

УДК 533.9.07:539.1.03:539.12
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4986
Шифр специальности ВАК: 01.04.23
Обзорная статья

Плазмохимическая очистка дымовых газов с использованием импульсных электронных пучков: обзор

Г.Е. Холодная[✉], Р.В. Сазонов, Д.В. Пономарев, О.П. Лаптева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]holodnaya@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В большинстве промышленно развитых стран усиливается внимание к проблеме загрязнения атмосферы выбросами топливосжигающих установок различных промышленных предприятий. Дымовые газы топливосжигающих установок характеризуются большими объемными скоростями их выброса в атмосферу и относительно малыми концентрациями содержащихся в них вредных примесей (оксидов азота и серы). В настоящее время в основном используются следующие схемы очистки дымовых газов: гомогенное (безкаталитическое) восстановление оксида азота аммиаком, каталитическое селективное восстановление с использованием аммиака, прямое поглощение оксида азота с одновременной абсорбцией SO₂, известковый и известняковый, магнезитовый и аммиачные методы. Технологические процессы, применяемые в настоящее время в металлургии, химии, энергетике, машиностроении, требуют перехода к новым решениям, направленным на повышение удельной производительности на единицу объема реакционной зоны. Повышение удельной производительности указанных выше процессов может иметь место при переходе к сверхвысоким температурам (более 5000 °С) и высоким скоростям переноса реагентов через зону взаимодействия, что можно реализовать в случае их газового транспорта с подводом энергии от внешнего источника. Указанная ситуация реализуется в плазмохимических системах. Одним из многообещающих методов в настоящее время можно рассматривать метод удаления оксидов азота и серы из отходящих газов топливосжигающих установок с помощью пучков электронов высоких энергий. **Цель.** Обзор плазмохимических методов очистки дымовых газов с использованием импульсных электронных пучков сравнительно преимуществ и недостатков существующих методов. **Результаты и выводы.** Представлены основные химические, электрофизические, каталитические и плазмохимические методы очистки дымовых газов. Особое внимание уделено методам, в которых в качестве источников плазмы используются импульсные электронные пучки. Представлены основные сведения по очистке дымовых газов с названием установок, параметров ускорителей, эффективностью очистки. Данный обзор содержит полезную информацию для специалистов, занимающихся разработкой методов очистки дымовых газов.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, плазмохимия, дымовые газы, оксиды азота, оксид серы, аммиак, неравновесный процесс

Для цитирования: Плазмохимическая очистка дымовых газов с использованием импульсных электронных пучков: обзор / Г.Е. Холодная, Р.В. Сазонов, Д.В. Пономарев, О.П. Лаптева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 145–157. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4986

UDC 533.9.07:539.1.03:539.12
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4986
Review article

Plasma-chemical purification of flue gases using pulsed electron beams: a review

G.E. Kholodnaya[✉], R.V. Sazonov, D.V. Ponomarev, O.P. Lapteva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]holodnaya@tpu.ru

Abstract. Relevance. Currently, most industrialized countries face the problem of air pollution by emissions from thermal power plants and other industrial enterprises. Flue gases from thermal power plants are characterized by high volume emission rates and rather low concentrations of harmful impurities (nitrogen and sulfur oxides). Nowadays, the following flue gas cleaning technologies are mainly used: homogeneous (catalytic-free) reduction of nitrogen oxide with ammonia, catalytic selective reduction using ammonia, direct absorption of nitrogen oxide with simultaneous absorption of SO₂, lime and limestone, magnesite and ammonia methods. Technological processes currently used in metallurgy, chemistry, power engineering, and mechanical engineering require new solutions aimed at increasing the specific productivity per unit volume of the reaction zone. An increase in the specific productivity of the above processes can occur when switching to ultra-high temperatures (over 5000°C) and high rates of reagent transfer through the interaction zone, which can be realized in the case of their gas transport with energy supply from an external source. This situation is realized in plasma-chemical systems. One of the most effective physical and chemical methods at present is the method of removing nitrogen and sulfur oxides from exhaust gases of thermal power plants using high-energy electron beams. **Aim.** Review of plasma-chemical methods of flue gas purification using pulsed electron beams, as well as identification of the advantages and disadvantages of existing methods. **Results and conclusions.** The paper presents the main chemical, electrophysical, catalytic and plasma-chemical methods of flue gas purification. Particular attention is paid to methods in which pulsed electron beams are used as plasma sources. Basic information on flue gas purification is presented with the name of the installations, accelerator parameters, and cleaning efficiency. This review contains useful information for specialists involved in developing flue gas cleaning methods.

Keywords: pulsed electron beam, plasma chemistry, flue gases, nitrogen oxides, sulfur oxide, ammonia, non-equilibrium process

For citation: Kholodnaya G.E., Sazonov R.V., Ponomarev D.V., Lapteva O.P. Plasma-chemical purification of flue gases using pulsed electron beams: a review. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 145–157. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4986

Введение

Особо острой проблемой экологии, как в России, так и за рубежом, является загрязнение атмосферного воздуха. Особенно сильно влияют на загрязнение воздуха предприятия чёрной и цветной металлургии, химии и нефтехимии, стройиндустрии, энергетики, топливной промышленности. Топливосжигающие установки загрязняют атмосферный воздух различными продуктами сгорания. Среди них: летучая зола, частицы недогоревшего пылевидного топлива, сернистый и серный ангидрид, оксиды азота и газообразные продукты неполного сгорания. Газообразные выбросы, рассеиваясь в атмосфере и претерпевая физико-химические превращения, переносятся воздушными массами на большие расстояния и повышают техногенную нагрузку на окружающую среду. Поэтому снижение токсичности дымовых газов от топливосжигающих установок представляет собой актуальную проблему [1–3].

Необходимо помнить о том, что значительный вклад в ухудшение экологической обстановки дают энергетические предприятия малой и средней мощности, что требует в свою очередь применения компактных и недорогих технологических решений для очистки газов.

В настоящее время существует значительное количество методов (сорбционный, каталитический, карбамидный, аммонийно-магnezитовый и др.) и технологий (технологии выделения сернистого ангидрида из отходящих газов), позволяющих производить очистку дымовых газов от вредных составляющих [3–7]. Эффективность этих мероприятий достаточно высока, однако существен-

ным их недостатком является высокая стоимость оборудования, а также сложность технологических процессов. Кроме того, малое распространение методов для малотоннажных технологий топливосжигания.

Достаточно успешно зарекомендовала себя технология корпорации Ebara, основанная на процессе плазмохимической конверсии дымовых газов с аммиаком. В процессе плазмохимической реакции, инициируемой непрерывным электронным пучком, образуются твердые комплексные соединения, которые удаляются посредством электростатической фильтрации [8–12]. Недостатком метода является применение линейных непрерывных ускорителей с высокой стоимостью, габаритами и затратами, связанными с обеспечением защиты персонала от ионизирующего излучения.

Для энергетических предприятий малой мощности очистка дымовых газов может быть реализована с инициацией процесса импульсным электронным пучком.

Освоенные и применяемые методы очистки дымовых газов в технологиях топливосжигания

Разработке и исследованию методов очистки дымовых газов от топливосжигающих установок посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: В.Р. Котлера, С.Е. Белика, А.Н. Тугова, П.В. Рослякова, И.Я. Сигала, А.К. Внукова, И.Н. Шмиголя, И.Л. Ионкина, А. Rigby, S. Khan, J. Javris, N. Soud и других. Образование вредных выбросов необходимо воспринимать как комплекс факторов, от которых зависит объем этих выбро-

сов. Так, например, образование NO следует рассматривать как результат совокупности нескольких механизмов, обусловленных протеканием не только реакции с образованием атомарного кислорода, но и реакций с участием промежуточных и конечных продуктов, в том числе H, CN, HCN, NH, NH₂, NH₃, CO, CO₂, H₂. Также, наряду с образованием NO, возможны реакции его восстановления [11–16].

