

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2026, Том 13, № 3 / 2026, Vol. 13, Iss. 3 <https://resources.today/issue-3-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/02ECOR326.pdf>

DOI: 10.15862/02ECOR326 (<https://doi.org/10.15862/02ECOR326>)

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Фадеев, В. В. Сравнительная эколого-токсикологическая оценка водогрейных и паровых котлов, работающих на природном газе, по эксплуатационным данным / В. В. Фадеев, В. Е. Пинаев, В. Р. Ариас Ордоньес // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 3. — URL: <https://resources.today/PDF/02ECOR326.pdf>.
DOI: 10.15862/02ECOR326.

For citation:

Fadeev V.V., Pinaev V.E., Arias Ordonez W.R. Comparative environmental and toxicological assessment of hot-water and steam boilers fueled by natural gas based on operational data. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026;13(3): 02ECOR326. Available at: <https://resources.today/PDF/02ECOR326.pdf>.
DOI: 10.15862/02ECOR326. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 338.45.01

Фадеев Владислав Викторович

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия
Институт экологии
E-mail: fadeev.vladislav@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2439-8127>

Пинаев Владимир Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия
Институт экологии
Доцент Департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции
Кандидат экономических наук, доцент
E-mail: pinaev-ve@rudn.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8943-5462>

Ариас Ордоньес Винстон Родольфо

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия
Институт экологии
E-mail: rodolfoarias@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3672-7469>

**Сравнительная эколого-токсикологическая
оценка водогрейных и паровых котлов, работающих на
природном газе, по эксплуатационным данным**

Аннотация. В публикации изложены итоги сопоставительного анализа влияния водогрейных и паровых котлов, функционирующих на природном газе, на качество окружающей среды и состояние популяционного здоровья. Обусловленность настоящего исследования связана с наличием обширного парка морально устаревшего котельного оборудования в Российской Федерации, что детерминирует необходимость обоснованного выбора экологически преференциальных технологий производства тепловой энергии. Авторами охарактеризованы патогенетические эффекты ключевых поллютантов (оксидов азота, диоксида серы, бенз(а)пирена, взвешенных частиц). Путем обработки эксплуатационных параметров 215 водогрейных и 147 паровых агрегатов исчислены удельные показатели

выбросов в пересчете на единицу сжигаемого топлива и генерируемой тепловой энергии, установлены часовые потоки эмиссии, определены объемы парниковых газов и рассчитан экономический ущерб (в форме платы за негативное воздействие). Эмпирически подтверждено, что совокупные удельные выбросы загрязняющих веществ от парового котла превосходят соответствующие значения для, водогрейного в 1,92 раза, тогда как исчисленный экономический ущерб оказывается выше в 5,91 раза при идентичности климатических параметров регионов дислокации. Доминирующую роль в формировании означенного разрыва играет бенз(а)пирен, эмиссионный поток которого для парового котла на порядок превышает аналогичный показатель для водогрейного. Резюмируется вывод о существенно более выраженной экологической угрозе, исходящей от паровых котлов, даже в условиях использования газообразного энергоносителя. Полученные результаты могут служить базой для аргументации при выборе типа оборудования в рамках реконструкции и модернизации систем теплоснабжения.

Ключевые слова: водогрейный котел; паровой котел; эмиссия загрязняющих веществ; бенз(а)пирен; экономический ущерб; атмосферный воздух; природный газ

Введение

Теплоэнергетика — критически важная отрасль РФ, обеспечивающая жизнедеятельность населения и производств в условиях продолжительного холода. Основу систем теплоснабжения составляют водогрейные и паровые котлы. Первые преимущественно используются в коммунально-бытовом секторе для отопления и горячего водоснабжения, вторые — на теплоэлектростанциях и промышленных объектах для технологических нужд и выработки электроэнергии. Значительный износ оборудования, длительный срок эксплуатации и ужесточение экологических требований делают актуальным сравнительный анализ воздействия этих типов установок на окружающую среду и здоровье человека.

