

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.074.3

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-56-71>

Повышение экологических характеристик теплогенераторов систем автономного теплоснабжения

**В.С. Ежов¹, А.П. Бурцев¹✉, А.Н. Седых¹, А.В. Сологубова¹,
А.А. Базартинова¹**

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается инновационный метод повышения экологических характеристик теплогенераторов в системах автономного теплоснабжения, основанный на применении гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента с целью удаления вредных веществ из дымовых газов, а именно оксидов азота и углерода. Представлены результаты экспериментов, подтверждающих эффективность этого метода.

Методы. В исследовании рассмотрена работа опытно-промышленной установки с расчётом ее эффективности. Для этого использованы данные, полученные в ходе экспериментов на этой установке, которая была установлена на дымовую трубу с целью очистки дымовых газов от вредных газов (оксиды азота и углерода).

Результаты. Разработанная опытно-промышленная установка позволяет снизить содержание оксидов азота в сбросных и дымовых газах в атмосферу на 50-55%, также удалось снизить концентрацию оксидов углерода на 27,7%. Снижение оксидов углерода в выбросах варьируется от 16,7 до 26,7%. В процессе работы установки использовался доменный шлак с гранулами размером от 5 до 10 мм. Установка эффективно очищает дымовые и сбросные газы в течение 720 часов между циклами регенерации доменного шлака, на который требуется до 52,5 литров воды.

Заключение. Опытно-промышленная установка очистки дымовых газов теплогенераторов систем поквартирного теплоснабжения с использованием адсорбционной очистки и гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента является эффективным методом управления экологическими параметрами. Она позволяет снизить содержание вредных компонентов в дымовых газах, включая оксиды азота (NO_x), в том числе NO , оксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO_2). Метод позволяет управлять экологическими параметрами теплогенераторов, исключать необходимость отвода и утилизации конденсата и повышать технико-экономические и экологические параметры теплогенерирующей системы поквартирного теплоснабжения.

Ключевые слова: теплогенератор; автономное теплоснабжение; очистка дымовых газов; адсорбция; гранулированный доменный шлак; оксиды азота; диоксид углерода; экологические характеристики; опытно-промышленная установка; регенерация.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Ежов В.С., Бурцев А.П., Седых А.Н., Сологубова А.В., Базартинова А.А., 2025

Для цитирования: Повышение экологических характеристик теплогенераторов систем автономного теплоснабжения / В.С. Ежов, А.П. Бурцев, А.Н. Седых, А.В. Сологубова, А.А. Базартинова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 56-71. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-56-71>.

Поступила в редакцию 07.07.2025

Подписана в печать 11.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems

Vladimir S. Yezhov¹, Alexey P. Burtsev¹✉, Alexander N. Sedykh¹,
Anna V. Sologubova¹, Arina A. Bazartinova¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The article discusses an innovative method for improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems based on the use of granular blast furnace slag as an adsorbent to remove harmful substances from flue gases, namely nitrogen and carbon oxides. The results of experiments confirming the effectiveness of this method are presented.

Methods. The study examines the operation of a pilot plant with the calculation of its effectiveness. To do this, we used the data obtained during experiments on this installation, which was installed on a chimney in order to purify flue gases from harmful gases (nitrogen and carbon oxides).

Results. The developed pilot plant makes it possible to reduce the content of nitrogen oxides in exhaust and flue gases into the atmosphere by 50-55%, and it was also possible to reduce the concentration of carbon oxides by 27,7%. The reduction of carbon oxides in emissions ranges from 16,7 to 26,7%. Blast furnace slag with granules from 5 to 10 mm in size was used during the operation of the installation. The unit effectively cleans flue and exhaust gases for 720 hours between blast furnace slag regeneration cycles, which requires up to 52,5 liters of water.

Conclusion. Pilot-industrial flue gas purification plant for heat generators of residential heating systems using adsorption purification and granular blast furnace slag as an adsorbent is an effective method of managing environmental parameters. It reduces the content of harmful components in flue gases, including nitrogen oxides (NO_x), including NO, carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO_2). The method makes it possible to control the environmental parameters of heat generators, eliminate the need for condensate removal and disposal, and improve the technical, economic and environmental parameters of the heat generating system for apartment-by-apartment heat supply.

Keywords: heat generator; autonomous heat supply; flue gas purification; adsorption; granular blast furnace slag; nitrogen oxides; carbon monoxide; environmental characteristics; pilot plant; regeneration.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Yezhov V. S., Burtsev A. P., Sedykh A. N., Sologubova A. V., Bazartinova A. A. Improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 56-71 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-56-71>.

Received 07.07.2025

Accepted 11.08.2025

Published 30.09.2025

Проблема повышения экологических характеристик теплогенераторов для поквартирного отопления требует разработки эффективных и экономичных методов [1]. Основные критерии для их применения включают экологическую эффективность и технико-экономическую обоснованность [2].

Экологичность подразумевает применение технологий, которые позволяют сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду, а технико-экономическая обоснованность предполагает использование недорогих и доступных реагентов, стандартизованных процессов, надежного и простого в эксплуатации оборудования [3].

Многие каталитические методы очистки дымовых и сбросных газов отличаются высокой стоимостью катализаторов и сложностью в использовании, что приводит к увеличению стоимости энергии [4]. Некatalитические и абсорбционные методы требуют применения химических реагентов [5], специализированного оборудования и дополнительных производственных площадей, что снижает их эффективность и экологичность [6, 7].

