

Б. Хусаин, А.Р. Бродский, А.С. Сасс

**КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ
ВЫХЛОПНЫХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
ТЕПЛОВЫХ УСТРОЙСТВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**



Алматы 2025

УДК628.474.76
ББК 31.370.2+31.35
Х98

Утверждено к печати Ученым советом АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского» Протокол № 4 от 20.11.2024 г.

Рецензенты

Конуспаев Сапаркали Ретаевич д.х.н., профессор., Главный научный сотрудник лаборатории Химии нефти и нефтехимического синтеза АО «Института химических наук им. А.Б.Бектурова»

Кадирбеков Кайрат Адырбекович д.х.н., Первый заместитель Генерального директора АО «Институт химических наук им. А.Б.Бектурова», заведующий лабораторией Химии нефти и нефтехимического синтеза

Б. Хусаин, А.Р.Бродский, А.С.Сасс,

Х 98 «Комплексная система очистки выхлопных дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий», 2025 – 307 с.

ISBN – 978-601-269-541-0

В условиях стремительного роста промышленного производства и повышения требований к экологической безопасности, актуальность разработки эффективных технологий очистки атмосферных выбросов возрастает с каждым годом. Настоящая монография посвящена разработке и анализу комплексной системы очистки отходящих дымовых газов тепловых установок, работающих на ископаемом топливе, в частности угле, на основе интеграции каталитических, сорбционных, электростатических и реагентных методов.

Рассматриваются современные проблемы загрязнения атмосферного воздуха в Республике Казахстан, включая вклад теплоэнергетических объектов в общее загрязнение, и обосновывается необходимость перехода от локальных решений к универсальным мультимодульным системам очистки, адаптируемым под конкретные производственные условия и состав выбросов. Большое внимание уделено силиконовым аэрогелям как перспективным носителям для катализаторов низкотемпературной очистки.

Описаны принципы создания комплексных мультимодульных систем очистки отходящих дымовых газов, приводятся схемы их построения, обеспечивающие гибкость и возможность масштабирования.

Приводятся оригинальные конструкции универсальных крепёжных узлов, для размещения каталитических блоков нейтрализации в дымоотводы тепловых устройств без ухудшения прочностных характеристик, последних.

Монография состоит из трёх глав.

В первой главе проанализированы источники загрязнения и компонентный состав выхлопных газов. Подробно разбираются отдельные компоненты комплексной системы очистки выхлопных газов тепловых устройств и их физико-химические характеристики.

Во второй главе показан потенциал аэрогелей как перспективных носителей активных фаз в каталитических модулях.

В третьей главе описана архитектура комплексной мультимодульной системы очистки с возможностями гибкой конфигурации (настройки) под заданные экологические нормативы и технологические ограничения.

Представленные в работе технические решения ориентированы на повышение эффективности удаления серосодержащих и азотсодержащих оксидов, пылевых частиц, летучих органических соединений и CO/CO₂, с учетом возможностей вторичной утилизации золы и интеграции с существующей инфраструктурой ТЭЦ. Результаты исследования могут быть использованы для внедрения на объектах теплоэнергетики, металлургии, нефтепереработки и других отраслей тяжёлой промышленности.

УДК628.474.76
ББК 31.370.2+31.35

ISBN – 978-601-269-541-0

© Б. Хусаин, А.Р.Бродский, А.С.Сасс, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Экологическое состояние окружающей среды, в частности, воздушного бассейна, стало одним из самых серьезных вызовов для промышленно развитых стран и давно является трансграничной, международной проблемой. Загрязнение атмосферного воздуха наносит значительный ущерб водному бассейну, зеленым насаждениям и, как следствие, ухудшает качество жизни населения.

Казахстан занимает 64-е место в рейтинге стран с худшим индексом загрязнения воздуха. В Республике более 350 тепловых установок, работающих на твёрдом топливе. Доля выбросов вредных веществ от промышленных предприятий превышает 85%. Только ТЭЦ–2 г. Алматы сжигает в год 2,5 млн тонн угля, выбрасывая в атмосферу за этот период до 45 тысяч тонн вредных токсичных веществ. В 2020 г. Министерство экологии привело данные, из которых следует, что суммарно каждый год в воздух попадает более 2,5 млн тонн отходов. Этот показатель ежегодно в среднем увеличивается на 100 тыс. тонн. Если не предпринимать никаких мер, то к 2030 г. количество выбросов может составить 3,6 млн тонн в год.

С точки зрения экологии последствия использования угля в качестве энергоносителя являются наиболее тяжёлыми для окружающей среды и здоровья людей, поскольку содержание в угле примесей, минеральных компонентов, серы, азота, тяжелых металлов и т.д. может быть высоким [1]. При сжигании угля выделяются [1–5]: азот- и серосодержащие оксиды (NO_x , SO_2), летучие органические соединения, зола, пыль и большое количество углекислого газа (CO_2) на единицу произведенной энергии, а также различные металлы, которые могут рассеиваться на больших площадях и оказывать серьезное влияние на окружающую среду и здоровье человека. Попадающие в окружающую среду вместе с дымовыми газами оксиды азота являются основной причиной возникновения фотохимического смога, который при выходе в стратосферу играет роль активного катализатора, вызывающего разрушение озонового слоя [2, 5].

Способность быстрого окисления оксидов серы и азота до высших оксидов и взаимодействия с водяным паром в атмосфере приводит к образованию мелких капель серной и азотной кислот [5]. Последние, в свою очередь, способствуют выпадению кислотных дождей, наносящих огромный вред экосистемам.

