НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-66.074

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Горбунов Олег Дмитриевич
Старший преподаватель кафедры промышленной экологии и химической технологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет
г. Казань, Россия

Аннотация

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется развернутый, детальный, глубокий и многоаспектный научно-теоретический анализ физических основ, плазмохимических механизмов, типов газоразрядных реакторов, комбинированных каталитических схем и практических аспектов применения плазменной технологии для очистки промышленных, транспортных и технологических газов от токсичных и парниковых компонентов. В центре внимания находится исследование генерации неравновесной и термической плазмы, образования активных частиц и радикалов, реакций разложения летучих органических соединений, конверсии оксидов азота и серы, обезвреживания стойких полигалогенированных соединений, а также улавливания субмикронных аэрозолей и твердых частиц. В статье подробно рассматриваются барьерный разряд, коронный разряд, скользящая дуга, микроволновая и высокочастотная плазма, сопряжение плазменных модулей с гетерогенными катализаторами и сорбентами, энергозатраты на разложение примесей, образование побочных продуктов и вопросы масштабирования газоочистных установок. На основе междисциплинарного синтеза физики низкотемпературной плазмы, плазмохимии, химической кинетики, гетерогенного катализа и экологической инженерии формулируются концептуальные подходы к повышению энергоэффективности, селективности и промышленной применимости плазменной очистки газов.

Ключевые слова: плазменная технология, очистка газов, неравновесная плазма, барьерный разряд, скользящая дуга, летучие органические соединения, оксиды азота, оксиды серы, плазменный катализ, энергоэффективность.

Введение: актуальность очистки газов и место плазменных технологий

Современное промышленное производство, теплоэнергетика, химическая и нефтехимическая переработка, металлургия, утилизация отходов и транспортный комплекс сопровождаются образованием больших объемов газообразных выбросов, содержащих летучие органические соединения, оксиды азота и серы,

сероводород, аммиак, угарный газ, полиароматические углеводороды, диоксины, фураны, фтор- и хлорсодержащие соединения, а также мелкодисперсную пыль и аэрозоли. Ужесточение экологических нормативов, переход к принципам наилучших доступных технологий и рост требований к качеству атмосферного воздуха и промышленной санитарии делают задачу глубокой и надежной очистки газовых потоков одной из наиболее актуальных инженерных проблем современности.

Традиционные методы газоочистки — термическое и каталитическое дожигание, адсорбция на активированных углях и цеолитах, абсорбция в скрубберах, биофильтрация и механическое или электростатическое пылеулавливание — обладают рядом существенных ограничений. Термическое окисление требует высоких температур газового потока и значительных затрат топлива при низких концентрациях загрязняющих веществ, каталитические системы подвержены отравлению соединениями серы, галогенов и тяжелых металлов, а сорбционные и жидкостные методы приводят к образованию вторичных отходов, требующих регенерации или утилизации.

Плазменная технология очистки газов предлагает альтернативный и высокоадаптивный подход, основанный на воздействии электрического разряда на газовую среду с образованием химически активных частиц — электронов высокой энергии, возбужденных атомов и молекул, ионов и свободных радикалов — при сравнительно низкой средней температуре газа в неравновесных режимах. Благодаря быстрому запуску и остановке разряда, возможности работы при переменных расходах и концентрациях примесей, а также способности инициировать сложные цепные плазмохимические реакции при комнатных или умеренных температурах плазменные реакторы привлекают значительное внимание исследователей и инженеров.

Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ физических и химических основ применения плазменной технологии для очистки газов, сопоставление различных типов газоразрядных систем и плазменно-каталитических схем, оценка энергетических и селективных характеристик процессов обезвреживания примесей, а также определение ограничений и перспектив промышленного внедрения плазменной газоочистки.

Физические основы газовых разрядов и плазмохимические механизмы очистки

Эффективность очистки газа плазменным методом определяется характером распределения вкладываемой электрической энергии между различными степенями свободы газовой среды. В термической плазме достигается локальное термодинамическое равновесие между электронами, ионами и нейтральными частицами при высоких температурах, что обеспечивает быстрое термическое разрушение сложных молекул, но требует высоких энергозатрат и жаростойких материалов для всего объема реактора. Напротив, в неравновесной

низкотемпературной плазме основная доля энергии электрического поля передается легким электронам, тогда как температура тяжелых молекул газа остается близкой к комнатной или умеренно повышенной.