Существует большое количество методов очистки как отдельно SO₂, NO_x, так и их комплексной очистки. В основном на крупных промышленных предприятиях используют различные типы фильтров для уменьшения выбросов в атмосферу. В настоящее время в промышленно развитых странах разрабатываются в основном три схемы очистки дымовых газов от SO₂ и NO_x.

1. Гомогенное (безкаталитическое) восстановление оксида азота аммиаком, называемое также высокотемпературным методом. В качестве газа-восстановителя используется аммиак, который действует избирательно, и поэтому его количество, необходимое для восстановления NO в дымовых газах, незначительно. Присутствие кислорода в данном процессе дает заметный положительный эффект. Процесс восстановления протекает при температуре 950 °С. При значительном снижении температуры скорости реакций падают, аммиак проходит в последующие газоходы котла. Недостатки данного метода: 1) высокие температуры процесса (900 °С и выше); 2) необходимость поддержания постоянной температуры в месте ввода аммиака, что очень сложно из-за изменений нагрузки котла; 3) необходимость перемешивания небольшого количества аммиака с дымовыми газами; 4) при охлаждении дымовых газов аммиак взаимодействует с серным ангидридом и водой, образуя бисульфат аммония, который забивает воздухоподогреватель; 5) остатки аммиака могут выбрасываться в атмосферу, что приводит к загрязнению либо воды, либо воздуха [13].
2. Каталитическое селективное восстановление с использованием аммиака. Процесс восстановления протекает при 200–400 °С, степень очистки составляет 90 %. Основной недостаток метода – это высокие капитальные затраты, связанные с тем, что в качестве катализаторов используют дорогостоящие оксид титана и оксид ванадия. Под воздействием SO₃ происходит отравление катализатора, поэтому срок его службы не превышает 1–3 года [14].
3. Прямое поглощение оксида азота с одновременной абсорбцией SO₂. Хорошим сорбентом оксидов азота служит активированный уголь, но его применение затрудняется из-за легкой окисляемости, что может привести к сильному разогре-

ву и даже к возгоранию угля (при значительных концентрациях оксидов азота) [16–21]. Силикагель по адсорбционным свойствам несколько уступает углю, но он более прочен и не окисляется кислородом, а окисление NO в NO₂ в его присутствии протекает даже быстрее [22–30]. Однако широкому распространению этих методов препятствует то, что одновременно сорбируются и другие примеси, в результате снижается адсорбционная емкость сорбентов и осложняется процесс десорбции и использование ценных компонентов.

В химических методах наиболее эффективным инструментом очистки загрязняющих веществ до уровня предельно допустимых концентраций являются каталитические реакции. Каталитический метод предпочтителен и с экономической точки зрения. Каталитические методы очистки дымовых газов используют в основном металлические и оксидные катализаторы. Высокой каталитической активностью обладают металлические катализаторы на основе металлов платиновой группы. Применение таких типов катализаторов нецелесообразно из-за их высокой стоимости. Кроме того, при использовании этих катализаторов также не исключается образование вторичных загрязняющих веществ.

Поэтому ведется поиск каталитических систем, которые должны обеспечить возможность глубокого окисления-восстановления при низких температурах. Также процесс должен быть устойчив при резких колебаниях составов, концентраций и температур, катализаторы должны быть готовы работать в режиме «ожидания» [31–36]. Традиционные высокоактивные металлические и оксидные катализаторы не способны работать в названных режимах без дополнительных затрат энергии.

Авторы работы [35] предлагают объединить две стадии очистки: фильтрацию и катализ. Можно рассмотреть две технологии очистки. Первая технология включает в себя двухступенчатые процессы очистки дымовых газов, состоящие из фильтра для очистки дымовых газов с последующим каталитическим блоком с низким содержанием пыли. Вторая технология включает селективное каталитическое восстановление с высокодисперсным каталитическим блоком с последующим фильтром. Обе технологии имеют недостатки с точки зрения технологического процесса. В первом варианте дымовой газ должен быть повторно нагрет до рабочей температуры катализатора 300 °С. Во втором варианте катализатор быстро дезактивируется путем осаждения частиц. Объединив стадии фильтрации и катализа в единый блок каталитической фильтрации, получают уменьшение капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Каталитические фильтры обеспечивают возможность комбинирования функций каталитического реактора и газоздушного фильтра в одном технологическом цикле [36–39]. Таким образом, сложность установки может быть снижена, что представляет экономический интерес для установок сжигания биомассы малого и среднего размера. Перспективным является материал SiC для каталитической активации, поскольку он обладает высокой теплопроводностью и хорошей термостойкостью. Кроме того, фильтры на основе SiC покрыты плотной мембраной из муллита (покрытие $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$), которая защищает внутренний пористый каталитический фильтрующий материал от любых ядов, образующихся в процессе очистки [38].

Низкотемпературное селективное каталитическое восстановление NO авторы работы [40] рассматривают как новый метод, требующий развития в области методов очистки дымовых газов. Проведены исследования по селективному каталитическому восстановлению NO на оксидах железа (Fe_3O_4 и $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) с аммиаком при низких и средних температурах. Авторами работы сделан вывод о том, что катализатор $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ подходит для использования в низкотемпературном селективном каталитическом восстановлении NO с аммиаком при 200–250 °C.

В работах [41, 42] авторы показывают, что активный кокс в процессе очистки дымовых газов играет важную роль адсорбента и катализатора. SO_2 адсорбируется на углеродных материалах и далее катализируется углеродной поверхностью, превращаясь в серную кислоту. Кроме того, активный кокс катализирует реакцию NO с NH_3 до N_2 и пара. Это является основой для процессов одновременного удаления SO_2 и NO_x . При добавлении аммиака происходит удаление SO_2 активным коксом. Эффективность удаления SO_2 превышает 95 %, а NO – 80 %. Стоимость процессов с использованием активного кокса с добавлением аммиака сравнима с затратами на процессы десульфурации влажного дымового газа без какого-либо дополнительного оборудования, если нет необходимости удалять NO.

В настоящее время разработаны технологии нанесения активного вещества на различные носители (оксид алюминия, силикагель, цеолиты, корунд, керамика, металлокерамика, различные металлы), что позволяет создавать катализаторы, удовлетворяющие самым различным требованиям [39–43]. Однако широкое распространение каталитических методов очистки дымовых газов сдерживают высокие капитальные затраты, связанные с тем, что в качестве катализаторов используют дорогостоящие материалы (оксид титана и оксид ванадия).

Плазмохимические методы очистки дымовых газов

Плазмохимические методы основаны на пропускании через высоковольтный разряд воздушной смеси с вредными примесями. В этих случаях чаще всего используют генераторы плазмы на основе барьерных [44], коронных [45–56] или скользящих разрядов либо импульсные высокочастотные разряды на электрофильтрах [57, 58]. Проходящий низкотемпературную плазму дымовой газ с примесями подвергается бомбардировке электронами и ионами. В результате в газовой среде образуется атомарный кислород, озон, гидроксильные группы, возбуждённые молекулы и атомы, которые и участвуют в плазмохимических реакциях с вредными примесями. В табл. 1 представлены результаты эффективности очистки дымовых газов при использовании различных типов разрядов [44–58].

Таблица 1. Генераторы плазмы на основе различных типов разрядов для очистки дымовых газов

Table 1. Plasma generators based on various types of discharges for cleaning flue gases

Тип разряда Discharge type	Эффективность очистки Treatment efficiency, %
Барьерный/Barrier	SO_2 – 90, NO_x – 85–90
Коронный/Corona	SO_2 – 99, NO_x – 85
Высокочастотный/High-frequency	SO_2 – 100, NO_x – 85

Основные направления по применению генераторов плазмы на основе различных типов разрядов идут по одновременному удалению SO_2 , NO_x и органических соединений. Также работы направлены на изучение применения аммиака при очистке. Использование аммиака при нейтрализации SO_2 и NO_x дает на выходе после реактора порошкообразные удобрения $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и NH_4NH_3 , которые фильтруются [45–57].