Актуальность обусловлена тремя факторами. Во-первых, в РФ эксплуатируется множество котлов возрастом 20–30 лет с низкой эффективностью и повышенными выбросами. масштаб модернизации исчисляется тысячами единиц и несет большой природоохранный потенциал. Во-вторых, ужесточение законодательства и стандартов качества воздуха требует перехода на экологичные решения, однако выбор между водогрейными и паровыми котлами часто делается без учета их сравнительных экологических характеристик. В-третьих, в литературе преобладают разрозненные исследования, а комплексного сопоставительного анализа на реальных данных практически нет. Заполнение этого пробела важно для обоснованного выбора оборудования с позиции экологии и экономики.

Цель работы — сравнительный анализ воздействия водогрейного и парового котлов на среду и здоровье человека на основе литературных данных, теоретических подходов и расчетов по фактическим эксплуатационным показателям.

Методы

В работе подвергнуты анализу данные эксплуатации, включая сведения о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, отраженные в таблицах 1, 2, по 215 водогрейным и 147 паровым котлам, функционирующим на природном газе, которые, собственно, и выступают объектом настоящего исследования.

Таблица 1

**Наименование выбрасываемых водогрейным котлом
загрязняющих веществ и их суммарное выбрасываемое количество**

№ п/п	Наименование	Количество выбрасываемых загрязняющих веществ от 215 водогрейных котлов, т/г	Среднее количество выбрасываемых загрязняющих веществ от водогрейного котла, т/г
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	6 451,38	30,01
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	1 063,68	4,95
3	Углерод (Сажа)	30,77	0,14
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	3 381,37	15,73
5	Углерод оксид	1 415,10	6,58
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	0,01	$5,34 \cdot 10^{-6}$
7	Мазутная зола	15,61	0,07

Составлено авторами

Таблица 2

**Наименование выбрасываемых паровым котлом
загрязняющих веществ и их суммарное выбрасываемое количество**

№ п/п	Наименование	Количество выбрасываемых загрязняющих веществ от 215 водогрейных котлов, т/г	Среднее количество выбрасываемых загрязняющих веществ от водогрейного котла, т/г
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	6 746,39	45,89
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	1 105,97	7,52
3	Углерод (Сажа)	47,20	0,32
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	4 854,64	33,02
5	Углерод оксид	749,24	5,10
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	0,09	0,0001
7	Мазутная зола	27,95	0,19

Составлено авторами

Среднегодовое время работы водогрейного агрегата составило 4397,33 ч/год, парового — 4897,26 ч/год. Среднегодовой расход природного газа для водогрейного котла зафиксирован на уровне 10 970,88 тыс. м³/год, для парового — 9153,24 тыс. м³/год. Коэффициент полезного действия обоих типов котлов принят равным 0,92. Агрегаты размещены в пределах Москвы и Московской области. Указанные данные послужили основой для расчета характеристик водогрейного и парового котлов по следующим группам показателей: удельные выбросы загрязняющих веществ на единицу израсходованного топлива, удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии, часовые выбросы, эмиссия парниковых газов, а также экономический ущерб (плата за негативное воздействие на окружающую среду).

Ограничением проведенного исследования выступает тот факт, что используемая информация относится исключительно к котлам, работающим на природном газе; при этом периодическое использование резервного жидкого топлива (например, мазута) в расчет не принималось. Кроме того, ввиду отсутствия соответствующих данных, не рассматривались системы очистки дымовых газов, наличие которых могло бы существенно трансформировать эмиссионный профиль.

Расчетные показатели для каждого типа котла определялись следующим образом:

- Удельные выбросы на единицу топлива¹:

$$q_i = M_i / G_{\text{год}}, \quad (1)$$

¹ Временные методические указания по установлению технических (максимально допустимых) нормативов удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для действующих котельных установок. — Москва: АООТ «ВТИ», 2001. — 38 с.

где:

M_i — годовой выброс загрязняющего вещества, т/год;

$G_{\text{год}}$ — средний годовой расход природного газа для одного котла, тыс. м³/год.

- Удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии²:

$$q_i = M_i / Q_{\text{год}} = M_i / (G_{\text{год}} \cdot Q_{\text{нр}} \cdot \eta), \quad (2)$$

где:

M_i — годовой выброс загрязняющего вещества, т/год;

$G_{\text{год}}$ — средний годовой расход природного газа для одного котла, тыс. м³/год;

$Q_{\text{нр}}$ — теплота сгорания природного газа, Гкал/м³;

η — коэффициент полезного действия.

- Часовые выбросы — отношение средней массы выбросов загрязняющих веществ к среднему времени работы за год:

$$M_{i\text{час}} = M_i / t_{\text{год}}, \quad (3)$$

где:

M_i — годовой выброс загрязняющего вещества, т/год;

$t_{\text{год}}$ — время работы котла за год, ч.

- Выбросы парниковых газов в CO₂-эквиваленте³:

$$E_i = G_{\text{год}} \cdot K_i \cdot \text{GWP}, \quad (4)$$

где:

$G_{\text{год}}$ — средний годовой расход природного газа для одного котла, тыс. м³/год;

K_i — эмиссионный коэффициент;

GWP — потенциал глобального потепления.

- Экономический ущерб (плата за выбросы)⁴:

² Методика расчета и установления максимальных допустимых удельных выбросов для действующих котельных установок тепловых электростанций: СТО 70238424.13.020.30.002-2010. — Москва: НП «ИНВЭЛ», 2010. — 33 с.

³ Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации: распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 г. № 15-р. — Текст: электронный // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». — URL: <https://base.garant.ru/71135950/> (дата обращения: 16.06.2026).

Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации: приказ Минприроды России от 30.06.2015 г. № 300. — Текст: электронный // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71183290/> (дата обращения: 16.06.2026).

⁴ О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах: постановление Правительства Российской Федерации от 13 сентября 2016 г. № 913. — Текст: электронный // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». — URL: <https://base.garant.ru/71489914/> (дата обращения: 16.06.2026).

Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и отдельного положения акта Правительства Российской Федерации: постановление Правительства Российской Федерации от 31 мая 2023 г. № 881. — Текст: электронный // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406865936/> (дата обращения: 16.06.2026).

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10 июля 2025 г. № 1852-р. — Текст: электронный // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/412220162/> (дата обращения: 16.06.2026).

$$\Pi = \Sigma (M_i \cdot \text{Ставка платы}_i \cdot K_{\text{инф}} \cdot K_{\text{экол}}), \quad (5)$$

где:

M_i — годовой выброс загрязняющего вещества, т/год;

Ставка платы_{*i*} — фиксированный размер платежей, которые устанавливаются Правительством РФ для расчета платы за конкретные виды негативного воздействия на окружающую среду, руб.;

$K_{\text{инф}}$ — коэффициент инфляции;

$K_{\text{экол}}$ — коэффициент экологической значимости региона.

Расчеты

Удельные выбросы на единицу топлива. Для определения удельных выбросов на единицу топлива была использована следующая формула: $q_i = M_i / G_{\text{год}}$ (1), где M_i — годовой выброс загрязняющего вещества, т/год; $G_{\text{год}}$ — средний годовой расход природного газа для одного котла, тыс. м³/год.⁵ $G_{\text{год}}$ для водогрейного котла составляет 10 970,88 тыс. м³/год, для парового — 9153,24 тыс. м³/год. Результаты расчетов представлены в таблицах 3, 4.

Таблица 3

Удельные выбросы загрязняющих веществ водогрейным котлом на единицу топлива

№ п/п	Наименование	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год	Удельные выбросы на единицу топлива, т/г
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	30,01	$2,7 \cdot 10^{-3}$
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	4,95	$4,5 \cdot 10^{-4}$
3	Углерод (Сажа)	0,14	$1,3 \cdot 10^{-5}$
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	15,73	$1,4 \cdot 10^{-3}$
5	Углерод оксид	6,58	$6,0 \cdot 10^{-4}$
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$5,34 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$
7	Мазутная зола	0,07	$6,6 \cdot 10^{-6}$
Итого		57,48	$5,2 \cdot 10^{-3}$