Особенно негативно на здоровье человека воздействует диоксид серы. Если его концентрация превышает предельно допустимое значение, это может привести к различным болезням дыхательных путей, в том числе воспаление носоглотки, бронхит, кашель, боль в горле и хрипота. Крайне чувствительны к диоксиду серы люди с нарушениями органов дыхания [3].

Положение осложняется тем, что в Казахстане около 75% электроэнергии вырабатывается из угля и нефтепродуктов. Основной объем энергии вырабатывают 37 тепловых электростанций, работающих на углях Экибастузского, Майкубинского, Тургайского и Карагандинского бассейнов.

И, хотя в Республике утверждена Генеральная схема газификации Республики Казахстан [6] и Комплексный план развития газовой отрасли Республики Казахстан на 2022–2026 гг. [7], повсеместный перевод энергоблоков на потребление природного газа потребует очень больших капиталовложений, а в некоторых случаях окажется просто невозможным ввиду логистических проблем и специфики потребляющих объектов.

В то же время, уголь остаётся одним из наиболее распространённых и доступных ископаемых источников энергии в мире. По оценкам международных энергетических агентств, разведанных мировых запасов угля при текущем уровне потребления хватит более чем на 130 лет, что существенно превышает прогнозируемую долговечность запасов нефти и природного газа.

Казахстан обладает значительными запасами угля, что делает его одним из ключевых игроков на мировом энергетическом рынке. Согласно данным Министерства индустрии и инфраструктурного развития РК, страна занимает 8-е место в мире по доказанным запасам угля, которые составляют около 34 млрд тонн [8]. Эти ресурсы обеспечивают энергетическую безопасность страны и позволяют планировать долгосрочное развитие угольной отрасли. Годовая добыча угля в Казахстане (по данным 2023 г.) составляет ~110–115 млн тонн (включая экспорт и внутреннее потребление). Следовательно, при нынешнем уровне потребления разведанных запасов угля хватит примерно на 300 лет.

Наличие значительных угольных ресурсов обеспечивает энергетическую безопасность, снижает зависимость от внешних поставок и валютных колебаний, а также позволяет использовать уже существующую инфраструктуру электростанций, транспортных сетей и технологических цепочек. Это делает уголь стратегически важным ресурсом, особенно в условиях глобальной нестабильности и переходного периода к низкоуглеродной энергетике.

Таким образом, с позиции долгосрочной обеспеченности топливом уголь остаётся для Республики Казахстан актуальным источником энергии, особенно в условиях модернизации технологий с целью снижения экологического воздействия. При этом необходимо учитывать, что ранее построенные на окраинах городов ТЭЦ по мере роста городских агломераций постепенно оказываются в городской черте. Это вызывает, помимо экологических, еще и социальные проблемы. Перенос столь масштабных производств на большие расстояния является весьма затратным, а большие расстояния для транспортировки электроэнергии и горячей воды приводят к удорожанию для потребителя конечных услуг. Последнее в свою очередь влечет дополнительные социальные проблемы для населения.

Таким образом, в условиях Казахстана наиболее рациональным подходом к решению проблемы состояния окружающей среды ввиду загрязнения выбросами ТЭС является не переход на иные виды топлива, а газоочистка выхлопных газов ТЭС, работающих на природном топливе, до уровней, соответствующих выбросам после сжигания «зеленого» топлива.

Газоочистка подразделяется на такие виды как:

- очистка от взвешенных частиц в виде пыли, тумана;
- очистка газов от примесей и токсичных компонентов в газообразном (парообразном) состоянии, которые нежелательны при их дальнейшем использовании или выбросе в окружающую среду.

Газы можно очищать от примесей несколькими методами:

- поглощением при промывке газов жидкостями – абсорбцией; в ряде случаев газы при растворении в жидкости вступают в химическую реакцию с самой жидкостью (водой) или с компонентами, растворенными в ней (например, растворенный SO_2 может вступить в реакцию с NaOH в составе раствора), – этот процесс называют хемосорбцией и широко применяют в технике;

- поглощением твердыми материалами – адсорбцией;

- превращением газообразных химических примесей при помощи газообразных добавок в твердое или жидкое состояние с последующим выделением полученных продуктов; однако этот метод сложен, так как требует улавливания образующихся мелких твердых или жидких частиц, поэтому его применяют редко;

- каталитическими методами с участием твердых гетерогенных катализаторов различного типа, включая блочные системы на основе металлических или керамических носителей, обеспечивающих сравнительно невысокие значения гидравлического сопротивления.

В нефтехимической, металлургической и энергетической промышленности помимо электрофильтров наиболее распространены методы абсорбции. При их реализации необходимо создавать хороший контакт между газом и жидкостью и подобрать такую жидкость, которая бы хорошо поглощала нужный компонент, но не реагировала бы с другими компонентами газа. Скорость растворения газа в жидкости зависит от свойств жидкости и газа, способа и поверхности их контакта, степени насыщения жидкости поглощаемым газом.

Поверхностью контакта газа с жидкостью является мокрая поверхность насадки скруббера, поверхность капель распыляемой жидкости или пузырьков барботируемого газа.

Движущая сила абсорбции равна средней разности концентраций поглощаемого газа в газовой смеси и равновесной концентрации этого компонента в газовой фазе соответственно над поглощающим раствором. Движущую силу абсорбции можно также выразить как разность парциальных давлений поглощаемого компонента в газовой фазе и равновесного давления этого компонента над поглотительной жидкостью.

При расчетах движущей силы абсорбции необходимо учитывать различные виды контакта движущихся газа и жидкости:

- газ и жидкость движутся в одну сторону – параллельный ток или прямоток;

- газ и жидкость движутся в противоположных направлениях – противоток;

- газ движется вдоль неподвижной жидкости – в этом случае концентрация жидкости везде одинакова, но изменяется по мере поглощения компонента из газа.

