

УДК 620.91:504.062

© А. Л. Шкаровский, д-р техн. наук, профессор

© А. М. Гримитлин, д-р техн. наук, профессор

© В. Р. Таурит, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: szkarowski@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,

taurit_v_r@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-5-90-97

© A. L. Shkarovskiy, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. M. Grititlin, Dr. Sci. Tech., Professor

© V. R. Taurit, Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: szkarowski@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,

taurit_v_r@mail.ru

ГАЗОВОЕ ТОПЛИВО И ОХРАНА АТМОСФЕРЫ: НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

GAS FUEL AND ATMOSPHERE PROTECTION: SOME ISSUES OF THEORY AND PRACTICE OF FORMATION AND NEUTRALIZATION OF HARMFUL SUBSTANCES

В статье представлены результаты исследований, целью которых является повышение эффективности термического обезвреживания парогазовых выбросов. Для этого рассмотрены задачи эффективного окисления органических вредных веществ в пламени горящего газового топлива. В основу методологии работы положено теоретическое исследование последовательных этапов окисления органики в условиях параллельно развивающихся процессов горения основного топлива. Выполнен анализ литературных данных по эффективности термического обезвреживания и предложена модель процесса на основе динамического подхода. Проанализировано комплексное воздействие различных факторов влияния на поведение обезвреживаемого вещества в пламени. Определена эффективность вариантов подачи парогазовых выбросов в установки обезвреживания и обоснован предпочтительный вариант с подмешиванием выбросов непосредственно в дутьевой воздух горелочных устройств. Научные и практические результаты работы дают возможность значительно повысить эффективность установок термического обезвреживания парогазовых выбросов, содержащих вредные органические вещества, и общие показатели охраны атмосферного воздуха.

Ключевые слова: парогазовые выбросы, вредные вещества, термическое обезвреживание, эффективность, охрана атмосферы.

The article presents the results of studies aimed at increasing the efficiency of thermal neutralization of gas-vapor emissions. For this purpose, the problems of efficient oxidation of organic harmful substances in the flame of burning gas fuel are considered. The methodology of the work is based on a theoretical study of successive stages of organic oxidation under conditions of parallel developing processes of combustion of the main fuel. An analysis of special literature data on the efficiency of thermal neutralization is performed and a model of the process based on a dynamic approach is proposed. A complex effect of various factors influencing the behavior of the neutralized substance in flame is analyzed. The efficiency of options for feeding gas-vapor emissions to neutralization units is determined and the preferred option with mixing emissions directly into the blast air of burner devices is substantiated. Scientific and practical results of the work make it possible to significantly increase the efficiency of units for thermal neutralization of gas-vapor emissions containing harmful organic substances, and general indicators of atmospheric air protection.

Keywords: gas-vapor emissions, harmful substances, thermal neutralization, efficiency, protection of the atmosphere.

Введение

Общая тенденция в области природоохранной деятельности хорошо известна не только специалистам: несмотря на поистине огромные средства, направляемые на эти цели в развитых индустриальных странах, динамика положения в этой части взаимоотношения человека с окружающей средой неутешительна [1, 2]. Отнюдь не всегда размер и направление использования этих средств оправданы с научной точки зрения [3–5]. Спорные моменты ни к чему не приведшего Киотского протокола и самой рамочной конвенции ООН по борьбе с неблагоприятными изменениями климата исследованы ранее в публикациях [6–8]. Последующие климатические форумы и их решения, такие как Парижское соглашение, которые ориентированы в том же бесперспективном направлении, подвергаются обоснованной критике [9]. Неслучайно США отказываются их признавать и выполнять.