Составлено авторами

Таблица 4

Удельные выбросы загрязняющих веществ паровым котлом на единицу топлива

№ п/п	Наименование	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год	Удельные выбросы на единицу топлива, т/г
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	45,89	$5,0 \cdot 10^{-3}$
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	7,52	$8,2 \cdot 10^{-4}$
3	Углерод (Сажа)	0,32	$3,5 \cdot 10^{-5}$
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	33,02	$3,6 \cdot 10^{-3}$
5	Углерод оксид	5,10	$5,6 \cdot 10^{-4}$
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	0,0001	$1,0 \cdot 10^{-7}$
7	Мазутная зола	0,19	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Итого		92,05	$1 \cdot 10^{-2}$

Составлено авторами

Удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии. Удельные выбросы на единицу произведенной энергии представляют собой отношение M_i (годовой выброс загрязняющего вещества, т/год) к $Q_{\text{год}}$ (единица произведенной тепловой энергии, Гкал/год).

⁵ Временные методические указания по установлению технических (максимально допустимых) нормативов удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для действующих котельных установок. — Москва: АООТ «ВТИ», 2001. — 38 с.

Для определения удельных выбросов на единицу произведенной тепловой энергии была использована следующая формула: $Q_{\text{год}} = G_{\text{год}} \cdot Q_{\text{нр}} \cdot \eta$ (2), где: $G_{\text{год}}$ — средний годовой расход природного газа для одного водогрейного котла, тыс. м³/год; $Q_{\text{нр}}$ — теплота сгорания природного газа, Гкал/м³; η — коэффициент полезного действия.²

$G_{\text{год}}$ для водогрейного котла составляет 10 970,88 тыс. м³/год, для парового — 9153,24 тыс. м³/год; $Q_{\text{нр}}$ составляет $8,33 \cdot 10^{-6}$ Гкал/м³; η как для водогрейного, так и парового котлов составляет 92 %. Результаты расчетов представлены в таблицах 5, 6.

Таблица 5

**Удельные выбросы загрязняющих веществ
водогрейным котлом на единицу произведенной тепловой энергии**

№ п/п	Наименование	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год	Удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии, кг/Гкал
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	30,01	0,357
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	4,95	0,059
3	Углерод (Сажа)	0,14	0,002
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	15,73	0,187
5	Углерод оксид	6,58	0,078
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$5,34 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-7}$
7	Мазутная зола	0,07	0,001
Итого		57,48	0,684

Составлено авторами

Таблица 6

**Удельные выбросы загрязняющих веществ
паровым котлом на единицу произведенной тепловой энергии**

№ п/п	Наименование	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год	Удельные выбросы на единицу произведенной тепловой энергии, кг/Гкал
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	45,89	0,654
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	7,52	0,107
3	Углерод (Сажа)	0,32	0,005
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	33,02	0,471
5	Углерод оксид	5,10	0,073
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	0,0001	$9 \cdot 10^{-6}$
7	Мазутная зола	0,19	0,003
Итого		92,05	1,312

Составлено авторами

Выбросы котла за час. Средние выбросы в час от одного котла определяются как отношение средней массы выбросов загрязняющих веществ к среднему времени работы за год ($M_{\text{час}} = M_i / t_{\text{год}}$, (3)). Среднее время работы водогрейного котла в год составляет 4397,33 ч/год, парового — 4897,26 ч/год. Результаты расчетов представлены в таблицах 7, 8.