Два первых вида контакта газа с жидкостью относятся к процессам непрерывным, третий – к периодическому, когда газ поступает непрерывно, а поглотительную жидкость периодически меняют в промывном аппарате. При противотоке лучше используется поглотительная жидкость – она в большей степени насыщается и более полно очищает газ. Прямоток применяют в случаях, когда поглотительная жидкость хорошо растворяет абсорбируемый компонент, в тоже время, прямоток неэффективен для плохо растворимых газов.

Процесс, представляющий собой улавливание вредных веществ в промышленных газовых выбросах, подразделяется на промышленную очистку газов для утилизации их выбросов, а также возврат в производство отделенного от вредных компонентов безвредного продукта, обеспечивая тем самым его экологическую нейтральность. Выбор конструкции оборудования для газоочистки и технологии применяемой очистки осуществляется в зависимости от характера производственного процесса, состава отработанных газов, необходимой степени очистки и пр.

На ТЭЦ, использующих уголь, предварительно удалять соединения серы не представляется возможным из-за твердого состояния топлива. Вместе с тем, в дымовых газах ТЭЦ, как правило, образуется незначительное количество продуктов неполного окисления, особенно в случае избытка воздуха. По этой причине основным загрязнителем в случае ТЭЦ на угольном топливе является SO_2 : содержание серы может достигать 0,8–1,2% от веса угля и для ТЭЦ мощностью около 500 МВт может давать выброс диоксида серы до 60–80 тонн в сутки. При попадании в атмосферу SO_2 окисляется кислородом воздуха до SO_3 и дает с парами воды серную кислоту. Таким образом, на город в течение суток выпадает до цистерны серной кислоты. Сгорание топлива при температуре выше 800 °С приводит к образованию второго загрязнителя – оксидов азота NO_x – за счет взаимодействия кислорода с азотом воздуха. Третьим загрязнителем в дымовых газах ТЭЦ на угольном топливе является зола и твердые пылевые частицы.

Для удаления из дымовых газов твердых частиц одновременно с оксидами серы, азота и углерода требуется использование различных методов и их комбинаций, включая каталитические методы одновременно с мокрым поглощением. Так, диоксид серы, который вносит основной вклад в загрязнение атмосферы при сжигании угля, успешно удаляется щелочными поглотителями наряду с остаточными частицами пыли.

В установках для поглощения газов используются либо скрубберы различной конструкции с орошением, либо барботеры с пробулькиванием через слой раствора поглотителя. Главными критериями эффективности поглотительных установок является их поверхность контакта и динамическое сопротивление газовому потоку. Как правило, у барботажных установок

динамическое сопротивление выше, чем у скрубберов. Простейшим и наиболее часто используемым является скруббер Вентури, представляющий из себя циклон с орошением стенок поглотительным раствором. Они имеют низкое сопротивление и просты в изготовлении, однако при большом диаметре в центре циклона контакт газа со стенками затруднен, что вызывает проскок неочищенного газа. Скрубберы с орошением с большой высоты капельками поглотительного раствора имеют низкое сопротивление, однако требуют достаточно высокой конструкции (десятки метров). Существуют скрубберы с насадками в виде колец Рашига или подобных им, но у них сопротивление значительно выше, чем у предыдущих.

В настоящее время появились батарейные эмульгаторы нового типа для поглощения пыли и газов. Они отличаются компактностью, низким сопротивлением потоку газов, высокой эффективностью, отсутствием подвижных элементов и простотой в эксплуатации. Конструкция этого скруббера представляет собой набор (батарею) циклонов типа Вентури небольшого диаметра, расположенных поперек основного потока газа и сверху орошаемой поглотителем. Достоинством такого устройства является эффективный контакт с реагентом путём образования объемной эмульсии, которая имеет большую поверхность соприкосновения газа с жидкостью.

При этом после удаления пыли из дымовых газов в мокрых скрубберах, в частности, в батарейных эмульгаторах нового типа [9, 10], температура газов недостаточна для проведения каталитических процессов очистки. Наиболее эффективным способом удаления SO_2 и NO_x в низкотемпературных условиях является реагентная очистка, позволяющая устранить более 90% токсичных компонентов. Однако, реагентный метод малоэффективен применительно к очистке от монооксида азота NO , не являющегося солеобразующим оксидом. В этой связи можно утверждать, что наиболее перспективным подходом к комплексной очистке выбросов тепловых устройств на основе твердого топлива является комбинирование различных методов. Именно на основе подобного подхода могут быть созданы эффективные системы очистки.

Таким образом, снижение экологического воздействия на окружающую среду возможно при сокращении вредных выбросов промышленных производств путём установки современных комплексных очистительных систем, которые способны резко снизить уровень поступления вредных веществ в атмосферу. Помимо прочего, уловленная сухая зола угольных ТЭЦ может служить хорошим сырьем для производства цемента, стекловаты, использоваться как наполнитель, в том числе в сухих цементных и в бетонных смесях.

На предприятиях в Казахстане системы очистки отходящих дымовых газов не носят комплексный характер [11]. Как правило, они настроены на ограниченное число вредных компонентов, например, таких как пылевые частицы, причём выбросы монооксида углерода CO практически игнорируются по причине малого размера экологических штрафов. Для улавливания пылевых частиц, как правило, применяются электрофильтры,

жидкостные эмульгаторы и рукавные фильтры. Электрофильтры и рукавные фильтры имеют эффективность не более 90–95%. Жидкостные эмульгаторы II поколения с мокрым золоудалением обладают эффективностью 99,3–99,7%, но их применение приводит к намоканию золы (пылевых частиц), что делает её непригодной для дальнейшего использования, поскольку сухая зола угольных ТЭЦ, как уже отмечалось выше, является хорошим сырьем для производства цемента, стекловаты, может использоваться как наполнитель, в том числе в сухих цементных и бетонных смесях. Кроме того, в золоуловителях на основе эмульгаторов наблюдается большой расход воды.