Кроме генераторов плазмы на основе различных типов разрядов для очистки дымовых газов используют методы, в которых применяются электронные ускорители [59–72]. Очистка дымовых газов с применением электронного пучка была впервые реализована японскими учеными в 1970–1971 гг. [70]. Исследования приводились на линейном электронном ускорителе (2–12 МэВ, 1,2 кВт). При дозе 50 кГр и 100 °C происходила конверсия SO_2 до серной кислоты, которая легко удаляется [71].

Существующие на настоящий момент исследования по очистке дымовых газов с использованием электронных пучков можно условно разделить на несколько групп. К первой группе исследований можно отнести способы очистки дымовых газов только от SO_2 [65, 67]. Ко второй группе – методы очистки только от NO_x [73]. К третьей группе ис-

следований относятся методы одновременной очистки дымовых газов от SO_2 и NO_x [66, 68, 74]. Четвертая группа – это группа теоретических исследований процессов, где особое внимание уделяется построению кинетических моделей процесса очистки [60, 61, 63].

Экономически обоснованными методами очистки будут являться методы одновременной очистки дымовых газов от SO_2 и NO_x . Эффективность их удаления в значительной степени зависит от условий проведения процесса. Требуемая мощность ускорителя пропорциональна массовому расходу дымовых газов и дозе облучения, которая необходима для эффективного удаления SO_2 и NO_x . Как правило, доза 4–5 кГр требуется для эффективного снижения SO_2 , а доза 8–12 кГр достаточна для эффективного удаления NO_x . В настоящее время в основном ускорители с энергией электронов до 800 кэВ и током пучка до 500 мА применяются в процессе очистки дымовых газов электронным пучком. Наибольшая эффективность – 95 % – получена для SO_2 ; около 70 % – для NO_x [73].

Результаты исследования методов очистки дымовых газов позволяют выявить влияние параметров электронного ускорителя на степень эффективности очистки. В работе [59] исследовано влияние параметров электронного пучка на эффективность очистки и на количество побочных продуктов (варьировались параметры в следующем диапазоне: ток электронного пучка от 0 до 20 мА и напряжение от 0 до 500 кэВ). Для SO_x была достигнута эффективность очистки 99,2 %, для NO_x – 80,9 %. Кроме измерения параметров электронного пучка в литературе встречаются работы по исследованию влияния на степень эффективности очистки многократного облучения исходной смеси [65]. Было показано, что эффективность процесса очистки дымовых газов повышается при увеличении количества импульсов облучения. В работе [68] изучали одновременную очистку дымовых газов от SO_2 и NO_x с помощью электронного ускорителя (400–800 кВ, 45 мА). При многократном облучении в течение 7 часов непрерывной работы была достигнута максимальная степень эффективности очистки SO_2 – 94 % и NO_x – 80 %.

В настоящее время в крупнейшей корпорации по производству экологической промышленной техники «Ebara» для очистки дымовых газов используют непрерывный электронный ускоритель. Ebara технологии применяются в Индианаполисе (США) и Карлсруэ (Германия). В Индианаполисе используют два ускорителя (0,8 МэВ, 160 кВт каждый). Производится очистка газов (исходные концентрации реагентов: 1000 ppm SO_2 , 400 ppm NO_x) при мощности газового потока $1,6\text{--}3,2 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$. В Карлсруэ используют два ускорителя (параметры

ускорителя: 0,3 МэВ, 180 кВт каждый). Производится очистка газов (исходные концентрации реагентов: 50–500 ppm SO_2 , 300–500 ppm NO_x) при мощности газового потока $1\text{--}2 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$ [72].

В работе [73] было показано, что для удаления оксидов серы эффективно применяется импульсный электронный пучок микросекундной длительности. В этом случае при оптимальных плотностях тока и длительности импульса электронного пучка в очищаемом газе реализуется цепной механизм окисления SO_2 . Основными реакциями, реализующими такой механизм, являются реакции с участием заряженных и возбужденных частиц. Была достигнута максимальная степень эффективности очистки SO_2 – 90 %. Затраты энергии составляли $\sim 1 \text{ эВ}/\text{моль}$.

Применение импульсных электронных пучков для удаления оксидов азота также вызывает снижение затрат энергии. Характеристики процесса удаления NO_x существенным образом зависят от параметров электронного пучка и содержания кислорода в облучаемом газе. Процесс конверсии NO_x в ионизированной азотнокислородной смеси не исчерпывается реакциями окисления. При малой концентрации кислорода наиболее вероятен процесс диссоциации оксидов азота.

В работах [69–74] процесс очистки дымовых газов осуществлялся с помощью электронного ускорителя (200–800 кВ). Условия эксперимента: концентрации $\text{NO}=272 \text{ ppm}$; $\text{SO}_2=888 \text{ ppm}$; $\text{NH}_3=1190 \text{ ppm}$; $\text{H}_2\text{O}=15,2 \text{ об. \%}$; $T=60 \text{ }^\circ\text{C}$; Доза облучения – 1,25 Мрад. При воздействии электронного ускорителя на газовую смесь образуются гидроксильные радикалы. Далее образуется сульфат аммония как окончательный продукт.

Таким образом, можно сделать заключение, что изменение параметров электронного пучка (например, плотности тока) инициирует образование оптимальной концентрации активных частиц, а изменение длительности пучка позволяет исключить протекание конкурирующих процессов. Также на процесс очистки дымовых газов от SO_2 , NO_x под действием импульсных электронных пучков существенное влияние оказывает начальная концентрация примеси и добавление аммиака в исходную смесь. Например, процесс очистки от NO_x . При этом минимальные затраты энергии на удаление одной молекулы ($E_{\min} \sim 2 \text{ эВ}$) реализуются при высоком содержании примеси.

В работах [60, 61, 63] теоретически описан процесс очистки дымовых газов от оксидов серы и азота с использованием электронных пучков. При воздействии электронного пучка на газовую смесь возбужденные молекулы подвергаются ионизации, диссоциации и присоединению электронов с образованием реактивных частиц (ионов, свободных

радикалов и электронов), которые взаимодействуют с компонентами дымовых газов. Авторами работ была построена сложная математическая модель, которая включает в себя основные химические процессы как в газовой, так и в жидкой фазах, с учетом образования капель и термодинамического равновесия между двумя фазами. В модели дымовой газ облучается в течение 12,6 с при 1 атм и 60 °С с дозой 10 кГрэй. Кинетика процесса, включающая 139 химических реакций, была собрана из данных различных источников и интегрирована в единую, основанную на принципах математики модель, состоящую из системы 70 уравнений. Было установлено, что при одних и тех же параметрах работы ускорителя удастся очистить смесь газов только от NO. В работе [63] была предложена кинетическая схема процесса. Она включает газофазную и жидкофазную деградацию молекул исходного газа с помощью радикалов OH, образованных под действием электронов на газовые компоненты.

В работе [61] описана установка «Maritza East 2» для очистки дымовых газов. Установка оборудована тремя электронными ускорителями (0,8 МэВ, общая мощность 90 кВт), газ подается в реакционную камеру со скоростью $1,0 \times 10^4$ м³/ч. Исходная концентрация дымовых газов – 5600 ppm SO₂ и 390 ppm NO_x. Эффективность очистки от SO_x составляет 90 % и 40 % для NO_x. В процессе очистки в камере образуются порошкообразные удобрения (полициклические ароматические углеводороды), которые могут быть использованы в сельскохозяйственной промышленности. Аналогичные отложения в реакционной камере получались у авторов работы [62]. Они использовали для очистки дымовых газов электронный пучок со следующими параметрами: ток электронов 20–23 мА, ускоряющее напряжение 800 кВ, энергия электронов 127,5 кВт. Авторы работы [66] приводят данные, которые показывают, что технологии с применением электронных ускорителей

для одновременного удаления SO₂ и NO_x в широком диапазоне концентраций SO₂ (250–2000 ppm) и NO_x (140–240 ppm) обладают более высокой эффективностью, чем обычные химические методы при одинаковых условиях эксперимента (доза, температура и т. д.). Также было доказано, что побочные продукты, такие как сульфат аммония и нитрат аммония, полученные в процессе очистки, представляют собой азотное удобрение отличного качества.