Таблица 7

Средние выбросы загрязняющих веществ водогрейным котлом за час работы

№ п/п	Наименование	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	30,01	0,007
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	4,95	0,001
3	Углерод (Сажа)	0,14	$3,3 \cdot 10^{-5}$
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	15,73	0,004
5	Углерод оксид	6,58	0,001
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$5,34 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
7	Мазутная зола	0,07	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Итого		57,48	0,013

Составлено авторами

Таблица 8

Средние выбросы загрязняющих веществ паровым котлом за час работы

№ п/п	Наименование	Годовой выброс загрязняющего вещества, т/год	Годовой выброс аэрирующего вещества, т/год
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	45,89	0,009
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	7,52	0,002
3	Углерод (Сажа)	0,32	$6,6 \cdot 10^{-5}$
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	33,02	0,007
5	Углерод оксид	5,10	0,001
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	0,0001	$1,3 \cdot 10^{-7}$
7	Мазутная зола	0,19	$3,9 \cdot 10^{-5}$
	Итого	92,05	0,019

Составлено авторами

Средние выбросы парниковых газов. Средние выбросы парниковых газов для одного котла могут быть определены через произведение среднегодового расхода топлива на эмиссионный коэффициент ($E_i = G_{\text{год}} \cdot K_i \cdot \text{GWP}$ (4)). В рамках настоящей работы определение средних выбросов парниковых газов будут определяться через прямые выбросы CO_2 , CH_4 , N_2O , которым соответствуют эмиссионные коэффициенты 1,96, 0,001, 0,0001.

Итак, прямые выбросы CO_2 для одного водогрейного котла составляют $E_{\text{CO}_2} = G_{\text{год}} \cdot K_{\text{CO}_2} = 10\,970,88 \cdot 1,96 = 21\,502,92$ т CO_2 /год, прямые выбросы E_{CH_4} — 10,97 т CH_4 /год, прямые выбросы $E_{\text{N}_2\text{O}}$ — 1,1 т N_2O /год. Для дальнейшего расчета необходимо преобразовать размерности прямых выбросов метана и оксида азота в CO_2 -эквивалент, что осуществляется посредством применения показателя потенциала глобального потепления (GWP), равного двадцати восьми для метана и двумстам шестидесяти пяти для оксида азота. Так, $E_{\text{CH}_4} = 10,97 \cdot 28 = 307,18$ т CO_2 -экв/год, $E_{\text{N}_2\text{O}} = 1,1 \cdot 265 = 290,73$ т CO_2 -экв/год. Суммарный выброс парниковых газов от водогрейного котла $E_{\text{общ}}$ представляет собой сумму E_{CO_2} , E_{CH_4} , $E_{\text{N}_2\text{O}}$ и составляет 22 100,84 т CO_2 -экв/год. В свою очередь, прямые выбросы CO_2 для одного парового котла составляют $E_{\text{CO}_2} = G_{\text{год}} \cdot K_{\text{CO}_2} = 9153,24 \cdot 1,96 = 17\,940,35$ т CO_2 /год, прямые выбросы E_{CH_4} — 9,15 т CH_4 /год, прямые выбросы $E_{\text{N}_2\text{O}}$ — 0,92 т N_2O /год. Для дальнейшего расчета необходимо преобразовать размерности прямых выбросов метана и оксида азота в CO_2 -эквивалент, что осуществляется посредством применения показателя потенциала глобального потепления (GWP), равного двадцати восьми для метана и двумстам шестидесяти пяти для оксида азота. Так, $E_{\text{CH}_4} = 9,15 \cdot 28 = 256,29$ т CO_2 -экв/год, $E_{\text{N}_2\text{O}} = 0,92 \cdot 265 = 242,56$ т CO_2 -экв/год. Суммарный выброс парниковых газов от водогрейного котла $E_{\text{общ}}$ представляет собой сумму E_{CO_2} , E_{CH_4} , $E_{\text{N}_2\text{O}}$ и составляет 18 439,2 т CO_2 -экв/год. Также были произведены расчет удельных показателей выбросов парниковых газов от одного парового котла, показывающий, что на единицу произведенной тепловой энергии в атмосферу выбрасывается 0,26 т CO_2 -экв/Гкал (получено через отношение суммарных выбросов парниковых газов от водогрейного котла к единице произведенной тепловой энергии ($Q_{\text{год}}$)); расчет выбросов парниковых газов на единицу расхода топлива ($G_{\text{год}}$), составляющий 2,01 т CO_2 -экв/тыс.м³ (определено через отношение суммарных выбросов парниковых газов от водогрейного котла к среднегодовому расходу топлива).

