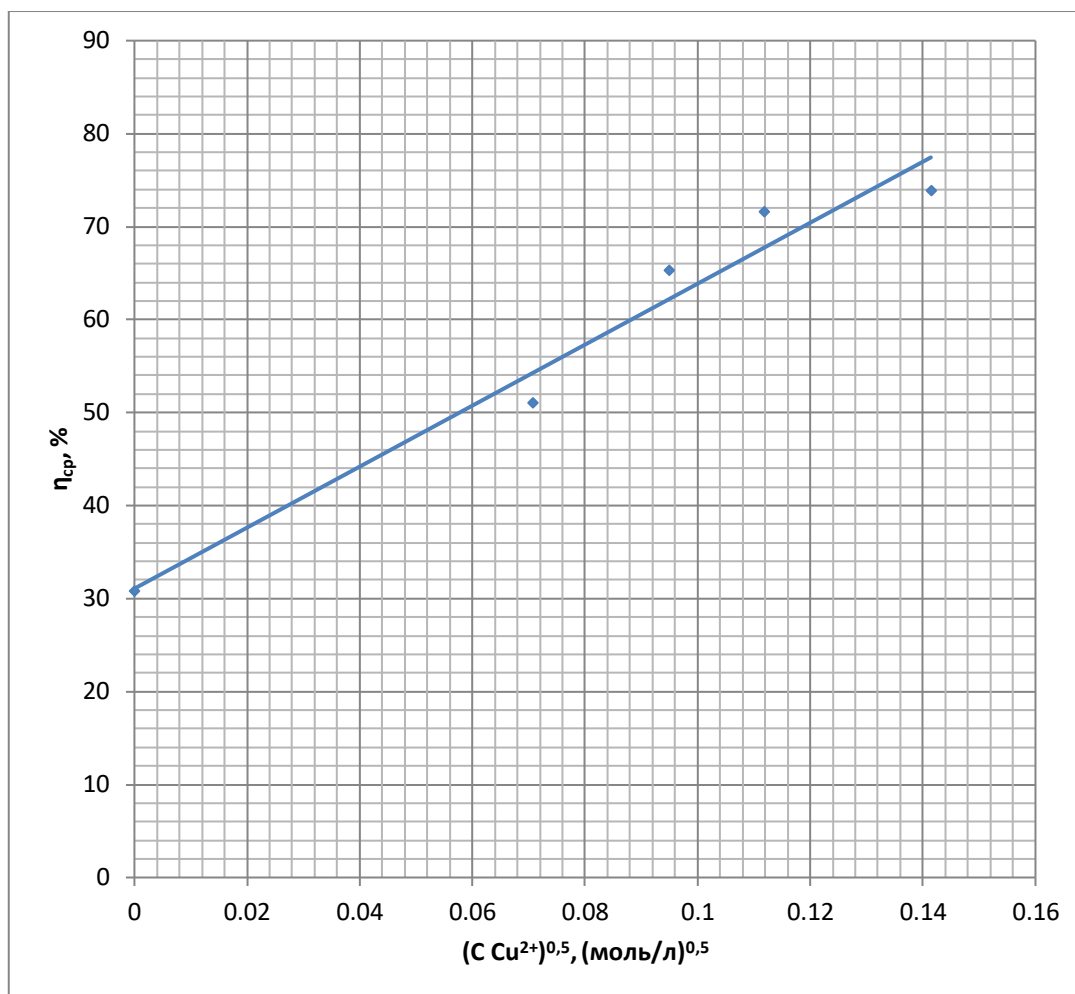


Рисунок 9. Зависимость средней степени поглощения монооксида азота η от времени τ от квадратного корня концентрации ионов меди (II) $(C Cu^{2+})^{0,5}$. Условия: $t = 48^\circ C$; $[SO_2] = 0,5$ М; $[(NH_4)_2SO_4] = 40$ г/л; $p_{Ннач} = 5,7$.

Полученная зависимость имеет линейный вид: $\eta_{ср} = 31,072 + 327,877(C Cu^{2+})^{0,5}$. Из этого следует, что данная реакция имеет кажущийся половинный порядок по соединениям меди (II).

Таким образом, добавление ионов меди (II) в поглотительный раствор дает возможность разработки эффективной технологии совместного улавливания оксидов серы и азота в едином аппарате на основе аммиачно-сульфатной технологии сероочистки. Она предполагает введение отдельного циркуляционного контура орошения дымовых газов в абсорбере поглотительным раствором аммиачных солей, содержащим в качестве катализатора соединения меди (II). Поскольку медь (II) является тяжелым металлом и его присутствие в товарном сульфате аммония в больших количествах недопустимо, авторы разрабатывают твердый катализатор на основе соединений меди (II), нерастворимый в растворах аммиачных солей.