Таким образом, к настоящему времени исследовательская деятельность в области очистки дымовых газов направлена на оптимизацию технологии с особым учетом эффективности использования энергии и степени очистки. Основное внимание в исследованиях уделяется характеристикам процесса. Параллельно с экспериментальными исследованиями проанализированы и применены различные аналитические и теоретические подходы к описанию химической кинетики. Можно заметить, что молярное отношение NH₃, температура и влажность в дымовых газах играют важную роль в процессе очистки.

В работе [75] представлены данные о пилотных установках для очистки дымовых газов с применением электронных ускорителей, которые уже реализованы на заводах (табл. 2).

В работе [76] авторы помещают в реакционную камеру пластину из диоксида титана. Данная пластина играет роль катализатора процесса очистки. Кроме того, использовали электронные пучки со следующими параметрами: 100 кэВ, 120 А, 4,7 Дж/имп. При таком способе очистки NO в дымовых газах эффективность достигла 83 %. Кроме того, в литературе встречаются работы, где используют электронные ускорители и коронный разряд [77]. Эффективность очистки SO₂ выше 97 %, NO_x – выше 88 % при дозах облучения 10 кГр и SO₂ – выше 92 %, NO_x – выше 75 % при дозах 5 кГр.

Таблица 2. Данные о пилотных установках для очистки дымовых газов с применением электронных ускорителей [75]

Table 2. Data on pilot flue gas cleaning facilities using electron accelerators [75]

Год Year	Объект/Object	Скорость потока газа, м ³ /ч Gas flow rate, m ³ /h	Доза облучения, Мрад Radiation dose, MRad	Побочный продукт By-product
1970	Реактор периодического действия «JAERI», Япония JAERI periodic reactor, Japan	–	–	H ₂ SO ₄ , HNO ₃
1970–1974	Проточный реактор «JAERI», Япония JAERI flow reactor, Japan	60	2,6–3,4	H ₂ SO ₄ , HNO ₃
1977–1978	Пилотный проект Nippon Steel Corp., Япония Nippon Steel Corp. pilot project, Japan	10	1,0–1,5	твердые частицы (NH ₄) ₂ SO ₄ , 2NH ₄ , NO ₃ , (NH ₄) ₂ SO ₄ , 2NH ₄ , NO ₃ solid particles
1985	Установка DPU EBARA/ABKO, США DPU EBARA/ABKO Installation, USA	30	1,5	твердые частицы solid particles
1985	Пилотный проект Карлсруэ, ФРГ Karlsruhe pilot project, Germany	5	1,0–2,0	твердые частицы solid particles

В течение 2009–2024 гг. коллективом Научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Томского политехнического университета проведены комплексные исследования процесса генерации, транспортировки и применения (синтез наноразмерных частиц, очистка дымовых газов) импульсного электронного пучка гигаваттной мощности [78–84]. Инициация плазмохимических процессов импульсным электронным пучком – один из активно развивающихся методов активации химических процессов. Использование импульсных электронных пучков обеспечивает формирование плазмы с высокой степенью неравновесности ионной и электронной температур, что приводит к ряду преимущественных особенностей такого метода при использовании в различных промышленных процессах. Перевод промышленных процессов на новый уровень энерго- и ресурсоэффективности – современный тренд, имеющий научную и экономическую обоснованность. Сокращение непроизводительных потерь энергии на нагрев узлов, агрегатов, связующих веществ за счет совмещения реакционного и плазменного объемов приведёт к более высокой продуктивности и экономической эффективности производства. Использование неравновесных, быстропотекающих реакций в плазме позволяет значительно повысить скорости химических процессов, а значит, и снизить издержки.

На базе импульсного электронного ускорителя ТЭУ-500 (ТПУ, г. Томск, Россия) были проведены исследования процесса очистки дымовых газов от NO и NO₂. Параметры электронного ускорителя: энергия электронов 400–450 кэВ, длительность импульса на полувысоте 60 нс, энергия в импульсе до 110 Дж. Основная часть экспериментов выполнена с использованием реакционной камеры, которая представляла собой кварцевую трубу, диаметром 140 мм, объёмом 4 л. Реакционная камера была оснащена манометром, датчиком давления, запорно-регулирующей арматурой напуска исходной реакгентной смеси и откачки газа. Реакционную камеру перед напуском смеси газов откачивали до давления ~1–5 торр. Электронный пучок инжестировался с торца в камеру.

Реакционная камера наполнялась моделирующим газом следующего состава: N₂ от 80 до 86 %, CO₂ –14 %, O₂ от 0 до 6 %. Контроль концентрации NO и NO₂ в диапазоне от 0 до 500 ppm осуществлялся с помощью газоанализатора марки TESTO, модель T340. В указанном диапазоне измерений погрешность определения концентрации NO составляла ±7,5 ppm, а NO₂ ±9 ppm. Одновременное измерение концентраций моно- и диоксида азота в такой структуре стенда невозможно. Суммарное давление в реакторе составляло 760 торр.

Была проведена серия экспериментов по оценке эффективности удаления NO_x в зависимости от содержания кислорода и аммиака в исходной смеси реагентов. Первоначально были выполнены работы по оценке убыли NO₂ в газе, моделирующем дымовой газ, без добавления паров воды при различных концентрациях кислорода в диапазоне 0–6 %. При увеличении количества импульсов от 1–10 и отсутствии кислорода в исследуемой исходной смеси (500 ppm) происходит незначительное уменьшение концентрации NO₂ до 420±9 ppm. При добавлении кислорода в исходную смесь даже при однократном воздействии зафиксировано значительно уменьшение концентрации NO₂.

С увеличением количества импульсов не наблюдалось убыли концентрации NO₂. Сравнивая значения концентрации NO₂, зарегистрированного при 2-х кратном (94±5 ppm) и при 10-ти кратном (96±5 ppm) воздействии электронного пучка, для случая, когда добавляется 6 % кислорода в исходную смесь, можно сделать заключение, что они одинаковы в пределах ошибки эксперимента. Аналогично и при добавлении 3 % кислорода. В данном случае можно предположить, что увеличивать количество воздействий на смесь нецелесообразно и экономически невыгодно. Эффективное удаление NO₂ наблюдается, когда добавляется 6 % кислорода в исходную смесь.

Кроме того, были проведены исследования влияния концентрации аммиака на эффективность удаления оксида азота. В исследуемом диапазоне концентраций аммиака степень эффективности удаления NO₂ минимальна, при этом увеличение количества импульсов не влияет на процесс. Добавление аммиака широко используется в селективном каталитическом восстановлении. Процесс основан на способности аммиака к избирательному восстановлению оксидов азота в присутствии катализатора при 200–500 °С. Возможно, процесс удаления диоксида азота был бы эффективнее при использовании катализатора. Концентрация аммиака отслеживалась с помощью газоанализатора. Рабочий диапазон измерений концентраций аммиака составлял 290–2900 ppm. Фиксирование значения концентрации вблизи нижней границы измерений осуществлялось со значительной погрешностью. Достоверные результаты могли быть достигнуты при концентрации 480 ppm. Этот факт ограничил возможность оценки влияния содержания аммиака на эффективность удаления диоксида азота при исходной концентрации аммиака в смеси ниже 500 ppm. Однако при воздействии электронного пучка на смесь дымовых газов при различных концентрациях паров воды (от 0 до 12 % об.) зафиксировано максимальное значение эффективности очистки NO – 55 % при концентрации паров воды

12 % об. При концентрациях паров воды 3 и 9 % также наблюдается убыль концентрации NO (для однократного воздействия она составила 35 и 43 %, соответственно). Максимальное уменьшение концентрации NO происходит после однократного воздействия электронного пучка на смесь газов.