Установка дополнительных теплообменных поверхностей увеличивает аэродинамическое сопротивление и снижает КПД теплогенератора, что повышает стоимость тепловой энергии [8, 9]. Эти методы не подходят для малых теплогенераторов из-за громоздкости оборудования

ния и невозможности снижения температуры отходящих газов.

Материалы и методы

Адсорбция является более подходящим методом для очистки выхлопных газов малых теплогенераторов. Это универсальный процесс, позволяющий удалять примеси из газовой среды с помощью пористых твердых адсорбентов [10, 11]. Адсорбция избирательна и обратима, что позволяет выделять адсорбированные вещества [12].

По характеру взаимодействия адсорбента с веществом различают физическую и химическую адсорбцию. Физическая адсорбция обусловлена межмолекулярными силами и является обратимой, требуя активации энергии порядка 4...12 кДж/моль. Химическая адсорбция включает химическое взаимодействие между адсорбентом и адсорбтивом, что делает ее менее обратимой [13].

Адсорбционные методы позволяют очищать газы при высоких температурах, что делает их подходящими для систем автономного теплоснабжения. Они обладают высокой экологической эффективностью и могут быть адаптированы для малых теплогенераторов, что делает их перспективным решением для контроля экологической чистоты [14].

Химический состав доменного шлака, полученного в рамках одной технологической схемы, демонстрирует высокую степень однородности. На рис. 1 представлен репрезентативный химический

состав доменного шлака, который наглядно иллюстрирует его стабильность.

Данные свидетельствуют о том, что вариативность химического состава доменных шлаков находится в пределах допустимых значений, что подтверждает их относительную инвариантность [15, 16].

Свойства шлака как вяжущего материала зависят от его химического состава (рис. 2), содержания аморфных

веществ, степени измельчения и наличия добавок.

При стандартных условиях реакция между тонкоизмельченным доменным шлаком и водой протекает медленно. Однако этот процесс значительно ускоряется при использовании активирующих веществ, таких как гидроксид кальция, щелочи и гипс [17].