Заключение.

1. Получены закономерности изменения степени поглощения монооксида азота растворами аммиачных солей: она увеличивается с понижением температуры,

уменьшением концентрации сульфата аммония и увеличением концентрации активных компонентов (сульфит- и бисульфит-ионов).

2. Показано, что перспективными для улавливания монооксида азота являются соединения меди (II), не только увеличивающие степень улавливания монооксида азота с 33% до 72%, но и ускоряющие окисление раствора аммиачных солей при сохранении эффективности улавливания NO.
3. Выявлено оптимальное значение степени поглощения монооксида азота, равное 72% и достигаемое при концентрации меди в растворе, равной 0,0125 М. При этом высокая степень поглощения сохраняется в широких пределах условий аммиачно-сульфатной сероочистки.
4. Результаты данной работы доказали практическую осуществимость разработки технологии совместной сероочистки и денитрификации дымовых газов путем модификации существующей технологии аммиачно-сульфатной сероочистки.

Список литературы

1. **Беляйкин В. М., Некрасов Б. В., Шмиголь И. Н.** Опыт освоения опытно-промышленной установки очистки дымовых газов от диоксида серы на Дорогобужской ТЭЦ // Электрические станции. – 1996. – №. 7. – С. 51.
2. **Пай З.П.** Научные основы создания каталитических способов комплексной жидкофазной очистки газов от SO₂, NO_x, As₂O₃, H₂S, COS, HCN, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск, 2000 – 421 с.
3. **Gao X.** et al. Effect of gas-liquid phase compositions on NO₂ and NO absorption into ammonium-sulfite and bisulfite solutions // Fuel processing technology. – 2011. – Т. 92. – №. 8. – С. 1506-1512.
5. **Xiong Y.** et al. Experimental study on reaction characteristics of NO in (NH₄)₂SO₃ solution // Journal of industrial and engineering chemistry. – 2018. – Т. 65. – С. 380-386.
6. **Shi F.** et al. Simultaneous wet absorption of SO₂ and NO_x with mixed Na₂SO₃ and (NH₄)₂SO₃: Effects of mass concentration ratio and pH // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Т. 421. – С. 129945.

ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПЭК

КИСЕЛЕВА О.А., ИВАНОВА А.А. (АО «ВТИ»)

В докладе обозначены ключевые проблемы, с которыми сталкиваются тепловые электростанции (ТЭС) при проведении, в частности, производственного экологического контроля (ПЭК).

***Ключевые слова:** отбор проб, аэродинамические параметры, производственный экологический контроль, запыленность, газопылевой поток.*

Как известно, измерения загрязняющих веществ на ТЭС проводятся при проведении инвентаризации, проведении производственного экологического контроля (ПЭК), при оценке эффективности внедренных экологических мероприятий, при пуско-наладочных работах пылегазоочистного оборудования и др.

Необходимость проведения измерений определена в следующих документах:

- Федеральный Закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изм. от 08.08.2024 г.) [1];
- Федеральный Закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (с изм. от 08.08.2024 г.) [2];
- Приказ Минприроды России от 19.11.2021 г. № 871 «Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, корректировки ее данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения таких инвентаризации и корректировки» [3];
- Приказ Минприроды России № 109 от 18.02.2022 г. (с изм. от 13.11.2024 г.) «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля» [4];
- Приказ от 21 марта 2025 года № 124 «Об утверждении правил эксплуатации установок очистки газа» [5].

Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (контроля), утвержден Распоряжением Правительства РФ от 20 октября 2023 г. № 2909-р (с изм. от 05.06.2024 г.) «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» [6].

Перечень маркерных веществ для объектов НВОС 1 категории в энергетике определен в ИТС-38-2024 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» [7], который утвержден Приказом Росстандарта от 23.12.2024 г. № 3041 [8].

На предприятии должны быть предусмотрены мероприятия по оборудованию мест измерений (точек отбора проб), чтобы при проведении экоаналитического контроля обеспечивать условия выполнения работ по:

- определению объема дымовых газов ($\text{м}^3/\text{с}$), скорости газового потока ($\text{м}/\text{с}$), температуры ($^{\circ}\text{C}$);
- измерению концентрации ($\text{мг}/\text{м}^3$) загрязняющих веществ в дымовых газах;
- определению степени улавливания загрязняющих веществ в газоочистных и пылеулавливающих установках.
- Порядок оборудования мест отбора проб и проведение измерений аэродинамических параметров, концентраций загрязняющих веществ в газопылевом потоке устанавливается основными нормативно-техническими документами:
- ГОСТ 17.2.4.06-90 «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения» [9];
- ГОСТ 17.2.4.07-90 «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения» [10];
- ПНД Ф 12.1.1-99 «Методические рекомендации по отбору проб при определении концентраций вредных веществ (газов и паров) в выбросах промышленных предприятий» [11];
- ПНД Ф 12.1.2-99 «Методические рекомендации по отбору проб при определении концентраций взвешенных частиц (пыли) в выбросах промышленных предприятий» [12];