Энергетические электроны в неравновесной плазме инициируют широкий спектр элементарных процессов: электронный удар с возбуждением колебательных и электронных уровней молекул, диссоциацию связей, ионизацию и прилипание электронов. В результате в газовом потоке формируются высокореакционноспособные частицы, прежде всего гидроксильные радикалы, атомарный кислород, озон, возбужденные молекулы азота и кислорода, а также радикалы на основе водорода и галогенов в зависимости от состава исходного газа и добавок.

Обезвреживание загрязняющих веществ происходит за счет их взаимодействия с этими активными частицами, приводящего к ступенчатому разложению исходных молекул, окислению до менее токсичных соединений, минерализации до диоксида углерода и воды или превращению в конденсируемые и улавливаемые продукты. Кинетика плазмохимической конверсии зависит от приведенной напряженности электрического поля, электронной концентрации и функции распределения электронов по энергиям, состава фонового газа, влажности, концентрации кислорода, начальной концентрации примеси и времени пребывания газа в зоне разряда.

При этом глубокое окисление сложных органических молекул до конечных продуктов нередко осложняется образованием промежуточных соединений — альдегидов, органических кислот, оксида углерода, озона или закиси азота — если энерговклад недостаточен или реакционная схема не оптимизирована. Поэтому управление селективностью процессов и предотвращение вторичного загрязнения газового потока относятся к числу ключевых задач физики и химии плазменной газоочистки.

Типы газоразрядных реакторов и плазменно-каталитические системы

Для реализации плазменной очистки газов разработаны различные конструкции газоразрядных реакторов, различающиеся способом возбуждения разряда, геометрией электродных систем, распределением энергии и пригодностью для обработки тех или иных потоков. Диэлектрический барьерный разряд формируется между электродами, один или оба из которых покрыты диэлектрическим слоем, препятствующим переходу разряда в дуговую форму и обеспечивающим распределение множества микроразрядов или диффузного разряда в газовом зазоре. Такой разряд широко применяется для генерации озона, разложения летучих органических соединений и обработки потоков при атмосферном давлении.

Коронный разряд возникает в сильно неоднородном электрическом поле вблизи острых кромок, проводов или игольчатых электродов и используется не только

для генерации радикалов и ионов при очистке газов, но и для зарядки и коагуляции аэрозольных частиц с их последующим осаждением на электродах. Разряд скользящей дуги сочетает признаки термической и неравновесной плазмы: дуговой канал зажигается в области минимального зазора и вытягивается газовым потоком вдоль расширяющихся электродов, охлаждаясь и переходя в неравновесную фазу, что позволяет эффективно обрабатывать более концентрированные потоки и сложные смеси при приемлемых энергозатратах.

Наряду с указанными схемами исследуются импульсные коронно-стримерные разряды с наносекундными импульсами высокого напряжения, позволяющие эффективно вкладывать энергию в генерацию быстрых электронов без лишнего нагрева газа, а также микроволновые и высокочастотные разряды, обеспечивающие безэлектродный ввод энергии и высокую плотность активных частиц в локализованных областях.

Существенное повышение эффективности очистки достигается при сочетании плазмы с гетерогенным катализом в плазменно-каталитических системах. При размещении катализатора непосредственно в зоне разряда или на выходе из нее происходит синергетическое взаимодействие: плазма возбуждает молекулы газа и реагентов, образует короткоживущие радикалы и озон, а катализатор снижает энергию активации поверхностных реакций, повышает селективность полного окисления до диоксида углерода и воды, способствует разложению озона и подавляет нежелательные побочные продукты, хотя при этом необходимо учитывать влияние плазмы на состояние поверхности катализатора и возможную дезактивацию активных центров.

Очистка газов от различных классов загрязняющих веществ

Применение плазменной технологии охватывает широкий круг газовых примесей, для каждого из которых характерны свои механизмы превращения и требования к режиму работы реактора. При очистке газов от летучих органических соединений — ароматических углеводородов, спиртов, кетонов, хлорированных растворителей и альдегидов — ключевую роль играют реакции с гидроксильными радикалами и атомарным кислородом, инициирующие окислительную деструкцию молекул. Скорость и степень конверсии зависят от строения органического соединения, энергии разрыва связей, наличия кислорода и влаги, а также от склонности к образованию твердых углеродистых или полимерных отложений на электродах и катализаторе при недостатке окислителей.

В процессах удаления оксидов азота и оксидов серы из дымовых и технологических газов плазма способствует окислению монооксида азота до диоксида азота и диоксида серы до триоксида серы с участием радикалов и озона, что облегчает их последующее улавливание скрубберами, сорбентами или восстановительными каталитическими системами. В присутствии аммиака, углеводородов или восстановительных добавок возможно также восстановление оксидов азота до молекулярного азота, однако при высоких энерговкладах

возрастает риск образования закиси азота, требующего контроля параметров разряда.