Суверенностью можно констатировать — экстенсивное развитие природоохранной деятельности ничего не может решить. Все новые энергозатраты в этой области сами становятся фактором дальнейшего негативного воздействия на биосферу [10, 11]. Распространенным случаем является вторичное загрязнение других элементов окружающей среды при защите одного из них, например, загрязнение атмосферы при обезвреживании твердых отходов [12]. Ключом к коренному изменению положения является повышение эффективности борьбы с вредным воздействием на окружающую среду при существующем уровне затрат топлива, энергии, ресурсов и финансов [7].

Одним из важнейших направлений такой деятельности является снижение уровня загрязнения атмосферы, как это предусмотрено федеральными законами¹. Сюда

¹ Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (ред. от 24.07.2023); Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 28.11.2015; с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2016).

относится как повышение эффективности и экологичности использования топлива, так и широкая гамма процессов термического обезвреживания различных вредных веществ, содержащихся в парогазовых выбросах [1, 2]. В обоих случаях наиболее высоких показателей можно добиться при сжигании природного газа [7, 8].

Предмет исследований и постановка задачи

Разнообразие вредных для человека и природы веществ техногенного происхождения очень велико². Не подлежит сомнению, что для некоторых из них требуются специальные методы обезвреживания, например плазменные [13–15]. Однако для большинства органических соединений эффективны методы термического обезвреживания (дожигания) в пламени горящего топлива [1, 7, 8, 16], что и было предметом представленных в статье исследований. Для большого количества органических вредных веществ в процессе их термического обезвреживания получены зависимости вида [17, 18]:

$$C_k = f(C_n; t), \quad (1)$$

где C_n и C_k — соответственно начальная и конечная концентрации вредного вещества; t — температура в зоне дожигания (реакционной зоне).

У данных такого рода (рис. 1) есть ряд недостатков, а точнее особенностей, которые не позволяют считать их вполне достоверными и универсальными с точки зрения применения при проектировании установок термического обезвреживания.

Прежде всего, подобные зависимости чаще всего получены в условиях, когда ряд важнейших параметров, оказывающих непосредственное влияние на эффективность обезвреживания, жестко зафиксирован, причем это не всегда оговаривается в услови-

² ГОСТ 12.1.007–76. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартиформ, 2007 (актуализация текста от 06.04.2015).

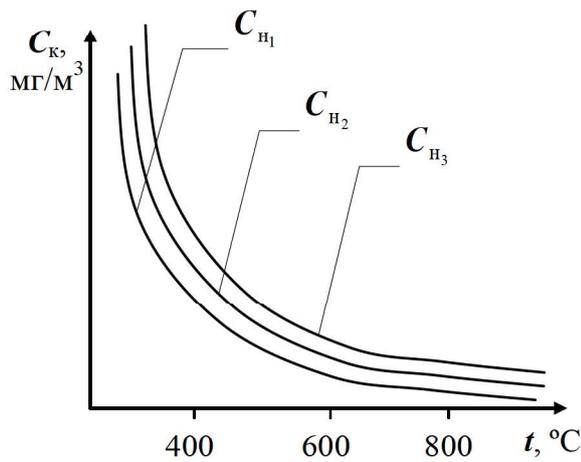


Рис. 1. Общий характер зависимости конечной концентрации обезвреживаемого вещества C_k от температуры дожигания при различных начальных концентрациях $C_{нi}$

ях эксперимента [19, 20]. К таким факторам влияния относятся конструкция установки, форма и аэродинамика камеры сгорания, способ подачи обезвреживаемых потоков, характеристики горелочного устройства, время пребывания продуктов в реакционной зоне, наличие каталитического или ингибирующего влияния и т. п. Эти факторы, как правило, определяют заключительную стадию процесса, когда, собственно, и «решается» вопрос о полноте выгорания. Простой пример: при фиксированной начальной концентрации и тех же самых температурах дожигания результат будет резко отличаться при разной степени крутки потока и, тем более, в зависимости от времени пребывания в топке (рис. 2).