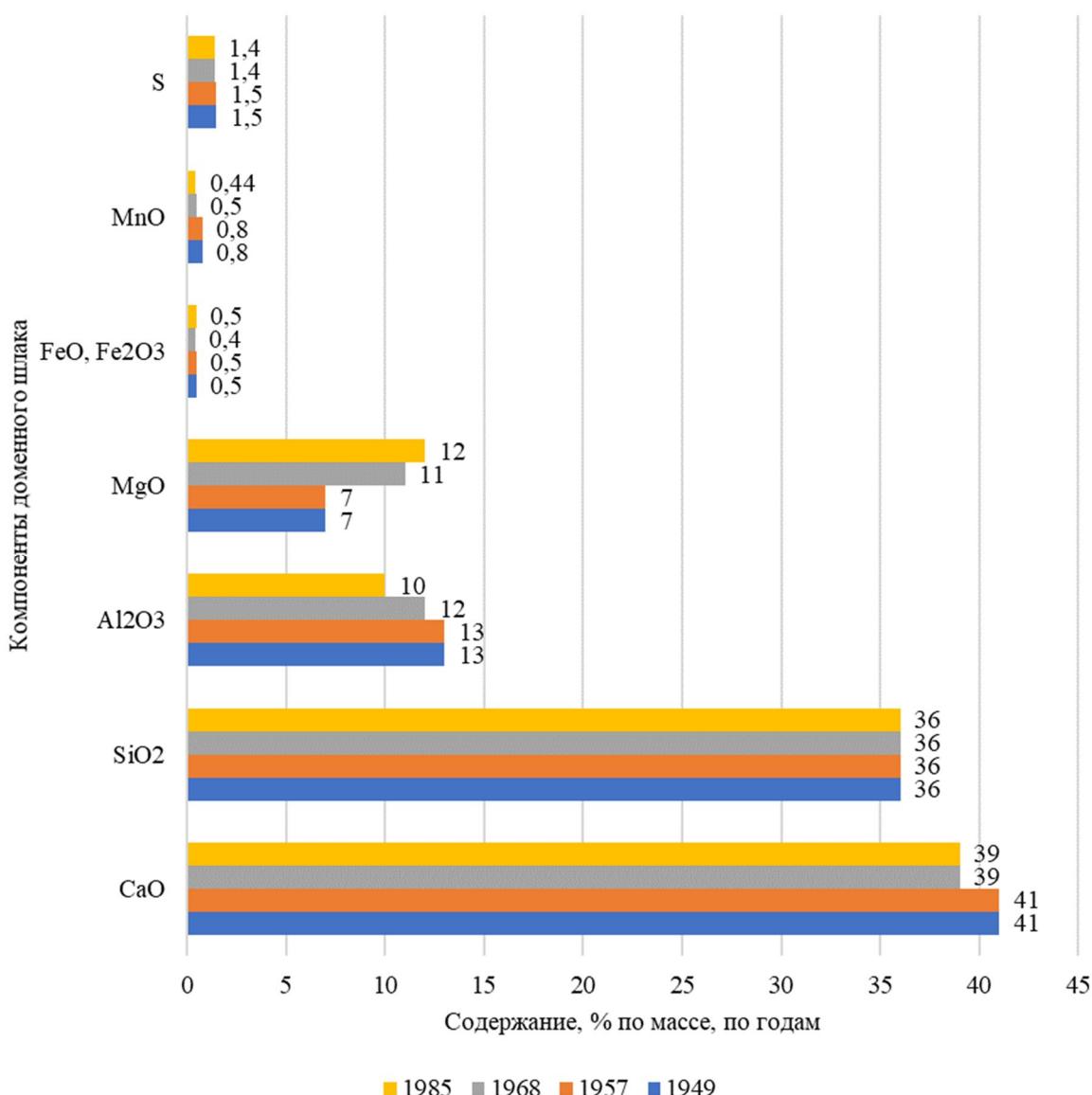


Рис. 1. Химический состав доменных шлаков

Fig. 1. Chemical composition of blast furnace slags

Доменный шлак имеет щелочную реакцию, так как его pH в водной среде варьируется от 8 до 10. Несмотря на содержание серы (1-2%) доменные шлаки не представляют опасности для коррозии стали [18].

Важным параметром, характеризующим активность и устойчивость доменного шлака к известковому распаду, является модуль основности. Он опре-

деляется как отношение суммарного содержания основных оксидов (CaO , MgO , Na_2O , K_2O) к кислым оксидам (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Если модуль основности меньше единицы, то шлак считается кислым и обладает высокой устойчивостью к известковому распаду. Если больше единицы, то шлак является основным и повержен этому процессу [19, 20].

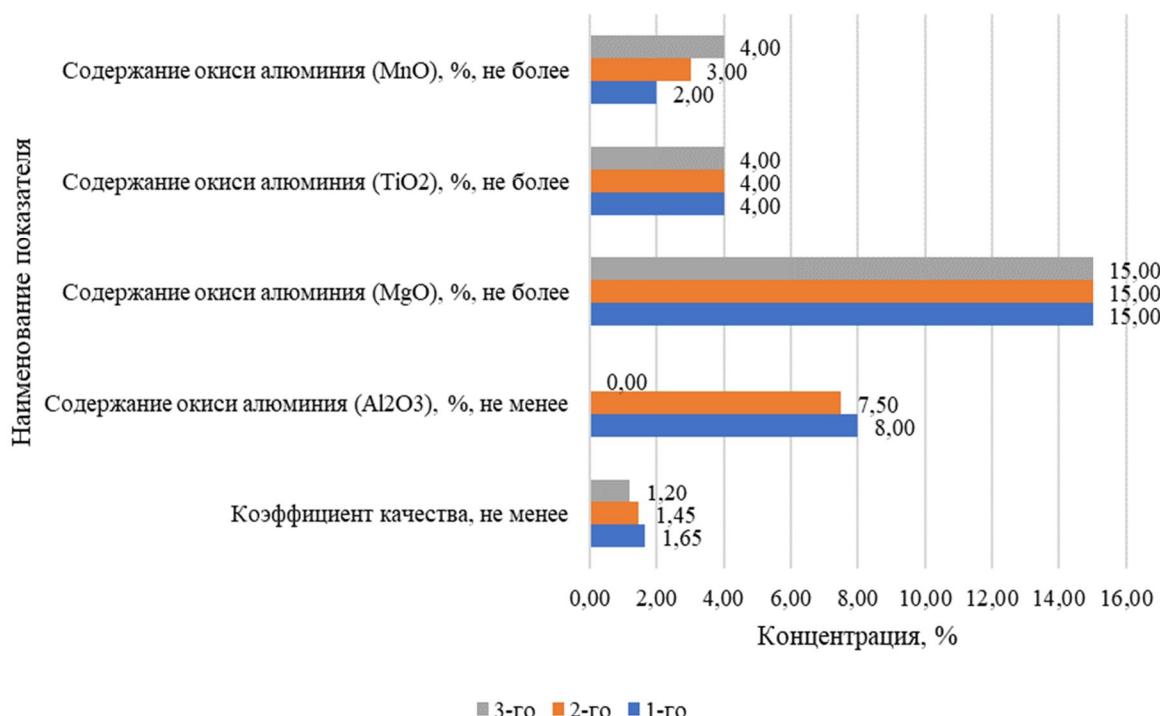


Рис. 2. Химический состав доменных шлаков в зависимости от сорта

Fig. 2. Chemical composition of blast furnace slags depending on the grade

В процессе охлаждения жидкого шлака происходят сложные физико-химические реакции, которые приводят к образованию пор. Эти реакции сопровождаются увеличением вязкости шлаковой массы и выделением газов, которые изначально присутствуют в шлаке в результате доменного процесса. Кроме того, газы образуются в результате термического

разложения сульфидных компонентов, таких как CaS , MgS , MnS и FeS . Этот процесс особенно интенсифицируется при контакте с водой.

Сероводород играет важную роль в формировании пористости шлака. Вода не только способствует разложению сульфидных соединений, но и охлаждает шлаковую массу, что увеличивает ее спо-

собность удерживать газы. Таким образом, эффективность взаимодействия воды и шлака напрямую влияет на успешность процесса поризации.

Для достижения оптимальной пористости необходимо тщательно контролировать параметры взаимодействия воды и шлака, что включает в себя регулирование скорости охлаждения. Интенсивности перемешивания и степени дисперсности водной фазы.