В зарубежных системах очистки присутствуют элементы комплексного подхода, с применением различных вариантов реагентной очистки совместно с сорбционной и каталитической. При этом каждый из методов требует своих условий проведения процесса, что подразумевает жёсткую привязку к конкретному объекту и составу отходящих газов, а задача создания общей схемы комплексной очистки становится в значительной степени сложной для реализации. Ситуация усложняется ещё и тем, что экологические требования к составу отходящих газов после прохождения систем очистки постоянно ужесточаются.

Следовательно, особенно актуальным является создание систем комплексной очистки с использованием компоновки кассетного типа, включающей блоки нейтрализации различной природы (блоки электростатической очистки, блоки каталитической нейтрализации, блоки реагентной очистки) с возможностью оперативного реагирования на изменение потребностей и санитарных нормативов для тех или иных объектов, адаптации к конкретным условиям, таким как наличие или отсутствие воды, размер технических площадей и золоотвалов, близость к жилым массивам, природоохраняемым объектам и т.д.

Данная работа посвящена системе комплексной очистки отходящих дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий, использующих ископаемое топливо, разработанной в АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского».

В первой главе подробно разбираются отдельные компоненты комплексной системы очистки выхлопных газов тепловых устройств и их физико-химические характеристики.

Во второй главе описаны аэрогели как перспективный тип носителя для каталитических систем очистки дымовых газов.

В третьей главе обсуждаются принципы построения комплексной мультимодульной системы очистки отходящих дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий и функциональные возможности отдельных модулей. Приводятся несколько вариантов блок-схем системы очистки, включая модуль декарбонизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе целевого финансирования МОН РК ИРН BR21882241 «Исследование и разработка комплексной системы улавливания и хранения CO₂ на промышленных объектах Республики Казахстан для сокращения выбросов парниковых газов».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Когут В.Е., Бутовский Е.Д., Бушманов В.М., Хмельнюк М.Г. Защита окружающей среды от канцерогенных смол при розжиге отопительных систем // Энергетика и энергосберегающие технологии. – 2015. – Т. 51, № 4. – С. 45-52. DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.39288.

2 Батенин В.М., Масленников В.М., Выскубенко Ю.А. Комплексное энерготехнологическое использование угля // Известия Академии наук: Энергетика. – 2011. – № 5. – С. 11-17.

3 Марченко М.В. Уменьшение выбросов оксидов серы и методы сероочистки дымовых газов в энергетических установках // Международная научно - техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2019. – С. 2251-2254.

4 Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Лырщиков С.Ю. Снижение выбросов при сжигании углей, водоугольных и органомоугольных топлив // Химия твердого топлива. – 2017. – № 6. – С. 26-32. DOI: 10.7868/S0023117717060044.

5 Побочные продукты сжигания угля в США: Проблемы и возможности: Материалы II Международной научно-практической конференции. Москва, 19–21 октября 2005 г. / отв. ред. Д. Госс, Э.Ч. Миллер. – М.: МЭИ, 2005. – С. 149-156.

6 Об утверждении Генеральной схемы газификации Республики Казахстан на 2015–2030 годы // Постановление Правительства Республики Казахстан. – 2014. – № 1171.

7 Об утверждении Комплексного плана развития газовой отрасли Республики Казахстан на 2022–2026 годы // Постановление Правительства Республик Казахстан. – 2022. – № 488. 8 ! <https://invest.gov.kz>

9 Зарубин В.Г. Батарейный эмульгатор II поколения // Энергетика. – 2017. – № 4(63). – С. 24-25.

10 Айдымбаева Ж.А. Исследование эффективности использования сточных вод ТЭС для десульфуризации дымовых газов: дисс. ... д-ра философии (PhD) / Айдымбаева Жанар Абдешевна; Алматинский ун-т энергетики и связи им. Г. Даукеева. – Алматы, 2022. – 157 с.

11 Wang X., Zheng H., Wang Z., Shan Y., Meng J., Liang X., Feng K., Guan D. Kazakhstan's CO₂ emissions in the post-Kyoto Protocol era: Production- and consumption-based analysis // Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 249. – 109393. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109393.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе подробно рассмотрены, основываясь на собственных разработках, состав, принципы построения и в целом сама комплексная мультимодульная система очистки дымовых газов промышленных предприятий, использующих ископаемое топливо, включая модули декарбонизации.

Проведены расчёты и экспериментально показано, что для минимизации газодинамического сопротивления для каталитических нейтрализаторов оптимальными являются корпуса с плавными переходами диаметров (диффузор-конусные конструкции), кроме того, необходимо оптимизировать количество и форму внутренних вставок. Выход из корпуса не должен содержать сужений на выходе, блоки должны иметь прямые максимально гладкие каналы размера, обеспечивающего минимизацию пристеночной турбулентности, этому же способствуют максимально гладкие стенки каналов. Блоки с большим размером транспортных каналов, хотя и имеют меньшую геометрическую поверхность, но обладают рядом ценных качеств:

- имеют более низкое газодинамическое сопротивление потоку газов и при потере рабочей поверхности в меньшей степени увеличивают сопротивление потоку;

- при увеличении диаметра блоков для компенсации потери рабочей поверхности увеличение противодавления происходит в меньшей степени, чем при увеличении рабочей поверхности за счет увеличения числа каналов на 1 см² и уменьшения их поперечного сечения;

- в более крупных каналах при саже- или пылеотложениях вероятность полной блокировки каналов существенно снижается.