Даже само понятие «температура обезвреживания» требует уточнения. Обычно речь идет о температуре, измеренной в некоторой характерной точке топочного пространства, наиболее представительной по мнению авторов эксперимента, например, в ядре факела или в реакционной зоне [21]. Однако даже эти зоны характеризуются различной температурой. Изменение только точки измерения температуры изменит весь вид зависимости (1): при иной температуре

общий результат выгорания может быть тот же самый.

Применение средней температуры (ядра факела, реакционной зоны или топочного пространства) не устраняет противоречий. При данном значении t_{cp} распределение локальных температур в этом пространстве, а следовательно, и эффективность выгорания могут существенно отличаться [22].

Эти замечания приводят к несколько парадоксальному выводу: никакая температурная характеристика топочного объема, независимо от ее формулировки, сама по себе не может рассматриваться как определяющий фактор процесса обезвреживания. Для достижения максимально возможной эффективности обезвреживания и использования топлива необходимо учитывать значительно более широкий круг факторов влияния. Попытка показать, насколько при этом усложняется стоящая перед нами задача и выполнение соответствующих теоретических исследований, предпринята в настоящей статье.

Рассмотрение процесса термического обезвреживания на основе динамического подхода

Рассмотрим развитие некоторого молярного элемента Θ_1 в топочном объеме (рис. 3), образовавшегося по истечении времени τ_1 с момента поступления потока обезвреживаемой среды в топку. Более строго можно определить его как характерную ячейку реагирующего пространства, во всем объеме которой основные температурно-концентрационные показатели в данный момент времени можно считать одинаковыми.

Состав этого элемента динамически сложился из:

- горящего топлива C_r ;
- конечных продуктов его окисления $C_{п}$;
- обезвреживаемого органического вещества C_b ;
- окислителя (кислорода, содержащегося в воздухе и отбросных газах) C_o ;

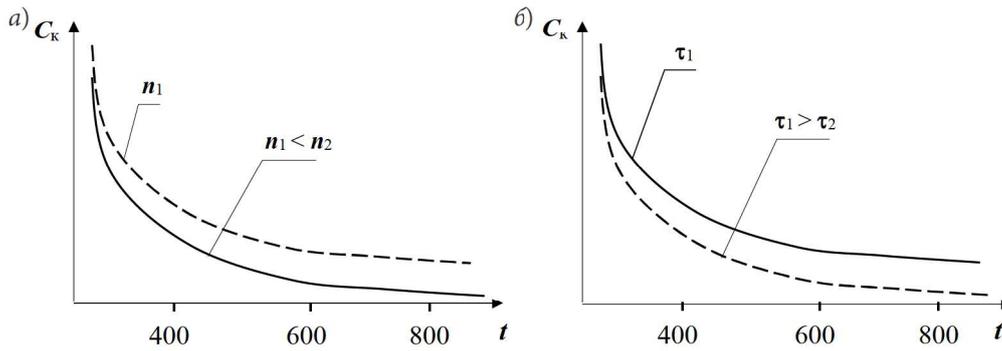


Рис. 2. Влияние степени крутки потока n_i (а) и времени пребывания в реакционной зоне τ_i (б) на эффективность обезвреживания

• балласта (азота воздуха и неорганических компонентов отбросных газов) C_6 .

Для упрощения такой очевидный компонент, как промежуточные продукты неполного окисления топлива и обезвреживаемого вещества, будем относить к компонентам C_T и C_B , а продукты полного окисления обезвреживаемого вещества учитывать вместе с продуктами полного окисления топлива C_n .

Время τ_1 назначим так, чтобы начальный момент рассмотрения элемента \mathcal{E}_1 соответствовал моменту воспламенения основного топлива, то есть $C_{n1} = 0$. Такой подход позволяет утверждать, что характеристики элемента \mathcal{E}_1 определяются только характеристиками потоков, условиями их подачи в топку, включая условия смешения. Тогда совокупность элементов \mathcal{E}_1 можно отождествить с поверхностью воспламенения топлива и одновременно как поверхность, соответствующую начальному состоянию обезвреживаемого вещества. Естественное замечание, что на поверхности $C_{n1} = 0$ значение C_B может весьма различаться, устраним интегрированием по координатам поверхности воспламенения топлива. Заметим, однако, что интегральный подход возможен только до момента формирования начального состояния обезвреживаемого вещества, тогда как для рассмотрения последующего процесса развития элемента \mathcal{E}_1 он совершенно недопустим.