Результаты и их обсуждение

В ходе лабораторных исследований было установлено, что средний показатель пористости доменного шлака, использованного в ходе эксперимента, составляет 60%. Размер пор варьируется от 0,1 до 1,0 мм, что позволяет классифицировать их как макропоры.

В качестве сорбента для очистки дымовых газов был выбран доменный гранулированный шлак, произведенный на Новолипецком металлургическом комбинате. Этот материал характеризуется высоким модулем основности ($M > 1$) и повышенным содержанием основных оксидов, что значительно усиливает его способность к реакциям адсорбции и катализического разложения вредных веществ.

Для регулирования экологических параметров теплогенераторов индивидуальных систем теплоснабжения была разработана и протестирована опытно-промышленная установка, включающая в себя газоочистную насадку, обеспечивающую глубокую очистку дымовых газов.

В качестве экспериментального стенда¹ для апробации технологических режимов работы установки был использован газовый отопительный котел модели АОГВ теплопроизводительностью 23,2 кВт.

Для анализа химического состава дымовых газов до и после работы установки использовался газоанализатор ДАГ-500, который позволил получить точные данные о концентрации вредных компонентов.

Принципиальная схема опытно-промышленной установки включает в себя типовой модуль газоочистки, который гидравлически связан с теплогенератором АОГВ-23,2 через патрубок отвода продуктов сгорания. Линия отвода также соединяет газоочистное устройство с существующим дымоходом, обеспечивая отвод очищенных или байпасных газов в атмосферу (рис. 3)².

¹ Патент № 2717060 С1 Российская Федерация, МПК B04C 5/22, B01D 45/12, B01D 45/18. Экологичная насадка для дымовой трубы; № 2021115161: заявл. 14.19.2019 : опубл. 17.03.2020 / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. Н. Михайлов, К. В. Мамаева; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

² Патент № 2815089 С1 Российская Федерация, МПК B01D 53/04, B04C 9/00. Циклонно-прямоточный адсорбер для комплексной очистки газов: № 2023127211: заявл. 24.10.2023: опубл. 11.03.2024 / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

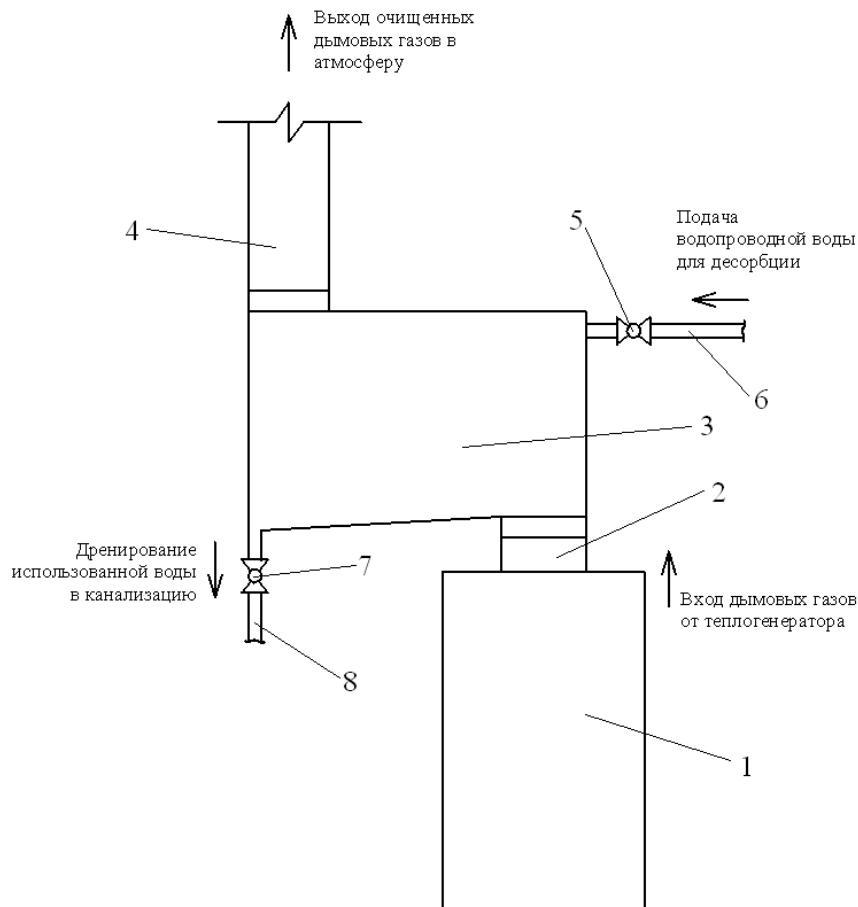


Рис. 3. Принципиальная схема опытно-промышленного испытания установки очистки дымовых газов: 1 – теплогенератор АОГВ-23; 2 – патрубок отвода дымовых газов теплогенератора; 3 – опытно-промышленная установка очистки дымовых газов; 4 – дымоход; 5 – вентиль подачи холодной воды; 6 – трубопровод подачи холодной воды на регенерацию; 7 – вентиль дренажа отработанной воды; 8 – трубопровод канализации

Fig. 3. Schematic diagram of a pilot industrial test of a flue gas purification plant: 1 – heat generator AOGV-23.2; 2 – flue gas outlet pipe of the heat generator; 3 – pilot industrial flue gas purification plant; 4 – chimney; 5 – cold water supply valve; 6 – cold water supply pipeline for regeneration; 7 – waste water drainage valve; 8 – sewage pipeline

Для регенерации доменного шлака установка подключена к системе хозяйственно-питьевого водоснабжения через вентиль подачи охлаждающей воды. Отработанная жидкость отводится через дренажный вентиль, соединяющий установку с сетью производственной канализации.