В то же время, блоки с большим числом мелких каналов при прочих равных условиях более компактны, но имеют максимальное аэродинамическое сопротивление, и их можно использовать в процессах очистки топочных газов тепловых устройств (котельных) с принудительным отсосом газов.

Был определён элементный состав твёрдых дымовых частиц и их дисперсность в реальных газах ТЭЦ. Установлено, что в них могут содержаться микросферы диаметром в несколько десятков микрон, однако после прохождения газами систем очистки микросферы разрушаются.

Проведено исследование каталитических модулей нейтрализации на основе платины, в том числе для очистки отходящих газов от непрореагировавших углеводородов. Кроме того, был рассмотрен процесс отравления платиносодержащего катализатора парами серосодержащих соединений на предмет их последующей регенерации. Удалось показать, что в случае регенерации катализатора, «осерненного» соединениями серы при термической обработке в токе воздуха при 600 °С, происходит значительное уменьшение количества серы в катализаторе, т.е. её удаление, а сам катализатор способен восстанавливать свою активность.

Был разработан и описан предусматривающий несколько этапов технологический регламент приготовления модулей каталитических нейтрализаторов отходящих дымовых газов промышленных предприятий, содержащих активную фазу на основе платины.

Были определены термохимические характеристики компонентов отходящих дымовых газов и энергии их взаимодействия с активной фазой нейтрализатора на основе платины методами молекулярной механики и квантовой химии. Проведенные построения моделей и расчеты могут служить для определения характера взаимодействия смеси газов с поверхностью оксида алюминия с нанесенными атомами платины. В перспективе, использование подобных моделей способно существенно сократить время поиска оптимальных решений при экспериментальных исследованиях.

С целью замещения в нейтрализаторах дорогостоящих компонентов и приближения эффективности таких систем к системам на основе благородных металлов, был проведён синтез каталитически активных фаз на основе $3d$ -металлов, в частности, с использованием ванадия и кобальта с промотирующими добавками. Широким набором методов были исследованы их физико-химические характеристики. Показана высокая эффективность этих систем.

В случае систем на основе ванадия введение мочевины перед катализатором позволяет достичь высокой степени удаления из газового потока оксидов азота вплоть до 90% об. При введении вольфрама и марганца в качестве промоторов конверсия может составлять более 90%. Вероятно, тонкий подбор и настройка состава катализатора позволит достичь более высоких степеней превращения. Можно сделать вывод, что синтезированные ванадийсодержащие катализаторы очистки от оксидов азота имеют значительный потенциал для применения.

Помимо оксидов азота, ещё одной проблемой является выброс в атмосферу не полностью сгоревших, а также непрореагировавших углеводородов C_nH_x . В результате проведённых исследований показана высокая термостабильность и активность в окислении углеводородов (даже самого трудноокисляемого – метана) систем на основе не только ванадия, но и кобальта.

Установлено, что образцы катализаторов на основе кобальта с промотирующими добавками, подвергнутые повторной термообработке при 1100 °С, способны к полной регенерации путем реокисления.

Были рассмотрены жидкостные способы очистки отходящих дымовых газов от оксидов серы и азота. Предложена и запатентована оригинальная схема устройства для очистки дымовых газов от оксидов азота и серы с использованием многосекционного абсорбера со ступенями вихревого контакта и орошения с форсунками на выходе.

Проведены инструментальные исследования образцов силикатных аэрогелей как перспективного носителя активных фаз в каталитических

модулях системы очистки. Выбранный набор физико-химических методов и используемые методики позволили получить подробную информацию о составе и структуре образцов.

В частности, удалось установить (ИК-спектроскопия) что не все этокси-группы замещаются в тетраэтоксисилане в процессе гидролиза.

Данные, полученные с помощью электронной микроскопии, показали, что в образцах аэрогелей присутствует целый набор структур, в том числе и нанотрубок, которые различаются как формой, так и размерами.

Элементный состав образцов заметно различается. Наиболее существенные отличия наблюдаются в соотношениях O/Si и C/Si.

Исследования аэрогелей методом БЭТ (по низкотемпературной адсорбции азота) показали, что размеры пор в образцах находятся в интервале от первых ангстрем до 70 – 80. Величины $S_{уд}$, $V_{адс.макс}$, $V_{ист.}$ для образцов также заметно различаются, аналогичным образом ведет себя и кривая распределения пор по размерам, следовательно, текстура образцов существенным образом зависят от условий их синтеза.

С помощью мессбауэровской спектроскопии найдено, что образцы содержат близкий набор железосодержащих фаз, в то же время каждый образец является неоднородным по составу и включает как парамагнитные, так и магнитоупорядоченные фазы разной дисперсности.

Таким образом, удалось установить, что синтезированные аэрогели не являются моноструктурными образованиями, а соотношение кислород/кремний, углерод/кремний в них может существенно меняться в зависимости от условий синтеза, что можно связать с различной степенью гидролиза и конденсации в этих образцах. Это позволяет контролировать процесс синтеза аэрогелей при варьировании внешних условий и состава реакционной среды, что, в свою очередь, даёт возможность проводить «тонкую» настройку их физико-химических параметров для получения оптимальных характеристик при использовании аэрогелей на основе кремния в качестве носителя каталитически активных фаз.

Основными принципами построения системы очистки отходящих дымовых газов является её комплексный и мультимодульный принцип построения. Такой подход обеспечивает возможность реализации принципа свободной компоновки системы, в том числе и в мобильном варианте в зависимости от специфики объекта. Принцип свободной компоновки подразумевает варьирование набора модулей очистки от различных вредных компонентов в зависимости от специфики эксплуатации тепловых устройств промышленных предприятий.