Формирование этого элемента, его концентрационный состав, аэродинамика и температура, определяющие его дальнейшее развитие, зависят от ряда формирующих факторов (см. обозначения на рис. 3):

ΣK — совокупности конструктивных параметров, определяющих условия смешения потоков после их выхода из горелки и устройств для подачи отбросных газов;

n — степени крутки горелки и устройств подачи выбросов;

α — коэффициента избытка воздуха;

C_n — начальной концентрации обезвреживаемого вещества в отбросных газах;

τ_1 — самого времени, по истечении которого начато рассмотрение поведения элемента \mathcal{E}_1 (значение τ_1 , в свою очередь, зависит от целого ряда формирующих факторов).

Сделанные предположения позволяют приступить к наблюдению за дальнейшей эволюцией выбранного элемента топочного пространства. Это многоплановый процесс, требующий выделения нескольких пластов факторов влияния.

1. Состав элемента

Авторский подход заключается в том, что должно учитываться не только классическое влияние концентрации реагирующих компонентов на скорость химической реакции окисления обезвреживаемого вещества:

$$\frac{dC_B}{d\tau} = k \cdot C_B^n \cdot C_O^m. \quad (2)$$

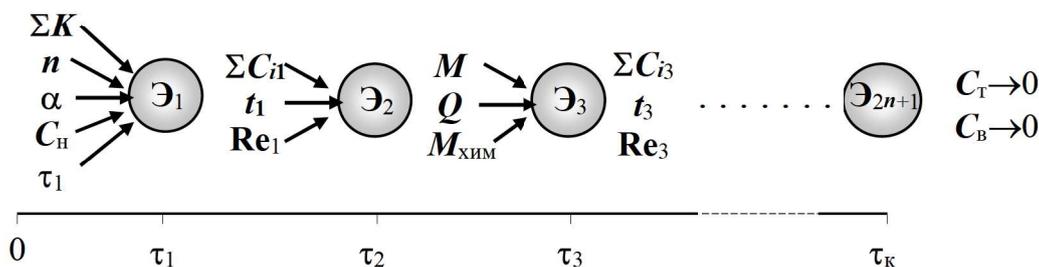


Рис. 3. Принципиальная схема динамического элементного анализа топочного процесса при обезвреживании органических веществ

Большое значение имеет взаимное влияние совместно протекающих процессов горения основного топлива (Т) и выгорания обезвреживаемого вещества (В), особенно, если учесть, что оба процесса используют то же самое исходное количество окислителя (О), в определенном смысле «конкурируя» между собой.

Строго говоря, распространенный термин «выгорание» применительно к обезвреживаемому веществу некорректен, поскольку в большинстве случаев это вещество образует с окислителем смесь, в которой концентрации органики значительно меньше нижнего предела распространения пламени [23]. Поэтому правильнее будет говорить о высокотемпературном окислении вредных органических компонентов.

Скорость реакции в соответствии с (2) имеет место только в условиях чистой равномерно перемешанной смеси В–О. В реальных условиях развития рассматриваемого элемента эта скорость будет замедляться в результате прежде всего:

- присутствия в реакционной зоне балласта;
- наличия других окисляющихся веществ

(топлива, продуктов неполного окисления как топлива, так и обезвреживаемого вещества), для которых энергия активации E_a может быть ниже (и, как правило, ниже).

Таким образом, в смеси В–О–Т вероятность реакции молекулы окислителя может быть существенно смещена в сторону молекулы вещества с меньшим значением E_a .