На основании данных из открытых источников подготовлена табл. 3, в которой отображены основные сведения по очистке дымовых газов с использованием электронных ускорителей.

Несмотря на существующие результаты исследований по использованию электронных пучков для очистки дымовых газов, остается ещё ряд вопросов:

1) В настоящее время механизм конверсии SO₂ и NO_x, разработанный для условий стационарной ионизации газа и основанный на реакциях с уча-

стием свободных радикалов, не описывает экспериментальных результатов, полученных с использованием импульсных электронных пучков. Для объяснения полученных результатов необходимо создание адекватной нестационарной модели, учитывающей, с одной стороны, плазмохимические процессы между нейтральными, заряженными и возбужденными частицами, а с другой – реакции свободных радикалов.

2) На настоящий момент необходимы исследования по увеличению эффективности и надежности ускорителя, а именно разработка выводных окон в ускорителях [77].

3) Уменьшение металлических загрязнений (таких как ртуть) в конечном продукте. В данном направлении появляется всё больше и больше исследований и новых результатов [74–84].

Таблица 3. Основные сведения по очистке дымовых газов с использованием электронных ускорителей

Table 3. Basic information on flue gas cleaning using electron accelerators

Название установки Installation name	Место нахождения Location	Максимальная скорость потока, м ³ /ч Maximum flow speed, m ³ /h	Параметры ускорителя, кэВ Parameters of accelerator, keV	Исходная концентрация Starting concen- tration, ppm	Эффективность очистки Efficiency, %	Лет работы Years of work
JAERI	Такасаки, Япония Takasaki, Japan	1	1500–2500	–	SO ₂ – 100, NO _x – 85–90	1970
Ebara	Япония/Japan	10000	750	200 SO ₂ /180 NO _x	SO ₂ – 95, NO _x – 80	1977–1978
Исследовательский центр Карлсруэ Karlsruhe Research Center	Карлсруэ, Германия Karlsruhe, Germany	300 1200	300 550	300 SO ₂ /300 NO _x 3000 SO ₂ /500 NO _x	SO ₂ – 90, NO _x – 80	1985–1995
Институт тепловых турбомашин Institute of Thermal Turbines	Карлсруэ, Германия Karlsruhe, Germany	1000	200	50 SO ₂ /500 NO _x	SO ₂ – 90, NO _x – 90	1985–1991
Исследовательский центр Карлсруэ Karlsruhe Research Center	Карлсруэ, Германия Karlsruhe, Germany	1000	200	VOC/dioxins	SO ₂ – 90, NO _x – 80	1994
JAERI/NKK	Мацүдо, Япония Matsu Do, Japan	1000	900	100 SO ₂ /100 NO _x /1000 HCl	SO ₂ – 90, NO _x – 80	1992
Ebara	Индианаполис, США Indianapolis, USA	24000	800	1000 SO ₂ /400 NO _x	SO ₂ – 80, NO _x – 60	1984–1988
Badenwerk	Карлсруэ, Германия Karlsruhe, Germany	20000	300	50 SO ₂ /500 NO _x 300 SO ₂ /500 NO _x	SO ₂ – 85, NO _x – 60	1985–1989
Электростанция Кавецин, Институт ядерной химии и технологии Cavetin Power Plant, Institute of Nuclear Chemistry and Technology	Варшава, Польша Warsaw, Poland	20000	700	250 SO ₂ /200 NO _x	SO ₂ – 80, NO _x – 60	1990
Ebara Corp./EPA	Токио, Япония Tokyo, Japan	50000	500	0–5 NO _x	SO ₂ – 90, NO _x – 80	1992
Ebara/JAERI	Тюбу, Япония Tsu Bu, Japan	12 000	800	800–1000 SO ₂ /150–300 NO _x	SO ₂ – 99, NO _x – 81	1992
Ebara Corp.	Нагоя, Япония Nagoya, Japan	620000	–		SO ₂ – 80, NO _x – 60	1999
Ebara Corp.	Чэнду, Китай Chengdu, China	300000	800	2000 SO ₂ /400 NO _x	SO ₂ – 80, NO _x – 60	1997
Международное агентство по атомной энергии, электростанция Поморзаны International Atomic Energy Agency, Pomorzany Power Station	Поморзан, Польша Pomorzany, Poland	270000	800	450 SO ₂ /300 NO _x	SO ₂ – 80–90, NO _x – 50–60	2000
Maritza East 2	Бухарест, Румыния Bucharest, Romania	10000	800	5600 SO ₂ /390 NO _x	SO ₂ – 90, NO _x – 40	2013

Заключение

Загрязненный атмосферный воздух является одним из основных факторов антропогенного воздействия на окружающую среду. Несмотря на реализацию различных воздухоохраных программ, его современное состояние, как в России, так и за рубежом, остается неудовлетворительным, что, в первую очередь, обусловлено растущими выбросами от промышленных объектов и автомобильного транспорта. В результате роста в атмосферном воздухе содержания загрязняющих веществ интенсивно развивается процесс разрушения озонового экрана Земли, наблюдается выпадение кислотных дождей, что наносит урон всему живому, снижается плодородие земель, отравляется вода, происходит обезлесение земной поверхности.

Наиболее распространенные в промышленной практике методы очистки дымовых газов топливосжигающих установок – известковый и магнезитовый – требуют больших материальных затрат, связанных с большим расходом реагентов, кроме того, трудности с их регенерацией создают проблемы утилизации значительных объемов малокондиционного гипса. К тому же использование любого способа снижения вредных выбросов на действующем теплогенерирующем оборудовании топливосжигающих установок непосредственно связано с проявлением негативного воздействия подобных технологий на уровень надежности этого оборудования.

Практическое применение на топливосжигающих установках какого-либо способа сопряжено с серьезными трудностями, связанными с отсутствием методик, позволяющих производить технико-экономическое обоснование расхода и вида применяемых реагентов, а также оценку с позиций энергетической эффективности и технологической безопасности с точки зрения надежности.

На данный момент все виды очистки можно разделить на две большие группы: химические (за счёт химических реакций или катализаторов) и физические (использование фильтров или электронных ускорителей) [34–38]. Серьёзным недостатком химических методов очистки является необходимость восстановления оксидов металлов. Одним из физических методов очистки дымовых газов является использование холодной плазмы [39], способной очищать дым не только от оксидов серы и азота, но и от ртути. К данным методам можно отнести очистку дыма электронными пучками. Механизм работы данного метода заключается в протекании двух процессов:

- 1) первичный процесс сопровождается столкновениями между высокоэнергичными электронами и молекулами дымового газа. Результатом является образование первичных свободных радикалов.
- 2) вторичный процесс сопровождается генерацией вторичных свободных радикалов, первичных при рекомбинации, после чего первичные и вторичные свободные радикалы участвуют в реакциях, которые позволяют выделить загрязнители из состава дыма.