- «Методические указания по оборудованию мест отбора проб при экоаналитическом контроле промышленных выбросов в атмосферу» (утв. НИИ Атмосфера, ФГУ «ЦЭКА» 30.09.2002) [13];
- ГОСТ 33007-2014 «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газовых потоков. Общие технические требования и методы контроля» [14].

Основные требования для проведения измерений аэродинамических параметров и запыленности в газопылевом потоке:

- установившееся движение потока газа в газоходе;
- определенная длина прямого участка газохода до измерительного сечения (кратность диаметру газохода или сечению);
- определенные соотношения длин газоходов до точки отбора и после;
- соблюдение условий изокINETичности ;
- соблюдение герметичности при отборе (наличие специальных штуцеров или специальных шлюзовых затворов в зависимости от давления в газоходе);
- определение количества точек измерений исходя из местоположения точки (места) замера.

Проблемы при проведении ПЭК:

1) на многих ТЭС оборудование мест, соответствующих всем требованиям при определении аэродинамических параметров или запыленности дымовых газов в газоходах, вызывает трудности по следующим техническим причинам:

- отсутствие технической возможности организации мест отбора проб в сжатой компоновке действующих ТЭС;
- отсутствие прямого участка газохода до измерительного сечения;
- невозможность соблюдения условий изокINETичности в существующих газоходах многих ТЭС;
- отсутствие рабочих площадок для проведения отбора.

2) предписания контролирующих органов о несоответствиях - несоблюдение требований к оборудованию места измерений и даже признание недостоверности представляемых данных по производственному контролю.

Кроме того, на ряде ТЭС требуется, например, нормировать и контролировать компоненты золы углей (микро и макроэлементы), мотивируя тем, что эти компоненты входят в перечень - Распоряжение Правительства РФ от 20.10.2023 г. N 2909-р (с изм. от 05.06.2024 г.) «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры

государственного регулирования в области охраны окружающей среды» [6], хотя при установлении санитарно-гигиенических нормативов (ПДК в атмосферном воздухе) для золы углей учтено наличие в золе этих компонентов.

Ранее АО «ВТИ» совместно с другими отраслевыми институтами разработаны отраслевые нормативно-технические документы по инвентаризации, нормированию и контролю выбросов на ТЭС, в которых требования законодательства были адаптированы с учетом специфики работы ТЭС, результатов исследований состава выбросов ТЭС и определений аэродинамических параметров газовых потоков, включая достоверность косвенных измерений, когда значения выбросов определяют на основании прямых измерений других величин (концентрации загрязняющих веществ, компонентный состав топлива, расход топлива), функционально связанных с величиной выбросов, что допускается пп. 26 и 29 Приказа Минприроды РФ № 871 [3].

Однако за последние 10 лет многочисленные изменения в атмосферноохранном законодательстве (введение технологического нормирования, введение категорий объектов НВОС и новой разрешительной документации для них) не адаптированы в отраслевых документах по инвентаризации, нормированию и контролю выбросов с учетом специфики работы ТЭС, что выражается в возникающих проблемах при взаимодействии с контролирующими природоохранными органами.

Учитывая важность экологических аспектов в деятельности ТЭС АО «ВТИ» считает необходимым выполнить переработку отраслевых документов с адаптацией всех законодательных изменений с учетом особенностей функционирования объектов электроэнергетики (специфики работы ТЭС), связанных с

наличием независящих от таких объектов факторов, в том числе, графиков электрической нагрузки, задающихся Системным оператором Единой энергетической системы, потребление тепловой энергии потребителями, зависящее от изменения погодных условий, отапливаемой площади помещений и производственной программы промышленных потребителей.

Заключение

Актуализация отраслевых документов по инвентаризации, нормированию и контролю выбросов с учетом произошедших изменений в атмосферноохранном законодательстве, и специфики работы ТЭС позволит минимизировать проблемы ТЭС при проведении производственного экологического контроля и взаимодействии с контролирующими органами.