2. Температура элемента

Экспоненциальное влияние температуры на скорость окисления определяет уравнение Аррениуса и не требует специального анализа. Напомним только, что температура во всем элементе при этом считается одинаковой.

3. Аэродинамика элемента

Каким бы продолжительным ни было влияние конструктивных факторов топочного устройства, для описания интенсивности перемешивания в элементе можно использовать любую обобщенную характеристику турбулентности потока, например критерий Рейнольдса Re .

4. Внешнее воздействие

Речь идет о характере и скорости изменения указанных факторов влияния в результате внешнего воздействия через границы элемента, то есть взаимодействия с соседними элементами на поверхности Ξ_1 . Это воздействие, условно обозначенное символом ⚡, выражается в дополнительном (по сравнению с естественным развитием элемента) изменении состава, температуры и аэродинамики элемента с интенсивностью, соответственно:

$$\frac{dC_{i1}}{d\tau}, \frac{dt_1}{d\tau}, \frac{dRe_1}{d\tau}.$$

Эти изменения происходят в результате (см. рис. 3) массообмена M , теплообмена Q и аэродинамического взаимодействия с соседними элементами, а также прямого химического реагирования элемента с молекулами соседних элементов $M_{хим}$.

Назначим следующий отрезок времени τ_2 развития элемента так, чтобы

$$\frac{dC_{i1}}{d\tau} \rightarrow 0; \frac{dt_1}{d\tau} \rightarrow 0; \frac{dRe_1}{d\tau} \rightarrow 0.$$

Другими словами, за время $\tau_2 - \tau_1$ происходит только естественное развитие элемента Θ_1 за счет внутренних формирующих факторов с интенсивностью

$$\frac{dC_{i1}}{d\tau}; \frac{dt_1}{d\tau}; \frac{dRe_1}{d\tau},$$

а взаимодействие с соседними элементами не успевает сказаться. В результате возникает элемент Θ_2 . Этот подход применим ко всем «четным» элементам в авторской динамической модели (2-му, 4-му и т. д.)

Теперь учтем воздействие через границы элемента к моменту τ_3 , сосредоточив внимание на изменениях, происходящих за время $\tau_3 - \tau_2$. Несмотря на условность такого подхода, это дает возможность определить интенсивность происходящих изменений непосредственно в зависимости от степени стороннего воздействия:

$$\frac{dC_{i2}}{d\tau} = f(M); \frac{dt_2}{d\tau} = f(Q); \frac{dRe_2}{d\tau} = f(M_{\text{хим}}).$$

В результате можно констатировать образование элемента Θ_3 , состояние которого учитывает влияние всех формирующих факторов к моменту τ_3 . Это составляет условия образования всех «нечетных» элементов модели (3-го, 5-го и т. д.).

Далее цикл рассуждений повторяется: эволюция элемента топочного пространства с четным номером учитывает изменения в результате внутренних факторов влияния, а с нечетным — в результате взаимодействия с соседними элементами. Правильно организованный процесс термического обезвреживания вредных выбросов предусматривает, что за полное время пребывания продуктов в топочном объеме τ_k обеспечивается одно-временное выполнение двух условий:

- полного выгорания основного топлива $C_{m_{2n+1}} \rightarrow 0$,

- полного окисления обезвреживаемой органики $C_{B_{2n+1}} = C_k \rightarrow 0$, причем на всей поверхности, образованной элементами с номером $2n+1$ (см. рис. 3).

Выводы

1. Авторы отдают себе отчет в том, что при таком лаконичном изложении существа проблемы может создаться впечатление, что статья в большей степени ставит вопросы, чем отвечает на них, и даже согласны с таким замечанием. Информация, необходимая для достоверного решения задач как внутреннего развития выделенного элемента топочного пространства, так и его взаимодействия с другими элементами, требует значительного расширения того, что мы знаем о происходящих в пламени горящего топлива процессах.