Электрофизические методы очистки отходящих газов, основанные на использовании неравновесной плазмы, создаваемой разнообразными газовыми разрядами и электронными пучками, имеют давнюю историю, начавшуюся примерно с 80-х гг. прошлого столетия. За это время выяснено много физических, химических, технических, экологических и экономических вопросов, относящихся к этим методам. Плазмохимическая очистка дымовых газов с использованием импульсных электронных пучков, наряду с методом, использующим импульсную корону, до сих пор остается среди электрофизических методов очистки, на которые возлагаются определённые надежды. Предлагаемый метод очистки дымовых газов основан на плазмохимических цепных реакциях, инициируемых импульсным электронным пучком. Энергия электронов передается компонентам газовой смеси. Часть электронов пучка при взаимодействии с газовой средой порождают вторичные электроны, которые играют важную роль в общем переносе энергии, образуется плазма. В результате взаимодействия электронов с веществом образуются различные ионы, радикалы и иные активные частицы N^{2+} , N^+ , O_2^+ , O^+ , H_2O^+ , OH^+ , H^+ , CO_2^+ , CO^+ , N_2^+ , O_2^+ , N , O , H , OH и CO . В случае высокой концентрации паров воды, окислительные радикалы $\bullet OH$, $HO_2\bullet$ принимают участие в различных химических реакциях, в том числе в реакциях комплексообразования загрязняющих химических веществ с образованием сложных комплексных соединений, обладающих кристаллической структурой при нормальных условиях, благодаря чему они могут быть отфильтрованы. Преимущество метода: низкие удельные энергозатраты; потенциально низкая себестоимость (отказ от использования дорогостоящих катализаторов); универсальность технологии и оборудования для очистки SO_2 , NO_x ; в результате процесса очистки дымовых газов электронным пучком удаляется двуокись серы и окись азота и получается дополнительный побочный продукт, из которого можно изготавливать сельскохозяйственные удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Bertone M., Stabile L., Buonanno G. An overview of waste-to-energy incineration integrated with carbon capture utilization or storage retrofit application. *Sustainability*, 2024, vol. 16, 4117. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104117>.
2. Zewdie D.T., Bizualem Y.D., Nurie A.G. A review on removal CO_2 , SO_2 , and H_2S from flue gases using zeolite based adsorbents. *Discover Applied Sciences*, 2024, vol. 6, 331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05989-w>.

3. Liu Q., Li X., Wang K. Dynamic modeling of flue gas desulfurization process via bivariate EMD-based temporal convolutional network. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, 7370. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137370>.
4. Zhu C., Ru J., Gao S., Changming Li. The simultaneous removal of NO_x and SO₂ from flue gas by direct injection of sorbents in furnace of waste incinerator. *Fuel*, 2023, vol. 333, 126464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126464>.
5. Li C., Huangfu L., Li J., Gao S., Xu G., Yu J. Recent advances in catalytic filters for integrated removal of dust and NO_x from flue gas: fundamentals and applications. *Resources Chemicals and Materials*, 2022, vol. 1, pp. 275–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.recm.2022.06.002>.
6. Khabra A., Pinhasi G., Zidki T. NO_x and SO_x flue gas treatment system based on sulfur-enriched organic oil in water emulsion. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 2570–2575. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04485>.
7. Oliveira D., Lora E., Venturini O., Maya D., Garcia-Pérez M. Gas cleaning systems for integrating biomass gasification with Fischer–Tropsch synthesis – a review of impurity removal processes and their sequences. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 172, 113047 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113047>.
8. Park J., Ahn J., Kim K., Son Y. Historic and futuristic review of electron beam technology for the treatment of SO₂ and NO_x in flue gas. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 355, pp. 351–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.103>.
9. Zwolińska E., Sun Y., Chmielewski A., Pawelec A., Bułka S. Removal of high concentrations of NO_x and SO₂ from diesel off-gases using a hybrid electron beam technology. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 952–964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.008>.
10. Chmielewski A.G., Licki J., Pawelec A., Tymiński B., Zimek Z. Operational experience of the industrial plant for electron beam flue gas treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, 2024, vol. 71, pp. 439–442. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.03.020>.
11. Shi F., Li K., Li J., Ying D., Jia J., Sun T., Yan N., Zhang X. 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, vol. 421, 129945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129945>.
12. Horvat B., Knez N., Hribar U., Koenig J., Mušič B. Thermal insulation and flammability of composite waste polyurethane foam encapsulated in geopolymer for sustainable building envelope. *Journal of cleaner production*, 2024, vol. 446, pp. 1–25. DOI: <https://dirros.openscience.si/IzpisGradiva.php?lang=eng&id=18307>.
13. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. A Study of the absorption of nitrogen oxides from the boiler flue gases. *Environment Conservation*, 2018, vol. 65, pp. 575–579. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601518080049>.
14. Papangelakis P., Miao R.K., Lu R. Improving the SO₂ tolerance of CO₂ reduction electrocatalysts using a polymer/catalyst/ionomer heterojunction design. *Nature Energy*, 2024, vol. 9, pp. 1011–1020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01577-9>.
15. Hao R., Zhang Y., Wang Z., Li Y., Yuan B., Mao X., Zhao Y. An advanced wet method for simultaneous removal of SO₂ and NO from coal-fired flue gas by utilizing a complex absorbent. *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 307, pp. 562–571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.103>.
16. Lestinsky P., Jecha D., Brummer V. Wet flue gas desulphurization using a new O-element design. *Clean Techn Environ Policy*, 2017, vol. 19, pp. 417–426. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1227-7>.
17. Su X., Zhang L., Xiao Y., Sun M., Gao X., Su J. Evaluation of a flue gas cleaning system of a circulating fluidized bed incineration power plant by the analysis of pollutant emissions. *Powder Technology*, 2015, vol. 286, pp. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.038>.
18. Zheng B., Li X., Chu H., Jia C., Xu W., Yang L., Wang P., Wang X., Yang L., Zhang X., Li C. Improvement of the flue gas cleaning system in radioactive waste incineration facilities. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings*, 2013, vol. 5, 20132013. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE21-15773>.
19. Zhang Y., Xie H.W. The present situation of combined SO₂/NO_x/NO_x removal technology from flue gas. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 955–959, pp. 2366–2369. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.955-959.2366>.
20. Xie H., Zhang Y. Research on flue gas cleaning of waste incineration by rotating spray drying. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 518–523, pp. 3455–3458. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.3455>.
21. Krzyzyska R., Hutson N.D. The importance of the location of sodium chlorite application in a multipollutant flue gas cleaning system. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2012, vol. 62, pp. 707–716. DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.668158>.
22. Thomassen P., Kunov-Kruse A.J., Mossin S., Kolding H., Kegnæs S., Riisager A., Fehrmann R. Separation of flue gas components by SILP (supported ionic liquid-phase) absorbers. *ECS Transactions*, 2012, vol. 50, pp. 433–442. DOI: <https://doi.org/10.1149/05011.0433ecst>.
23. Gómez A., Fueyo N., Tomás A. Detailed modelling of a flue-gas desulfurisation plant. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, vol. 31, pp. 1419–1431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.12.004>.
24. Siddiqi M.A., Petersen J., Lucas K. Influence of nitrogen monoxide on the complex phase and chemical equilibria in wet flue gas cleaning processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, vol. 42, pp. 1406–1413. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie020739c>.
25. Kim H.H., Yamamoto I., Takashima K., Katsura S., Mizuno A. Incinerator flue gas cleaning using wet-type electrostatic precipitator. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2000, vol. 33, pp. 669–674. DOI: <https://doi.org/10.1252/jcej.33.669>.
26. Novoselov S.S., Gavrilov A.F., Svetlichnyi V.A. The ozone method of removing SO₂ and NO_(x) from the flue gases of thermal power stations. *Thermal Engineering*, 1986, vol. 33, pp. 496–498. DOI: <https://goo.su/pCzQYhG>.
27. Zhao Z., Zhang Y., Gao W., Baleta J., Liu C., Li W., Gao X. Simulation of SO₂ absorption and performance enhancement of wet flue gas desulfurization system. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 150, pp. 453–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.032>.
28. Guimerà X., Mora M., Dorado A., Bonsfills A., Gabriel D., Gamisans X. Optimization of SO₂ and NO_x sequential wet absorption in a two-stage bioscrubber for elemental sulphur valorisation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 24605–24617. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09607-1>.