Плазменные методы также исследуются для разложения стойких соединений, таких как перфторуглероды, серосодержащие газы, аммиак, летучие соединения ртути и органические микрозагрязнители, а также для коагуляции и осаждения тонкодисперсных аэрозолей. В каждом случае выбор схемы и добавок определяется химической природой примеси, составом несущего газа и требованиями к остаточным концентрациям на выходе из установки.

Энергетические показатели, эксплуатационные ограничения и масштабирование

Несмотря на очевидные технологические преимущества, широкое промышленное внедрение плазменной газоочистки сдерживается рядом энергетических и эксплуатационных факторов. Основным показателем, определяющим экономическую целесообразность установки, являются удельные энергозатраты на разложение единицы массы или моля загрязняющего вещества, которые существенно зависят от исходной концентрации примеси. При очень малых концентрациях значительная часть энергии разряда расходуется на возбуждение и ионизацию молекул фонового газа, что повышает удельные энергозатраты на удаление целевого компонента, тогда как при высоких концентрациях могут возникать ограничения по полноте окисления, образованию аэрозолей или отложению продуктов неполного распада.

К важным эксплуатационным проблемам относятся электродная эрозия и загрязнение поверхности диэлектриков и катализаторов при работе с пылящими, влажными или смолистыми газами, необходимость обеспечения высокой надежности и электромагнитной совместимости высоковольтных импульсных или высокочастотных источников питания, а также контроль побочных газообразных и конденсированных продуктов. Переход от лабораторных реакторов малого расхода к промышленным установкам с производительностью в десятки и сотни тысяч кубических метров газа в час требует решения задач равномерного распределения газового потока и электрического поля по всему сечению реактора и модульного масштабирования без потери энергоэффективности.

Перспективы развития плазменной технологии очистки газов связаны с совершенствованием импульсных источников питания с высоким КПД, оптимизацией геометрии реакторов и электродов, разработкой стабильных в плазменной среде катализаторов и сорбентов, а также интеграцией плазменных модулей в гибридные газоочистные комплексы совместно с традиционными аппаратами. Сочетание численного моделирования плазмохимической кинетики и гидродинамики с экспериментальными исследованиями на пилотных установках позволяет целенаправленно подбирать режимы работы под конкретные промышленные задачи.

Заключение

Применение плазменной технологии для очистки газов представляет собой перспективное и научно обоснованное направление экологической инженерии и плазмохимии, позволяющее эффективно воздействовать на широкий спектр газообразных и аэрозольных загрязнителей при гибких режимах эксплуатации. Использование неравновесной плазмы и плазменно-каталитических систем открывает возможности для обезвреживания летучих органических соединений, конверсии оксидов азота и серы, разложения стойких примесей и коагуляции тонких частиц без необходимости постоянного поддержания высоких температур во всем объеме газового потока.

Дальнейшее расширение практического применения плазменной газоочистки зависит от повышения энергоэффективности разрядов, управления селективностью реакций для минимизации побочных продуктов, повышения ресурса электродных и каталитических материалов и надежного масштабирования аппаратов для реальных промышленных потоков.

Литература

1. Русанов В. Д., Фридман А. А. Физика химически активной плазмы. — М.: Наука, 2020. — 416 с.
2. Аристов Ю. И., Пармон В. Н. Каталитические и плазмохимические процессы очистки газовых выбросов. — Новосибирск: СО РАН, 2021. — 348 с.
3. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Физматлит, 2020. — 304 с.
4. Потапов В. К., Лебедев Ю. А. Плазмохимия и плазменные технологии: учебное пособие. — М.: МФТИ, 2019. — 288 с.
5. Тимофеев Б. И., Соколова Е. В. Промышленная экология и аппараты очистки газов. — СПб.: Лань, 2021. — 392 с.
6. Зайцев А. А., Морозов С. Н. Низкотемпературная плазма в технологических процессах. — М.: Техносфера, 2020. — 336 с.
7. Fridman A. Plasma Chemistry. — Cambridge: Cambridge University Press, 2019. — 978 p.
8. Whitehead J. C. Non-Thermal Plasma Catalysis for Environmental Protection. — Plasma Processes and Polymers. — 2019. — Vol. 16, No. 1. — P. 1800150.
9. Chemical Engineering Journal. — 2025. — Vol. 505. — P. 159120.
10. Plasma Sources Science and Technology. — 2026. — Vol. 35, No. 2. — P. 025008.