Можно использовать различные комбинации. В частности, показано, что для удаления твёрдых частиц и сажи наиболее эффективной является комбинация, состоящая из электрофильтров и жидкостных скрубберов.

Для удаления кислых газов целесообразно использовать жидкостные скрубберы. В работе приводится схема расчёта водного и реагентного эмульгаторов, а также типового эмульгатора для очистки газового потока объёмом 500 м³/час.

Проведено исследование кинетики абсорбции диоксида серы в скруббере-эмульгаторе. Проведена оценка оптимальных реагентов.

Предложена схема расчёта каталитического нейтрализатора и проведены исследования кинетики каталитического окисления CO, SO₂ и NO на блочном каталитическом нейтрализаторе.

Предложена схема расчёта адсорбера в блоке декарбонизации. В качестве примера проведён расчет типового адсорбера CO₂ со слоем цеолита NaX для очистки газового потока объемом 500 м³/ч.

В итоге:

- была подобрана оптимальная конфигурация взаимного расположения и увязки компонентов комплексной системы очистки от пыли и вредных компонентов дымовых газов ТЭЦ;

- составлены методики балансовых и проектных расчетов основных аппаратов, образующих систему очистки: каталитического нейтрализатора с блочным катализатором, батарейного эмульгатора с водой и щелочным реагентом, адсорбера для поглощения CO₂;

- проведены типовые балансовые и проектные расчеты описанных аппаратов для очистки дымовых газов расходом 500 м³/ч, подобраны конструкционные параметры для потенциального составления технического задания.

Полученные результаты позволили оценить ориентировочные размеры аппаратов системы очистки для различных расходов газа.

В работе обсуждается установка каталитических блоков нейтрализации вредных компонентов отходящих дымовых газов в системы дымоотводов промышленных предприятий. Описаны схемы запатентованных универсальных узлов крепежа для установки модулей каталитической нейтрализации.

Приводятся запатентованные схемы групп и модулей мультимодульной комплексной системы очистки дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий. Дается подробное описание их принципов работы, назначения и функциональных возможностей.

В работе обращено внимание на вопрос построения цифровых двойников. Рассматривается процесс построения и использования математических моделей, а также настройки взаимодействий и визуальных эффектов для наглядного отображения всех этапов процесса очистки дымовых газов промышленных предприятий. Использование Unity для разработки таких моделей позволяет не только улучшить визуальное представление работы системы очистки в целом, но и создать удобные инструменты для мониторинга и анализа данных в реальном времени. Это, в свою очередь, поможет операторам и инженерам быстрее принимать обоснованные решения по улучшению функционирования системы, прогнозировать её поведение при различных сценариях работы и предотвращать потенциальные сбои.

Необходимо отметить, что создание цифровых двойников для систем очистки и улавливания углекислого газа (CO_2) в Unity открывает широкие перспективы для повышения эффективности промышленных процессов и улучшения экологической ситуации. С помощью цифровых моделей, подкреплённых физическими и химическими расчетами, возможно более точно симулировать сложные процессы, происходящие в установках для очистки газов, оценивать их производительность и определять пути для оптимизации.

Применение цифровых двойников в области экологического инжиниринга и промышленных технологий имеет значительный потенциал для дальнейшего развития. Они позволят исследовать и тестировать новые подходы к процессам очистки и улавливанию CO_2 , что будет способствовать сокращению выбросов и поддержанию экологического баланса. В условиях глобальных усилий по снижению воздействия на окружающую среду, такие технологии должны стать неотъемлемой частью устойчивого развития промышленности и общества в целом.

Заклячая, необходимо отметить, что уголь сам по себе не является экологически чистым топливом, так как его сжигание сопровождается значительными выбросами углекислого газа, оксидов азота, серы, твердых частиц и т.д. В то же время, уголь играет ключевую роль в энергетическом балансе Казахстана, обеспечивая около 80% производства электро- и тепловой энергии. Он также используется в металлургии, химической промышленности и других отраслях.

Мировая тенденция по переходу к «зеленой экономике» и снижению выбросов парниковых газов оказывают давление на угольную отрасль. Казахстан взял на себя обязательства по сокращению выбросов и достижению углеродной нейтральности к 2060 году, что потребует значительных изменений в энергетическом секторе. Перевод энергоблоков на потребление природного газа потребует очень больших капиталовложений, а в некоторых случаях может оказаться невыполнимым из-за логистических проблем и специфики потребляющих объектов. Кроме того, повсеместная газификация не решит проблему декарбонизации, поскольку при сжигании природного газа образуется диоксид углерода.

В условиях Казахстана наиболее рациональным выходом из этой сложной ситуации может быть применение современных методов очистки отходящих газов. К таким методам относятся:

- установка скрубберов, которые улавливают сернистые соединения из отходящих газов;
- применение технологий селективного каталитического восстановления (SCR), эффективно преобразующих оксиды азота в азот и воду;
- использование электрофильтров фильтров, которые удаляют золу и другие твёрдые примеси;

- технологии улавливания и хранения углерода (CCS), которые захватывают CO_2 из отходящих дымовых газов и предотвращают его попадание в атмосферу.

Применение этих технологий позволяет минимизировать воздействие угля на окружающую среду и значительно улучшить экологические характеристики его сжигания.

В данной работе подробно представлена и описана разработанная в АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского» оригинальная система комплексной очистки отходящих дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий, использующих ископаемое топливо, с детальным описанием составляющих её модулей (компонентов) и принципов их работы. Система очистки способна очищать дымовые газы от твёрдых частиц и сажи, непрореагировавших углеводородов, оксидов азота и серы, монооксида углерода, содержит модуль для улавливания углекислого газа. Приводятся данные по эффективности её использования.