29. Chen R., Zhang T., Guo Y., Wang J., Wei J., Yu Q. Recent advances in simultaneous removal of SO₂ and NO_x from exhaust gases: removal process, mechanism and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 420, 127588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127588>.
30. He B., Zheng X., Wen Y., Tong H., Chen M., Chen C. Temperature impact on SO₂ removal efficiency by ammonia gas scrubbing. *Energy Conversion and Management*, 2003, vol. 44, pp. 2175–2188. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00230-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00230-3).
31. Yang N., Yu J.-L., Dou J.-X., Tahmasebi A., Song H., Moghtaderi B., Lucas J., Wall T. The effects of oxygen and metal oxide catalysts on the reduction reaction of NO with lignite char during combustion flue gas cleaning. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 102–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.010>.
32. Qingya Liu, Zhenyu Liu, Zhanggen Huang, Guoyong Xie. A honeycomb catalyst for simultaneous NO and SO₂ removal from flue gas: preparation and evaluation. *Catalysis Today*, 2004, vol. 93–95, pp. 833–837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.06.081>.
33. Liu Q., Liu Z. Carbon supported vanadia for multi-pollutants removal from flue gas. *Fuel*, 2013, vol. 108, pp. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.015>.
34. Gálvez M.E., Boyano A., Moliner R., Lázaro M.J. Low-cost carbon-based briquettes for the reduction of NO emissions: optimal preparation procedure and influence in operating conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, vol. 88, pp. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.02.010>.
35. Salinger M., Heidenreich S., Ken M.N. New generation technology – hot gas filters for simultaneous removal of particulate matter, SO_x and NO_x in the steel industry. *SEAISI Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute)*, 2011, vol. 40, pp. 61–65. DOI: <https://goo.su/cbpES>.
36. Hackel M., Schaub G., Nacken M., Heidenreich S. Kinetics of reduction and oxidation reactions for application in catalytic gas-particle-filters. *Powder Technology*, 2008, vol. 180, pp. 239–244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.03.045>.
37. Zürcher S., Hackel M., Schaub G. Kinetics of selective catalytic NO_x reduction in a novel gas-particle filter reactor (catalytic filter element and sponge insert). *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, vol. 47, pp. 1435–1442. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie071091c>.
38. Stoll M., Furrer J., Seifert H., Schaub G., Unruh D. Effects of flue gas composition on the catalytic destruction of chlorinated aromatic compounds with a V-oxide catalyst. *Waste Management*, 2001, vol. 21, pp. 457–463. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00129-X).
39. Rasmussen S.B., Huang J., Riisager A., Hamma H., Rogez J., Winnick J., Wasserscheid P., Fehrmann R. Flue gas cleaning with alternative processes and reaction media. *ECS Transactions, 15th International Symposium on Molten Salts – 210th ECS Meeting*. Cancun, Mexico, 29 October – 03 November 2006. Vol. 3, pp. 49–59, 72280. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2798646>.
40. Yao G.-H., Zhang Q., Qin Y., Wang F., Lu F., Gui K.-T. Experimental studies on low-temperature selective catalytic reduction of NO on magnetic iron-based catalysts. *Huanjing Kexue/Environmental Science*, 2009, vol. 30, pp. 2852–2857. DOI: <https://goo.su/rSPo7>.
41. Knoblauch K., Richter E., Jüntgen H. Application of active coke in processes of SO₂- and NO_x-removal from flue gases. *Fuel*, 1981, vol. 60, pp. 832–838. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(81\)90146-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(81)90146-0).
42. Ma S., Zhao Y., Yang J., Zhang S., Zhang J., Zheng C. Research progress of pollutants removal from coal-fired flue gas using non-thermal plasma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp. 791–810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.066>.
43. Shikada T., Oba T., Fujimoto K., Tomlnaga H. Cleaning of flue gas by use of molten salts. 1. Simultaneous Reduction of SO_x and NO_x with V₂O₅ catalyst. *Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development*, 1984, vol. 23, pp. 417–421. DOI: <https://doi.org/10.1021/i300015a017>.
44. Sun B.-M., Yin S.-E. The characteristics of NO reduction in the reactor with dielectric barrier discharge. *Proceedings of the ASME 3rd International Conference on Energy Sustainability*, 2009. ES2009, vol. 1, pp. 639–645. DOI: <https://doi.org/10.1115/ES2009-90010>.
45. Dong L., Han Z., Zhang X., Yang J. Flue gas cleaning using a wet-type plasma reactor. *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2007, pp. 814–817. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284302>.
46. Hartmann W., Hammer T., Kishimoto T., Römheld M., Safitri A. Ozone generation in a wire-plate pulsed corona plasma reactor. *Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference*, 2007. pp. 856–859. DOI: <https://doi.org/10.1109/PPC.2005.300427>.
47. Dong L.-M., Yang J.-X., Chi X.-C. Effect of water on flue gas cleaning and the discharge characteristics. *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2004. pp. 253–256. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2004.1380549>.
48. Xiaodong S., Lingang W., Shuai Z., Qinfeng S., Beili S., Licheng Z. Qing Y., Keji Q. The application of corona discharge plasma technology in flue gas desulfurization and denitrification of cremator. *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Wuhan, China, 2021. pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CIEEC50170.2021.9510399>.
49. Khuntia S., Sinha M., Dalal P., Singh A. Effective flue gas desulfurization and denitrification using a one-step combined ozone and UV technique. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 398, 136583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136583>.
50. Kreft D., Marszałkowski K., Szczodrowski K. Nitrogen oxides removal from hydrogen flue gas using corona discharge in marine boilers: application perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 78, pp. 984–990. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.385>.
51. Shao L., Wang Y., Zhou C., Yang Z., Gao W., Wu Z., Li L., Yang Yo., Yang Ya., Zheng C., Gao X. Co-benefits of pollutant removal, water, and heat recovery from flue gas through phase transition enhanced by corona discharge. *Environmental Science & Technology*, 2022, vol. 56, pp. 8844–8853. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00910>.