2. Вместе с тем, даже сам продемонстрированный подход позволяет уверенно сделать ряд выводов об оптимальной организации процесса высокотемпературного окисления вредных органических выбросов в пламени горящего топлива. Главный из них заключается в том, что максимальное сокращение времени и повышение эффективности обезвреживания, а также минимальный расход топлива обеспечиваются при подаче выбросов в топочное устройство вместе с воздухом, необходимым для горения топлива.

3. Если отбросные газы характеризуются достаточно высоким содержанием кислорода (случай, характерный для вентиляционных выбросов), то необходимо использовать их в качестве дутьевого воздуха, добавляя атмосферный воздух только для соблюдения материального баланса процесса горения. Во всех иных случаях отбросные газы необходимо подмешивать к дутьевому воздуху на достаточном удалении от топочного устройства, чтобы обеспечить равномерное перемешивание до момента поступления в установку обезвреживания. Подача выбросов непосредственно в топку неизбежно затягивает «нечетную» (см. рис. 3) стадию

развития элементов, а ее результаты делает менее предсказуемыми.

Библиографический список

1. Шкаровский А. Л. Охрана окружающей среды. М.: Юрайт, 2024. 84 с. ISBN 978-5-534-19741-9.
2. Сазонов Э. Экология городской среды. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 275 с. ISBN 978-5-534-07780-3.
3. Dal Pozzo A., et al. Environmental and economic performance assessment of alternative acid gas removal technologies for waste-to-energy plants. *Sustain. Prod. Consum.* 2018. 16. Pp. 202–215. DOI 10.1016/j.spc.2018.08.004.
4. Кукин П., Колесников Е., Колесникова Т. Оценка воздействия на окружающую среду. Экспертиза безопасности. М.: Юрайт, 2016. 453 с. ISBN 978-5-534-02320-6.
5. Dong J., et al. The environmental cost of recovering energy from municipal solid waste. *Appl. Energy*. 2020. 267. Pp. 114792. DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114792.
6. Шкаровский А. Л. Повышение эффективности защиты воздушного бассейна при сжигании газообразного и жидкого топлива: автореф дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 1997.
7. Шкаровский А. Л. Газовое топливо и Киотский протокол: мифы и реальность // Газ-Информ. 2005. № 2 (9), С. 58–60.
8. Szkarowski A. Complex Problem of Atmosphere Protection at the Beginning of a New Millennium. *The Environment Protection. Annual set.* 2007. 9. Pp. 159–166. ISSN 1506-218X.
9. Mungai E., Ndiritu S., Rajwani T. Do voluntary environmental management systems improve environmental performance? Evidence from waste management by Kenyan firms. *J. Clean. Prod.* 2020. 265, 121636. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121636.
10. Тяглов С. и др. Термическая переработка отходов — эффективный способ их утилизации и технология развития альтернативной энергетики в Российской Федерации // Финансовые исследования. 2022. № 2 (75). С. 77–82. DOI 10.54220/finis.1991-0525.2022.75.2.007.
11. Trilling A., Volk T., Fortier M. Climate Change Impacts of Electricity Generated at a Waste-to-Energy Facility. *Environ. Sci. Technol.* 2021. 55. Pp. 1436–1445. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03477>.
12. Kosowska-Golachowska M., Luckos A., Kijoleczkowska A. Pollutant Emissions during Oxy-Fuel Combustion of Biomass in a Bench Scale CFB Combustor. *Energies* 2022, 159 (3), 706. DOI 10.3390/en15030706.
13. Анахов С. В., Пыкин Ю. А. О методах плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обез-

вреживания отходов // Аграрный вестник Урала. 2017. № 07 (161). С. 46–51.