Список используемой литературы

1. Федеральный Закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изм. от 08.08.2024 г.);
2. Федеральный Закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (с изм. от 08.08.2024 г.);
3. Приказ Минприроды России от 19.11.2021 г. № 871 «Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, корректировки ее данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения таких инвентаризации и корректировки»;
4. Приказ Минприроды России № 109 от 18.02.2022 г. (с изм. от 13.11.2024 г.) «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля»;
5. Приказ от 21 марта 2025 года № 124 «Об утверждении правил эксплуатации установок очистки газа»;
7. Распоряжением Правительства РФ от 20 октября 2023 г. № 2909-р (с изм. от 05.06.2024 г.) «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды»;
8. ИТС-38-2024 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии»;
9. Приказ Росстандарта от 23.12.2024 г. № 3041 «Об утверждении информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» ИТС 38-2024»;
10. ГОСТ 17.2.4.06-90 «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения»;
11. ГОСТ 17.2.4.07-90 «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения»;
12. ПНД Ф 12.1.1-99 «Методические рекомендации по отбору проб при определении концентраций вредных веществ (газов и паров) в выбросах промышленных предприятий»;
13. ПНД Ф 12.1.2-99 «Методические рекомендации по отбору проб при определении концентраций взвешенных частиц (пыли) в выбросах промышленных предприятий»;
14. «Методические указания по оборудованию мест отбора проб при экоаналитическом контроле промышленных выбросов в атмосферу» (утв. НИИ Атмосфера, ФГУ «ЦЭКА» 30.09.2002);
15. ГОСТ 33007-2014 «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газовых потоков. Общие технические требования и методы контроля».

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

<i>Елфимова О.С.</i> Стандартизация как инструмент экологической безопасности: развитие систем автоматического контроля выбросов и сбросов	3
<i>Анфимов С.С.</i> Чистое энергопотребление: новые возможности в России.....	11
<i>Гладышева Т. Л., Гурьева А.Ю., Дмитриева Е.И., Новикова Н.Н., Сураева О.Н.</i> Декарбонизация производства электроэнергии на электростанциях России.....	17
<i>Рябов Г.А., Д.Т.Н., Антоненко Н.К.</i> Методические подходы к расчету выбросов загрязняющих веществ от котла ЦКС.....	30
<i>Коротченко В.В., К.Т.Н, Мезенцев Я.С.</i> Перспективы и преимущества внедрения в частном секторе электроотопительных систем с использованием теплонакопителей...	46
<i>Росляков П.В.</i> Особенности применения информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 38-2024 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» при получении КЭР.....	52
<i>Покасов Р.П.</i> Автоматические системы мониторинга выбросов: технические решения ООО «НПП «Экохимприбор» для объектов энергетики.....	61
<i>Коптев А.С., Леякин А.В., Серков Д.Е., Соколов А.А.</i> Влияние температурного режима в зоне активного горения пылеугольного котла на эффективность улавливания летучей золы в электрофилт্রে.....	67
<i>Жученко Е.Л., Смирнов М.Е., Гузаев В.А., Капустин Д.Е.</i> Инновационное оборудование АО «Кондор – Эко» для повышения эффективности электрофильтров ТЭС.....	76
<i>Красный Б.Л., Д.Т.Н., Красный А.Б., К.Т.Н., Серебрянский Д.А., К.Т.Н, Сандин А.В., Буданов И.А.</i> Высокотемпературная очистка дымовых газов теплоэнергетических установок в керамических каталитических фильтрах.....	89
<i>Мальчуглов А.С., Кучанов С.Н., Кочергин Д.О., Почтарь А.С., Виноградов С.В., Поткин Н.А.</i> Применение системы безмазутного розжига для экологически чистой растопки пылеугольных котлоагрегатов и подъема угольных ТЭЦ «с нуля».....	98
<i>Григорьев Д.Р.</i> способ снижения выбросов оксидов азота за счёт внедрения технологии внутритопочной рециркуляции в существующие горелки (flue-gas internal recirculation – fir технология) для малозатратной реализации ППЭЭ газовых ТЭС России.....	106
<i>Ахсанов А.В., Решетников Е.А.</i> Очистка дымовых газов аммиачным методом с получением $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: сверхнизкие выбросы, технологическая надёжность и экономика владения.....	116

<i>Киреенко В.С., Тугов А.Н., Строков А.А.</i> Особенности применения технологии селективного некаталитического восстановления NO _x на заводах для энергетической утилизации ТКО в Московской области.....	120
<i>Ряшенцев М.С., Епихин А.Н.</i> Возможности интенсификации удаления оксидов азота из дымовых газов в условиях аммиачно-сульфатной технологии сероочистки.....	128
<i>Киселева О.А., Иванова А.А.</i> Проблемы проведения измерений при выполнении ПЭК..	141