Для повышения точности экспериментальных измерений и расширения диапазона контроля параметров был до-

полнительно использован высокочувствительный газоанализатор модели ДАГ-500.

Эксперимент начался с загрузки горизонтальных перфорированных кассет предварительно высушенный доменный гранулированным шлаком с коэффициентом основности менее 1 и фракцией 5-10 мм. Затем теплогенератор АОГВ-23,2 был запущен в работу на заданном режиме тепловой нагрузки.

Нагретые дымовые газы поступали в опытно-промышленный модуль газоочистки через нижний стыковочный патрубок, где шлаковая загрузка осуществляла адсорбционно-кatalитическую очистку от токсичных оксидов. Очищенный газ выходил через верхний стыковочный патрубок и удалялся в атмосферу через дымовую трубу¹.

После достижения стационарного режима работы теплогенератора пробы дымовых газов, необходимые для контроля концентраций основных компонентов, отбирали с помощью газоанализатора ДАГ-500 поочерёдно на входном и выходном патрубках опытно-промышленного стенда. Отбор осуществляли в зоне верхнего и нижнего стыковочных узлов.

После первичной газоаналитической выборки дымовых газов постепенно увеличивали электрическую и тепловую нагрузку генератора, что, в свою очередь, приводило к росту температуры факела, расхода продуктов сгорания и концентраций NO_x, CO и CO₂. Когда теплогенератор выходил на установившийся номинальный режим, повторный отбор газовой смеси осуществляли согласно ранее описанной процедуре пробоотбора.

Указанным методом выполняли требуемую серию измерений; финальное измерение фиксировали при предельной нагрузке на теплогенератор.

В ходе эксперимента регистрировали параметры, необходимые для вычисления коэффициента очистки дымовых выбросов теплогенератора опытно-промышленной установки при варьируемых температурах отходящих газов и изменяющихся концентрациях оксидов азота (NO_x), окиси углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂).

Испытания проводили при десяти ступенях нагрузки теплогенератора: температура газового потока на входе в насадок последовательно составляла 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180 и 190 °C. Регулирование мощности осуществляли варьированием расхода газообразного топлива, что изменяло объём дымовых газов, повышало их термический уровень и влияло на концентрации токсичных примесей.

Показатели температуры дымовых газов как перед входом в опытно-промышленный абсорбер, так и на его выходе, а также температуру газовой среды внутри помещения котельной мониторили с использованием газоанализатора ДАГ-500. На основании экспериментальных данных и последующего расчётного анализа построены кривые, показывающие, как изменяется эффективность удаления NO_x, CO и CO₂ в зависимости от температуры дымовых потоков (рис. 4–7).

¹ Патент на полезную модель № 227716 U1 Российская Федерация, МПК B01D 53/04. горизонтальный многоступенчатый адсорбер: № 2024110450: заявл. 17.04.2024: опубл. 31.07.2024 / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

Характер зависимостей определялся методом наименьших квадратов.

Из графика зависимости очистки дымовых газов от CO (см. рис. 4) видно, что уровень очистки дымовых газов от ок-

сида углерода (II) прямо пропорционален температуре дымовых газов: с увеличением температуры дымовых газов от 110 до 200 °C увеличивается уровень очистки от CO с 7,1% до 23,9 %.

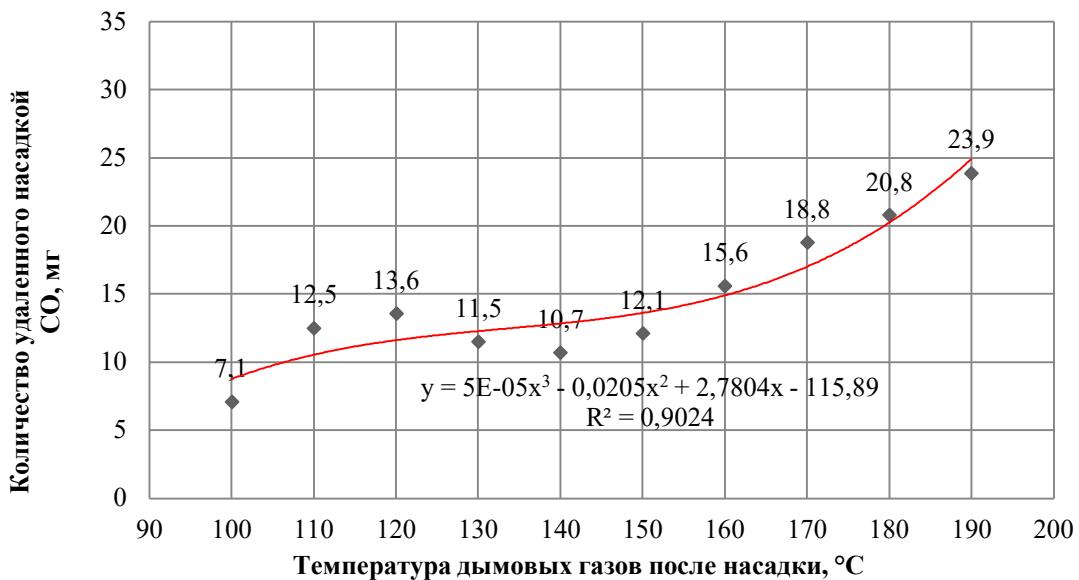


Рис. 4. График зависимости очистки дымовых газов от CO при различной температуре на входе в насадку