14. Xiuquan C., et al. Design and Characteristics of a Laminar Plasma Torch for Materials Processing. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015. 2. Pp. 1–18. DOI 10.1007/s11090-015-9661-6.
15. Fridman A. *Plasma Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press. 2008. 978 p. ISBN-13 978-0-521-84735-3.
16. Жиганков Д. В. Термическое обезвреживание отходов: Значение для обеспечения экологической безопасности // Вестник науки. 2023. № 10 (67). Т. 2. С. 299–303.
17. Paraschiv L., Serban A., Paraschiv S. Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal/biomass/solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Rep.* 2020. 6 (3). Pp. 36–45. DOI 10.1016/j.egyr.2019.10.016.
18. Biganzoli L., Racanella G., Marras R., Rigamonti L. High temperature abatement of acid gases from waste incineration. Part II: Comparative life cycle assessment study. *Waste Manag.* 2015. 35. Pp. 127–134. DOI 10.1016/j.wasman.2014.10.021.
19. Thabit Q., Nassour A., Nelles M. Flue Gas Composition and Treatment Potential of a Waste Incineration Plant. *Appl. Sci.* 2022. 12, 5236. DOI 10.3390/app12105236.
20. Zhang Y., Zhao J., Ma Z., Yang F., Cheng F. Effect of oxygen concentration on oxy-fuel combustion characteristic and interactions of coal gangue and pine sawdust. *Waste Manag.* 2019. 87 (15). Pp. 288–294. DOI 10.1016/j.wasman.2019.01.040.
21. Zhu H., et al. Low-Temperature SCR Catalyst Development and Industrial Applications in China. *Catalysts*. 2022. 12, 341. DOI 10.3390/catal12030341.
22. Odunlami O., et al. The effect of air-fuel ratio on tailpipe exhaust emission of motorcycles. *Fuel Commun.* 2022. 11, 100040. DOI 10.1016/j.jfueco.2021.100040.
23. Choi E., et al. Variability of nitrous oxide and carbon dioxide emissions continuously measured in solid waste incinerators. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2018. 20. Pp. 832–843. DOI 10.1007/s10163-017-0644-y.

References

1. Shkarovskiy A. L. *Okhrana okruzhayushchey sredy* [Environment Protection]. Moscow, Yurayt Publ., 2024, 84 p. ISBN 978-5-534-19741-9.
2. Sazonov E. *Ekologiya gorodskoy sredy* [Ecology of the urban environment]. 2-nd ed., revised. Moscow, Yurayt Publ., 2019, 275 p. ISBN 978-5-534-07780-3.
3. Dal Pozzo A., et al. Environmental and economic performance assessment of alternative acid gas removal technologies for waste-to-energy plants. *Sustain. Prod.*

Consum., 2018, vol. 16, pp. 202–215. DOI 10.1016/j.spc.2018.08.004.

4. Kukin P., Kolesnikov E., Kolesnikova T. *Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. Ekspertiza bezopasnosti* [Environmental impact assessment. Safety examination]. Moscow, Yurayt Publ., 2016, 453 p. ISBN 978-5-534-02320-6.

5. Dong J., et al. The environmental cost of recovering energy from municipal solid waste. *Appl. Energy*, 2020, 267, pp. 114792. DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114792.

6. Shkarovskiy A. L. *Povyshenie effektivnosti zashchity vozdushnogo basseyna pri szhiganii gazoobraznogo i zhidkogo topliva. Avtoref dis. dokt. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of air pool protection when burning gaseous and liquid fuel. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 1997.

7. Shkarovskiy A. L. *Gazovoe toplivo i Kiotskiy protokol: mify i real'nost'* [Gas fuel and the Kyoto Protocol: myths and reality]. *Gas-Inform.*, 2005, no. 2 (9), pp. 58–60.

8. Szkarowski A. Complex Problem of Atmosphere Protection at the Beginning of a New Millennium. *The Environment Protection. Annual set*, 2007, vol. 9, pp. 159–166. ISSN 1506-218X.