Обсуждается и показана возможность свободной компоновки модулей системы в зависимости от специфики промышленного объекта. Она может применяться на любых тепловых устройствах, использующих ископаемое топливо, в том числе и в мобильном исполнении.

Как было показано в работе, применение разработанной мультимодульной системы комплексной очистки отходящих газов промышленных предприятий при сжигании твёрдого ископаемого топлива (угля) позволит значительно снизить выбросы экологически вредных компонентов, вплоть до уровня, сравнимого с выбросами при использовании природного газа или даже близкого к «зелёным» топливам.

Экспериментальная методика

Мессбауэровская спектроскопия

Источником служил кобальт 57 в матрице хрома, активностью 100 мКи. Спектры обрабатывались на ПК методом «наименьших квадратов». Величины изомерных сдвигов (IS) приведены относительно α -Fe, QS – квадрупольное расщепление, $H_{\text{эфф.}}$ – эффективное магнитное поле. Температура снятия спектров – 293 К. Спектрометр MS 1104Em.

$$\Delta Is = \pm 0,03 \text{ мм/с}; \Delta Qs = \pm 0,03 \text{ мм/с}; \Delta H_{\text{эфф.}} = \pm 5 \text{ кэ}; \Delta S = \pm 2 \text{ \%}.$$

Электронная микроскопия (растровая)

Использовался сканирующий электронный микроскоп JSM 6610 LV, JEOL, Япония. Режим «вторичных электронов».

Элементный анализ – проводился с помощью энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионной системе микроанализа INCA Energy 450, установленной на сканирующий электронный микроскоп JSM 6610 LV, JEOL, Япония.

Электронная микроскопия (просвечивающая)

Использовался электронный микроскоп ЭМ-125К. Увеличение до 800000 раз и разрешающая способность $\sim 3,5$ ангстрема. Образцы готовились методом «сухой суспензии».

Инфракрасная спектроскопия.

Использовался ИК - Фурье спектрометр «IMPACT 410», фирмы NICOLET, США и ИК-Фурье спектрометр Nicolet iS5. Рабочий режим - «на прохождение», разрешение 1 см^{-1} , количество сканов - 200. Программное обеспечение «OMNIC 9». Система поиска и сравнения по базам данных работала в режиме алгоритма «корреляция».

Пробы для снятия ИК-спектров готовились смешением 200 мг KBr (марка «ОСЧ») и 3 мг исследуемого вещества с последующим прессованием из полученной смеси таблетки. Прессование производилось в пресс-форме с опцией «вакуумирование».

При обработке ИК-спектров использовалась база данных, включающая более сорока шести тысяч спектров..

Исследование текстуры.

Метод БЭТ, по низкотемпературной адсорбции азота. Стандартная методика.

Прибор - AccuSorb, фирма Micromeritics, USA.

Программное обеспечение:

Лицензионный программный пакет GAUSSIAN-09.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Значения длин связей даны в Å, углов – в градусах;

M - мультиплетность межмолекулярного комплекса или его компонентов, $M=2S+1$, где S - спин частицы;

Цвет атомов на рисунке: S – желтый, N – синий, O – красный;

6-31G(d,p) - набор базисных функций, использованный для атомов Al, O, H, C, N, S;

Å - единица длины, 10^{-10}м ;

API - Application Programming Interface, интерфейс программирования приложений;

B3LYP - обменно-корреляционный функционал в теории функционала плотности (ТФП);

ВЗМО (НОМО) - верхняя занятая молекулярная орбиталь;

BIM - Building Information Modeling, информационное моделирование объектов;

CIM - Computer-Integrated Manufacturing, компьютерная автоматизация производства;

Dip - дипольный момент молекулы;

DFT - квантово-химический метод функционала матрицы плотности Кона-Шэма;

e - заряд электрона;

E_{tot} - полная энергия молекулы или комплекса;

ΔE_{tot} - изменение полной электронной энергии при образовании межмолекулярного комплекса;

$\Delta(E_{\text{tot}} + ZP)$ то же, с поправкой на энергию нулевых колебаний;

$\Delta E_{\text{H+n}}$ - энергия протонирования;

FBX - Filmbox, формат файла;

G-09 - лицензионный программный пакет GAUSSIAN – 09;

ΔG - свободная энергия Гиббса;

HCMO (LUMO) - нижняя свободная молекулярная орбиталь;

HF - неэмпирический квантово-химический метод Хартри-Фока;

ΔH - энтальпия образования комплекса;

HTU - Height of Transfer Unit, высота (величина) единицы переноса;

JSON - JavaScript Object Notation, формат обмена данными;

$K_p \sim$ константа равновесия образования межмолекулярного комплекса
 $\sim \exp(-\Delta G/RT)$;

LOD - Level of Detail, уровень детализации;

NTU - Number of Transfer Units, число единиц переноса;

REST - Representational State Transfer, стиль разработки веб-сервисов;

RT – Произведение газовой постоянной и температуры в К.;

SW - Удельная площадь поверхности, м²/г;

ППЭ (PES) – поверхность потенциальной энергии (potential energy surface);

XML - Extensible Markup Language, формат обмена данными.