Fig. 4. Graph of the dependence of flue gas purification on CO at different temperatures at the inlet to the nozzle



Рис. 5. График зависимости очистки дымовых газов от CO₂ при различной температуре на входе в насадку

Fig. 5. Graph of dependence of flue gas purification on CO₂ at different temperatures at the nozzle inlet

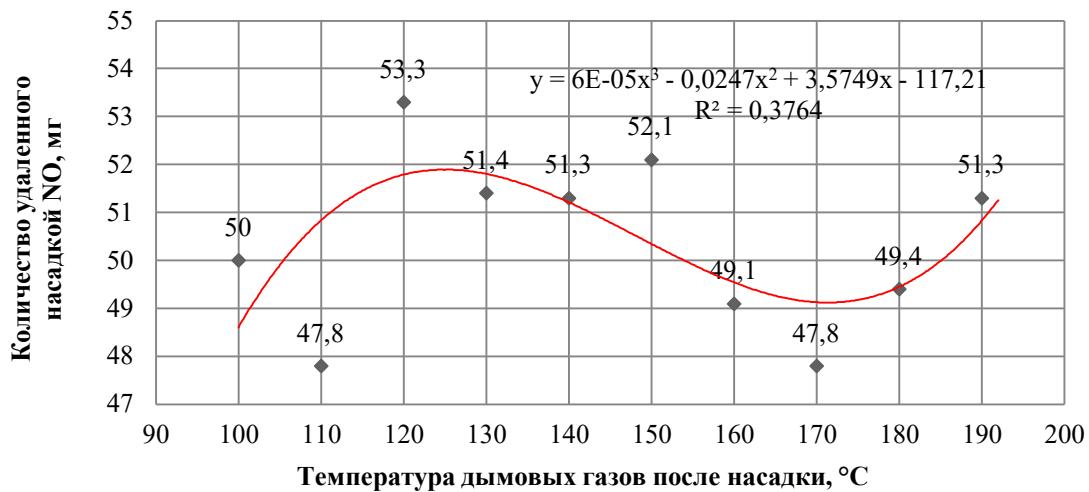


Рис. 6. График зависимости очистки дымовых газов от NO при различной температуре на входе в насадку

Fig. 6. Graph of the dependence of flue gas purification on NO at different temperatures at the inlet to the nozzle



Рис. 7. График зависимости очистки дымовых газов от NO_x при различной температуре на входе в насадку

Fig. 7. Graph of the dependence of flue gas purification on NO_x at different temperatures at the inlet to the nozzle

На графике зависимости очистки дымовых газов от CO₂ (рис. 5) наблюдается, что с увеличением температуры незначительно увеличивается степень очистки от CO₂. Очистка колеблется в пределах от 19,4 до 24,5 %.

Из графиков, отображающих зависимость очистки дымовых газов от ок-

сида углерода (II) и оксида азота (II), видно, что степень очистки дымовых газов имеет схожий характер и возрастает с повышением температуры дымовых газов.

На графике зависимости очистки дымовых газов от NO (см. рис. 6) видно, что уровень очистки дымовых газов от

оксида азота (II) колеблется от 53,3% до 47,8%. С изменением температуры происходит незначительное изменение степени очистки дымовых газов.

Из графика зависимости очистки дымовых газов от NO_x (рис. 7) видно, что уровень очистки дымовых газов от оксида азота (II) колеблется от 54,1% до 49,0%. С увеличением температуры происходит незначительное уменьшение степени очистки дымовых газов.

Графические представления, демонстрирующие зависимость эффективности очистки дымовых газов от содержания оксидов азота (NO , NO_x), выявляют корреляцию между степенью очистки и изменением нагрузки теплогенератора. Это наблюдение обусловлено тем, что NO_x включает в себя какmonoоксид азота (NO), так и диоксид азота (NO_2), что обуславливает их совместнуюдинамику в процессе очистки.

Применение предлагаемой опытно-промышленной установки обеспечивает значительное снижение концентраций вредных веществ в дымовых газах. В частности, содержание оксидов азота, включая NO и NO_x , уменьшается на 48-55%, что свидетельствует о высокой эффективности системы. Концентрация оксида углерода (CO) снижается до 27,7%, а уровень диоксида углерода (CO_2) уменьшается на 15,6-26,7%, что также подтверждает значительное улучшение экологической обстановки.

Использование доменного шлака в качестве адсорбента обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными адсорбентами. Высокое содержание

основных оксидов, таких как CaO , MgO , FeO , в доменных шлаках способствует эффективному протеканию процессов хемосорбции с кислыми оксидами, присутствующими в дымовых газах. Это обеспечивает высокую степень адсорбции вредных веществ.

Еще одним важным преимуществом является минимальное образование побочных продуктов реакций при использовании доменного шлака в качестве адсорбента. Это снижает нагрузку на окружающую среду и упрощает обслуживание установки и снижает риск аварийных ситуаций.