9. Mungai E., Ndiritu S., Rajwani T. Do voluntary environmental management systems improve environmental performance? Evidence from waste management by Kenyan firms. *J. Clean. Prod.* 2020, 265, 121636. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121636.

10. Tyaglov S., et al. *Termicheskaya pererabotka — effektivnyy sposob ikh utilizatsii i tekhnologiya razvitiya al'ternativnoy energetiki v Rossiyskoy Federatsii* [Thermal processing is an effective method of their disposal and a technology for the development of alternative energy in the Russian Federation]. *Finansovye issledovaniya – Financial Research*, 2022, no. 2 (75), pp. 77–82. DOI 10.54220/finis.1991-0525.2022.75.2.007.

11. Trilling A., Volk T., Fortier M. Climate Change Impacts of Electricity Generated at a Waste-to-Energy Facility. *Environ. Sci. Technol.*, 2021, no. 55., pp. 1436–1445. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03477>.

12. Kosowska-Golachowska M., Luckos A., Kijo-Kleczkowska A. Pollutant Emissions during Oxy-Fuel Combustion of Biomass in a Bench Scale CFB Combustor. *Energies*, 2022, no. 159 (3), 706. DOI 10.3390/en15030706.

13. Anakhov S. V., Pykin Yu. A. *O metodakh plazmennoy insineratsii v tekhnologiyakh utilizatsii*

i obezvrezhvaniya otkhodov [On plasma incineration methods in waste disposal and disposal technologies]. *Agrarniy vestnik Urala – Agrarian Bulletin of the Urals*, 2017, no. 07 (161), pp. 46–51.

14. Xiuquan C., et al. Design and Characteristics of a Laminar Plasma Torch for Materials Processing. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2015, 2, pp. 1–18. DOI 10.1007/s11090-015-9661-6.

15. Fridman A. *Plasma Chemistry*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008, 978 p. ISBN-13 978-0-521-84735-3.

16. Zhigankov D. V. *Termicheskoe obezvrezhivanie otkhodov: Znachenie dlya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti* [Thermal neutralization of waste: Importance for ensuring environmental safety]. *Vestnik nauki – Herald of Science*, 2023, no. 10 (67), vol. 2, pp. 299–303.

17. Paraschiv L., Serban A., Paraschiv S. Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal/biomass/solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Rep.*, 2020, 6 (3), pp. 36–45. DOI 10.1016/j.egy.2019.10.016.

18. Biganzoli L., Racanella G., Marras R., Rigamonti L. High temperature abatement of acid gases from waste incineration. Part II: Comparative life cycle assessment study. *Waste Manag.*, 2015, 35, pp. 127–134. DOI 10.1016/j.wasman.2014.10.021.

19. Thabit Q., Nassour A., Nelles M. Flue Gas Composition and Treatment Potential of a Waste Incineration Plant. *Appl. Sci.*, 2022, 12, 5236. DOI 10.3390/app12105236.

20. Zhang Y., Zhao J., Ma Z., Yang F., Cheng F. Effect of oxygen concentration on oxy-fuel combustion characteristic and interactions of coal gangue and pine sawdust. *Waste Manag.*, 2019, 87 (15), pp. 288–294. DOI 10.1016/j.wasman.2019.01.040.

21. Zhu H., et al. Low-Temperature SCR Catalyst Development and Industrial Applications in China. *Catalysts*, 2022, 12, 341. DOI 10.3390/catal12030341.

22. Odunlami O., et al. The effect of air-fuel ratio on tailpipe exhaust emission of motorcycles. *Fuel Commun.*, 2022, no. 11, 100040. DOI 10.1016/j.jfueco.2021.100040.

23. Choi E., et al. Variability of nitrous oxide and carbon dioxide emissions continuously measured in solid waste incinerators. *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 2018, no. 20, pp. 832–843. DOI 10.1007/s10163-017-0644-y.