52. Mok Young Sun, Kim Kyung Tae. Demonstration of flue gas cleaning by positive pulsed corona discharge process. *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1999. Vol. 1, pp. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1999.799919>.
53. Patiño D., Franco-Sardinha A., Deive F., Porteiro J. Outlook of corona discharge as DeNO_x technology. *Energy & Fuels*, 2024, vol. 38, pp. 20141–20154. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03495>.
54. Chang J.-S., Looy P.C., Nagai K., Yoshioka T., Aoki S., Maezawa A. Preliminary pilot plant tests of a corona discharge-electron beam hybrid combustion flue gas cleaning system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, pp. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.485824>.
55. Van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Bityurin V.A. Energy efficiency of NO removal by pulsed corona discharges. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1996, vol. 16, pp. 227–247. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01570180>.
56. Shimizu K., Kinoshita K., Yanagihara K., Rajanikanth B.S., Katsura S., Mizuno A. Pulsed plasma treatment of polluted gas using wet/low temperature corona reactors. *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1995, vol. 2, pp. 1432–1439. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.633822>.
57. Mizuno Akira, Yamazaki Yoshifumi, Obama Sadami, Suzuki Eiki, Okazaki Ken. Effect of voltage waveform on partial discharge in ferroelectric pellet layer for gas cleaning. *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1990, pp. 815–821. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1990.152152>.
58. Van Veldhuizen E.M., Zhou L.M., Rutgers W.R. Combined effects of pulsed discharge removal of NO, SO₂, and NH₃ from flue gas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1998, vol. 18, pp. 91–111. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021793327507>.
59. Tan E., Ünal S., Doğan A., Letournel E., Pellizzari F. New "wet type" electron beam flue gas treatment pilot plant. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, vol. 119, pp. 109–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.10.007>.
60. Gogulancea V., Lavric V. Flue gas cleaning by high energy electron beam – modeling and sensitivity analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 70, pp. 1253–1261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.046>.
61. Gogulancea V., Lavric V. Flue gas cleaning by high energy electron beam – enhancement effects due to water droplets generation. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, vol. 35, pp. 697–702. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1335116>.
62. Korenev S., Johnson R. Electron accelerators for cleaning flue gases and for oil liquefaction. *EPAC 2008 – Contributions to the Proceedings*, 2008, pp. 1848–1850. DOI: <https://goo.su/ezMUs>.
63. Gerasimov G.Y. Degradation of dioxins in electron-beam gas cleaning of sulfur and nitrogen oxides. *High Energy Chemistry*, 2001, vol. 35, pp. 389–393. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1012578507696>.
64. Paur H.-R., Baumann W., Mätzing H., Jay K. Electron beam induced decomposition of chlorinated aromatic compounds in waste incinerator offgas. *Radiation Physics and Chemistry*, 1998, vol. 52, pp. 355–359. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(98\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(98)00033-4).
65. Paur H.-R., Baumann W., Mätzing H., Lindner W. Flue gas cleaning by multiple irradiation with electron beam. *Radiation Physics and Chemistry*, 1995, vol. 46, pp. 1119–1122. DOI: [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(95\)00335-U](https://doi.org/10.1016/0969-806X(95)00335-U).
66. Namba H., Tokunaga O., Hashimoto S., Tanaka T., Ogura Y., Doi Y., Aoki S., Izutsu M. Pilot-scale test for electron beam purification of flue gas from coal-combustion boiler. *Radiation Physics and Chemistry*, 1995, vol. 46, pp. 1103–1106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.002>.
67. Mätzing H., Namba H., Tokunaga O. Kinetics of SO₂ removal from flue gas by electron beam technique. *Radiation Physics and Chemistry*, 1993, vol. 42, pp. 673–677. DOI: [https://doi.org/doi:10.1016/0969-806x\(93\)90350-4](https://doi.org/doi:10.1016/0969-806x(93)90350-4).
68. Namba H., Tokunaga O., Tanaka T., Ogura Y., Aoki S., Suzuki R. The study of electron beam flue gas treatment for coal-fired thermal plant in Japan. *Radiation Physics and Chemistry*, 1993, vol. 42, pp. 669–672. DOI: [https://doi.org/doi:10.1016/0969-806x\(93\)90349-y](https://doi.org/doi:10.1016/0969-806x(93)90349-y).
69. Jordan S. On the state of the art of flue gas cleaning by irradiation with fast electrons. *Radiation Physics and Chemistry*, 1990, vol. 35, pp. 409–415. DOI: [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(90\)90130-A](https://doi.org/10.1016/1359-0197(90)90130-A).
70. Machi S., Radiation technology for environmental conservation. *Radiation Physics and Chemistry*, 1983, vol. 22, pp. 90–97. DOI: [https://doi.org/10.1016/0146-5724\(83\)90196-6](https://doi.org/10.1016/0146-5724(83)90196-6).
71. Chmielewski A.G., Licki J., Pawelec A., Tyminski B., Zimek, Z. Operational experience of the industrial plant for electron beam flue gas treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, 2004, vol. 71, pp. 439–442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.03.020>.
72. Hirota K., Hakoda T., Taguchi M., Takigami M., Kim H., Kojima T. Application of electron beam for the reduction of PCDD/F emission from municipal solid waste incinerators. *Environmental Science and Technology*, 2003, vol. 37, pp. 3164–3170. DOI: <https://doi.org/10.1021/es021076t>.
73. Oh Yong-Hwan, Jo Sang-Hee, Son Jieun, Kim Tak-Hyun, Kim Tae-Hun, Son Y. Efficient NO_x and SO₂ removal using NaOH additive in electron beam flue gas treatment process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, vol. 13, 115650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115650>.
74. Novoselov Y.N., Denisov G.V., Tkachenko R.M. Nitrogen oxide conversion in nitrogen-oxygen mixtures excited by a microsecond electron beam. *Technical Physics*, 2002, vol. 47, pp. 255–259. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1451977>.
75. Nakagawa Y., Mannami A., Natsuno H., Nishikata S. NO_x removal by pulsed high current electron beam in combination with photocatalyst. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 41, pp. 1602–1607. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.41.1602>.
76. Kikuchi R., Pelovski Y. Low-dose irradiation by electron beam for the treatment of high-SO_x flue gas on a semi-pilot scale- Consideration of by-product quality and approach to clean technology. *Process safety and environmental protection*, 2009, vol. 8 pp. 135–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2008.10.003>.
77. Platzer K.-H., Willibald U., Gottstein J., Tremmel A., Angele H.-J., Zellner K. Flue gas cleaning by the electron-beam-process (II): Recent activities at the RDK-7 pilot plant, Karlsruhe. *Radiation Physics and Chemistry*, 1990, vol. 35, pp. 427–431. DOI: [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(90\)90133-3](https://doi.org/10.1016/1359-0197(90)90133-3).
78. Shin J.K., Jo S.-H., Kim, T.-H., Oh Y.-H., Seungho Yu., Son Y.-S., Kim T.-H. Removal of NO_x using electron beam process with NaOH spraying. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, pp. 486–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.06.033>.

79. Xing P., Ma B., Wang C., Chen Y. Cleaning of lead smelting flue gas scrubber sludge and recovery of lead, selenium and mercury by the hydrometallurgical route. *Environmental Technology*, 2017, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1332102>.
80. Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S., De Marco A., Paoletti E., Calatayud V. Trends in urban air pollution over the last two decades: a global perspective. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 858, 160064. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9852-1>.
81. Li H., Huang J., Yang J., Yang Z., Qu W., Xu Z., Shih K. Reduction of oxidized mercury over NO_x selective catalytic reduction catalysts: a review. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 421, 127745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127745>.
82. Svoboda K., Hartman M., Šyc M., Pohofelý M., Kameníková P., Jeremiáš M., Durda T. Possibilities of mercury removal in the dry flue gas cleaning lines of solid waste incineration units. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 166, pp. 499–511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.001>.
83. Zhao K., Sun X., Wang C., Song X., Wang F., Li K., Ning P. Supported catalysts for simultaneous removal of SO₂, NO_x, and Hg₀ from industrial exhaust gases: a review. *Chinese Chemical Letters*, 2021, vol. 32, pp. 2963–2974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2021.03.023>.
84. Saarnio K., Frey A., Niemi J.V., Timonen H., Rönkkö T., Karjalainen P., Vestenius M., Teinilä K., Pirjola L., Niemelä V., Keskinen J., Häyrynen A., Hillamo R. Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization. *Journal of Aerosol Science*, 2014, vol. 73, pp. 14–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.03.004>.

Информация об авторах

Галина Евгеньевна Холодная, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. holodnaya@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8503-0481>

Роман Владимирович Сазонов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-производственной лаборатории «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. srv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6099-9309>

Денис Владимирович Пономарев, кандидат технических наук, главный специалист конструкторского отдела группы по инжинирингу ООО «Национальная Газовая Компания – Томск», Россия, 634022, г. Томск, Кузовлевский тракт, 2. ponomarev.dv@gasproduction.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7052-2950>

Ольга Павловна Лаптева, инженер Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. laptevaop@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0318-8139>

Поступила в редакцию: 03.02.2025

Поступила после рецензирования: 28.04.2025

Принята к публикации: 21.05.2025

Information about the authors

Galina E. Kholodnaya, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. holodnaya@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8503-0481>

Roman V. Sazonov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. srv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6099-9309>

Denis V. Ponomarev, Cand. Sc., Chief Specialist, National Gas Company – Tomsk LLC, 2, Kuzovlevsky Trakt, Tomsk, 634022, Russian Federation. ponomarev.dv@gasproduction.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7052-2950>

Olga P. Lapteva, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. laptevaop@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0318-8139>

Received: 03.02.2025

Revised: 28.04.2025

Accepted: 21.05.2025