ИК-спектроскопия – Инфракрасная спектроскопия

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	1
Список использованных источников	7
Глава 1 Компоненты комплексной системы очистки выхлопных газов тепловых устройств.	8
1.1 Стенд для испытаний блоков каталитических нейтрализаторов	8
1.2 Влияние геометрии блоков каталитических нейтрализаторов на его газодинамическое сопротивление потоку газа и активность при варьировании скорости потока и температуры	10
1.2.1 Влияние геометрии блока нейтрализатора на его газодинамическое сопротивление потоку газа	10
1.2.2 Влияние количества ячеек на единицу площади сечения блока нейтрализатора на его газодинамическое сопротивление потоку газа	13
1.3 Входной и выходной контроль компонентного состава отходящих дымовых газов	20
1.3.1 Газовые компоненты	20
1.3.2 Компонентный состав твёрдых дымовых частиц и их дисперсность (модельные газы)	21
1.3.3 Элементный состав твёрдых дымовых частиц и их дисперсность (реальные газы)	26
1.3.3.1 Компонентный состав твёрдых дымовых частиц и их дисперсность до прохождения системы очистки	26
1.3.3.2 Компонентный состав твёрдых дымовых частиц и их дисперсность после прохождения жидкостной системы очистки	29
1.4 Модули каталитической нейтрализации	32
1.4.1 Платиносодержащие каталитические модули	33
1.4.1.1 Подбор и испытания каталитически активных фаз	33
1.4.1.2 Исследование процесса отравления платиносодержащего катализатора парами серосодержащих соединений с последующей регенерацией	50
1.4.2 Определение термохимических характеристик газов и энергии их взаимодействия с активной фазой нейтрализатора на основе платины методами молекулярной механики и квантовой химии	55
1.4.2.1 Расчеты моделей взаимодействия метана, оксидов углерода, азота и серы с моноатомным и двухатомным кластерами платины	55
1.4.2.2 Расчеты моделей взаимодействия метана, оксидов углерода, азота и серы с моноатомным и двухатомным кластерами платины с учетом носителя	62
1.4.3 Каталитические системы, содержащие 3d-металлы	68
1.4.3.1 Ванадий содержащие каталитические системы	68
1.4.3.2 Кобальт содержащие каталитические системы	83
1.5 Жидкостные способы очистки отходящих дымовых газов от оксидов серы и азота	128
Список использованных источников	142
Глава 2 Аэрогели – перспективный тип носителя для каталитических систем очистки дымовых газов	157
2.1 Методы получения золей диоксида кремния	161
2.1.1 Влияние катализаторов	163

2.1.2	Влияние выбора прекурсора	167
2.1.3	Методы модификации поверхности пор	171
2.1.4	Методы сушки геля	172
2.2	Получение неорганических аэрогелей	177
2.2.1	Оборудование для получения аэрогелей	177
2.2.2	Экспериментальные исследования по изучению «золь-гель процесса»	180
2.2.3	Исследование кинетики сверхкритической сушки неорганических аэрогелей	182
2.2.4	Методика получения неорганических аэрогелей на основе диоксида кремния	188
2.3	Физико-химические исследования аэрогелей	190
2.3.1	Элементный состав	190
2.3.2	Исследования с помощью мессбауэровской спектроскопии	192
2.3.3	Исследования с помощью ИК-спектроскопии	194
2.3.4	Исследования с помощью электронной микроскопии	202
2.3.4.1	Просвечивающая электронная микроскопия	202
2.3.4.2	Сканирующая электронная микроскопия	210
2.3.5	Исследование текстуры аэрогелей	228
	Список использованных источников	231
Глава 3	Построение комплексной мультимодульной системы очистки отходящих дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий	236
3.1	Модуль удаления твёрдых частиц и сажи	236
3.2	Модуль для удаления кислых газов на основе жидкостных скрубберов	237
3.2.1	Схема расчета водного эмульгатора	238
3.2.2	Схема расчета реагентного эмульгатора	243
3.2.3	Расчет типовых пенных эмульгаторов для очистки газового потока объемом 500 м ³ /ч	245
3.2.4	Подбор реагентов для удаления кислых газов и кинетические характеристики эмульгаторов	249
3.3	Расчёт каталитического нейтрализатора	254
3.3.1	Общая схема расчёта	255
3.3.2	Обработка экспериментальных кинетических данных	257
3.3.3	Расчет типового каталитического нейтрализатора для очистки газового потока объемом 500 м ³ /ч	263
3.4	Расчет адсорбера	264
3.4.1	Схема расчёта адсорбера	264
3.4.2	Расчет типового адсорбера CO ₂ со слоем цеолита NaX для очистки газового потока объемом 500 м ³ /ч	267
3.5	Сопоставительный анализ геометрии аппаратов	268
3.6	Установка каталитических блоков нейтрализации вредных компонентов отходящих дымовых газов в системы дымоотводов промышленных предприятий	269
3.7	Комплексная мультимодульная система очистки отходящих дымовых газов тепловых устройств промышленных предприятий	276
3.8	Создание цифрового двойника комплексной мультимодульной системы очистки	286
	Список использованных источников	297

Заключение	303
Экспериментальная методика	309
Определения, обозначения и сокращения	310

Работа выполнена при поддержке ГУ "Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан" по программе целевого финансирования ИРН BR21882241 «Исследование и разработка комплексной системы улавливания и хранения CO₂ на промышленных объектах Республики Казахстан для сокращения выбросов парниковых газов» по договору №443-ПЦФ-23-25//104-9.5_2023/2023 от 15.11.2023.

Б. Хусаин, А.Р. Бродский, А.С. Сасс

**КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ
ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОВЫХ УСТРОЙСТВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Корреспондирующий автор – Бродский А.Р. albrod@list.ru
Верстка на компьютере Хусаин А.Б.,
Корректор Нарбекова Г.К.

Подписано в печать 25.05.2025, Формат 60х84^{1/24}
Уч.-изд. л. 19,0 Бумага офсетная. Тираж 500.
Заказ 35.

Издание Казахстанско-Британского технического университета
Издательский центр КБТУ, Алматы, Толе би, 59