Доменный шлак обладает высокой механической прочностью, что исключает образование трещин и пыления в процессе эксплуатации. Это значительно упрощает обслуживание установки и снижает риск аварийных ситуаций.

Простота эксплуатации и легкость замены отработанного адсорбента делает процесс использования доменного шлака экономически выгодным и эффективным.

Экономическая целесообразность применения доменного шлака обусловлена его низкой рыночной стоимостью по сравнению с другими адсорбентами. Например, стоимость доменного шлака на два порядка ниже стоимости активированного угля, что делает его более привлекательным с точки зрения затрат.

Выводы

1. Опытно-промышленная установка очистки дымовых газов теплогенераторов систем поквартирного теплоснаб-

жения позволяет уменьшить содержание оксидов азота (NO_x , в том числе и NO) в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, на 50-55%; содержание оксида углерода II (CO) в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, до 27,7%; содержание диоксида углерода (CO_2) в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, на 16,7-26,7%.

2. Для обеспечения рациональной работы опытно-промышленной установки по очистке дымовых газов, установленной в теплогенераторе АОГВ теплоизводительностью 23,2 кВт, необходимо использовать доменный шлак с гранулами размером от 5 до 10 мм объемом 0,014 м³, что позволяет системе фильтрации эффективно работать в номинальных условиях.

3. Установка демонстрирует высокую эффективность очистки дымовых газов в течение 720 часов между процессами регенерации доменного шлака, что говорит о надежности и долговечности системы, а также о её способности поддерживать стабильные показатели очистки в течение длительного времени.

4. Количество воды, необходимое для проведения одного цикла процесса регенерации, равно 52,5 кг.

5. Полученные зависимости позволяют рассчитывать основные параметры процесса адсорбции и размеры адсорбера.

Таким образом, наиболее рациональным для теплогенераторов автономного теплоснабжения методом управления экологическими параметрами является метод, основанный на адсорбционной очистке с применением в качестве адсорбента гранулированного доменного шлака, обеспечивающий эффективное удаление вредных компонентов из дымовых газов, путем установки компактного адсорбера. Этот метод позволяет:

- управлять экологическими параметрами теплогенераторов поквартирных систем теплоснабжения путем снижения вредных выбросов в дымовых газах;
- производить очистку дымовых газов при температурах уходящих газов. Это исключает необходимость отвода и утилизации конденсата;
- повышать технико-экономические и экологические параметры теплогенерирующей системы поквартирного теплоснабжения за счет снижения концентрации вредных веществ в городском массиве. Это создает условия для создания биосферосовместимых зданий в городах.

Список литературы

1. Носков А.С., Пай З.П. Технологические методы защиты атмосферы от вредных выбросов на предприятиях энергетики. Новосибирск, 1996. 156 с.
2. Попова Н.М. Катализаторы очистки газовых выбросов промышленных производств. Алма-Ата: Наука, Каз ССР, 1991. 176 с.
3. Приготовление и исследование блочных катализаторов со вторичным термостабильным покрытием для очистки газов от органических соединений / З.Р. Исмагилов,

Р.А. Шкрабина, Д.А. Арендарский, Н.В. Шикина // Кинетика и катализ. 1998. Т.39, №5. С. 653-656.

4. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
5. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.
6. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. М.: Издательство академической военной химической защиты, 1972. 127 с.
7. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды. Пенза, 2002. 290 с.
8. Соколенко Н. С., Ежов В. С. Экспериментальное определение эффективности очистки дымовых газов от вредных компонентов теплогенераторов систем автономного теплоснабжения жилых зданий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2013. № 2(2). С. 77-81.
9. Михайлов А. Н., Ежов В. С., Сайков И. Г. Применение гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента при очистке дымовых газов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 7(1055). С. 52-54. EDN DFFRHO.
10. Михайлов А. Н., Ежов В. С., Семичева Н. Е. Целесообразность использования гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента установки очистки дымовых газов теплогенератора системы автономного теплоснабжения // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 3(1027). С. 59-61. EDN AWTMLY.
11. Ежов В. С. Экологические резервы повышения экономической эффективности теплогенераторов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 2. С. 37-40.
12. Ежов В. С., Семичева Н. Е., Бурцев А. П. Технологии использования гранулированного доменного шлака для очистки газообразных продуктов сгорания и атмосферного воздуха от вредных компонентов. Курск, 2021. 127 с. EDN VVNFS.
13. Ежов В. С., Семичева Н. Е., Бурцев А. П. Инновационные технологии повышения экологических и энергосберегающих характеристик теплогенераторов. Курск, 2020. 157 с. EDN QROPXH.
14. Использование гранулированных доменных шлаков для очистки газообразных продуктов сгорания и атмосферного воздуха от вредных компонентов / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Н. В. Бредихина [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 6. С. 44-48. EDN PTSLMW.
15. Экспериментальное исследование процесса очистки дымовых газов от вредных компонентов с использованием гранулированного доменного шлака / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 4. С. 10-14. DOI 10.18412/1816-0395-2024-4-10-14. EDN DXWGXT.
16. Использование инновационного метода адсорбционной очистки дымовых газов / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 4(1016). С. 10-12. EDN WBITGY.

17. Грэдинарь Е., В Ежов. С., Бурцев А. П. Использование гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента для очистки дымовых газов теплогенераторов систем автономного теплоснабжения // Инженерные системы и сооружения. 2024. 3(57). С. 69-76. EDN PXMQBS.
18. Исследование вредных выбросов теплогенерирующих установок в окружающую среду и методы их снижения / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 11(1071). С. 46-48. EDN DGBCPs.
19. Исследование физических и химических свойств доменных шлаков в процессе адсорбции и очистки газообразных продуктов сгорания от вредных компонентов / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 11(1071). С. 49-51. EDN SRQHHG.
20. Повышение экологической безопасности источников производства тепловой энергии в условиях городской среды / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, В. Е. Пахомов, А. А. Лисунов // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2023. № 2(52). С. 39-43. EDN TQVQOU.

References

1. Noskov A.S., Pai Z.P. Technological methods of protecting the atmosphere from harmful emissions at energy enterprises. Novosibirsk; 1996. 156 p. (In Russ.).
2. Popova N.M. Catalysts for cleaning gas emissions from industrial plants. Alma Ata: Nauka, Kaz SSR; 1991. 176 p. (In Russ.).
3. Ismagilov Z.R., Shkrabina R.A., Arendarsky D.A., Shikina N.V. Preparation and investigation of block catalysts with a secondary thermostable coating for gas purification from organic compounds. *Kinetika i kataliz = Kinetics and catalysis*. 1998; 39(5): 653-656. (In Russ.).
4. Ramm V.M. Absorption of gases. Moscow: Khimiya; 1976. 656 p. (In Russ.).
5. Keltsev N.V. Fundamentals of adsorption technology. Moscow: Chemistry; 1984. 592 p. (In Russ.).
6. Dubinin M.M. Adsorption and porosity. Moscow: Izdatel'stvo akademicheskoi voennoi khimicheskoi zashchity; 1972. 127 p. (In Russ.).
7. Vetoshkin A.G. Theoretical foundations of environmental protection. Penza; 2002. 290 p. (In Russ.).
8. Sokolenko N. S., Yezhov V. S. Experimental determination of the effectiveness of flue gas purification from harmful components of heat generators of autonomous heat supply systems for residential buildings. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii = Biospheric compatibility: man, region, technology*. 2013; (2): 77-81. (In Russ.).

9. Mikhailov A. N., Yezhov V. S., Saikov I. G. The use of granular blast furnace slag as an adsorbent in flue gas purification. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2022; (7): 52-54. (In Russ.). EDN DFFRHO.
10. Mikhailov A. N., Yezhov V. S., Semicheva N. E. Expediency of using granular blast furnace slag as an adsorbent of a flue gas treatment plant for a heat generator of an autonomous heat supply system. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2020; (3): 59-61. (In Russ.). EDN AWTMLY.
11. Yezhov V. S. Ecological reserves for increasing the economic efficiency of heat generators. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and oil and gas engineering*. 2015; (2): 37-40. (In Russ.).
12. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P. Technologies of using granular blast furnace slag for purification of gaseous combustion products and atmospheric air from harmful components. Kursk; 2021. 127 p. (In Russ.). EDN VVNFSC.
13. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P. Innovative technologies for improving the environmental and energy-saving characteristics of heat generators. Kursk; 2020. 157 p. (In Russ.). EDN QROPXP.
14. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Bredikhina N. V., et al. The use of granular blast furnace slags for the purification of gaseous combustion products and atmospheric air from harmful components. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and oil and gas engineering*. 2019; (6): 44-48. (In Russ.). EDN PTSLMW.
15. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. Experimental study of the flue gas purification process from harmful components using granular blast furnace slag. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2024; 28(4): 10-14. (In Russ.). DOI 10.18412/1816-0395-2024-4-10-14. EDN DXWGXT.
16. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., et al. The use of an innovative method of adsorption purification of flue gases. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2019; (4): 10-12. (In Russ.). EDN WBITGY.
17. Gradinar E., Yezhov V. S., Burtsev A. P. The use of granular blast furnace slag as an adsorbent for cleaning flue gases of heat generators of autonomous heat supply systems. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya = Scientific Journal. Engineering systems and structures*. 2024; (3): 69-76. (In Russ.). EDN PXMQBS.
18. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. Study of harmful emissions of heat generating plants into the environment and methods of their reduction. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2023; (11): 46-48. (In Russ.). EDN DGBCPS.
19. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. Investigation of the physical and chemical properties of blast furnace slags in the process of adsorption and purification of gaseous combustion products from harmful components. *BST: Byulleten'*

stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery. 2023; (11): 49-51. (In Russ.). EDN SRQHHG.

20. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Pakhomov V. E., Lisunov A. A. Improving the environmental safety of heat energy production sources in an urban environment. *Nauchnyi zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniy = Scientific Journal. Engineering systems and structures.* 2023; (2): 39-43. (In Russ.). EDN TQVQOU.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ежов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных теплоэнергетических систем, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-5610>, ScopusID: P-4377-2015

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Седых Александр Николаевич, студент кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sedyx06@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7007-8806>

Сологубова Анна Владимировна, студент кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: anasologubova600@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8113-5885>

Базартинова Арина Анатольевна, студент кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: arinabazartinova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3411-2241>

Vladimir S. Yezhov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-5610>, ScopusID: P-4377-2015

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexander N. Sedykh, Student of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sedyx06@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7007-8806>

Anna V. Sologubova, Student of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: anasologubova600@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8113-5885>

Arina A. Bazartinova, Student of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: arinabazartinova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3411-2241>