Экономический ущерб. Расчет экономического ущерба, подразумевающий плату за негативное воздействие на окружающую среду, был произведен по следующей формуле: $P = \sum (M_i \cdot \text{Ставка платы}_i \cdot K_{\text{инф}} \cdot K_{\text{экол}})$ (5), где M_i — годовой выброс загрязняющего вещества, т/год; Ставка платы_{*i*}; $K_{\text{инф}}$ — коэффициент инфляции (на июнь 2026 года $K_{\text{инф}}$ равняется 1,32); $K_{\text{экол}}$ — коэффициент экологической значимости региона (рассматриваемые в настоящей работе котлы функционируют в Москве и Московской области, поэтому $K_{\text{экол}}$ равен 1,2). Полученные результаты для каждого загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферу, представлены в таблице 9.

В качестве примечания необходимо отметить, что расчет экономического ущерба для мазутной золы не производился по причине отсутствия показателя ставки платы за тонну выброса мазутной золы в Распоряжении Правительства Российской Федерации от 10 июля 2025 г. № 1852-р.

Таблица 9

Результаты расчета экономического ущерба для каждого загрязняющего вещества

№ п/п	Наименование	Ставка платы, руб/т	Плата за выброс ЗВ водогрейным котлом, руб/г	Плата за выброс ЗВ паровым котлом, руб/г
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	209,59	9 961,85	15 236,31
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	141,19	1 106,45	1 682,61
3	Углерод (Сажа)	209,59	47,52	106,59
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	68,55	1 707,72	3 585,93
5	Углерод оксид	2,42	25,23	19,54
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$1,1 \cdot 10^{-8}$	9 398,28	110 775,78
Итого			22 247,06	131 406,76

Составлено авторами

Результаты

В процессе функционирования водогрейного и парового котлов в атмосферный воздух поступают следующие загрязняющие вещества: диоксид азота (оксид азота (V)); оксид азота (I) (оксид азота); углерод (сажа); диоксид серы (сернистый ангидрид); оксид углерода; бенз(а)пирен (3,4-бензпирен); мазутная зола.

Диоксид азота (NO_2) — газ желто-бурого цвета с резким запахом. При нагреве диссоциирует на NO и O_2 , с водой образует азотную и азотистую кислоты, проявляет окислительные свойства. Обладает выраженным токсическим действием и коррозионной агрессивностью [1, 2]. Согласно Постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 22 декабря 2017 г. № 165 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» (далее — Постановление)⁶, диоксид азота отнесен к третьему классу опасности, при этом предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест установлена на уровне $0,2 \text{ мг/м}^3$, а среднесуточная (ПДК с.с.) — $0,04 \text{ мг/м}^3$.

Оксид азота (II) (NO) — бесцветный газ, без запаха при низких концентрациях. Легко окисляется до NO_2 , с влагой воздуха способствует образованию кислот, участвуя в выпадении кислотных осадков и формировании вторичных аэрозолей [3; 4]. Согласно Постановлению, оксид азота (I) относится к третьему классу опасности, предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест составляет $0,4 \text{ мг/м}^3$, среднесуточная (ПДК с.с.) — $0,06 \text{ мг/м}^3$.

Углерод (C) — черные тонкодисперсные частицы аморфного углерода с примесями водорода, кислорода и адсорбированных ПАУ. Удельная поверхность достигает $90 \text{ м}^2/\text{г}$, что способствует удержанию канцерогенов и многократному усилению токсического потенциала выбросов [5; 6].

⁶ Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений»: постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 22 декабря 2017 г. № 165 (зарегистрировано в Минюсте Российской Федерации 09.01.2018 г. № 49557). — Текст: электронный // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71750374/> (дата обращения: 16.06.2026). Примечание автора: данная сноска относится ко всем местам раздела, где упоминается данный НПА.

Согласно Постановлению, углерод (сажа) относится к четвертому классу опасности, предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест установлена на уровне $0,15 \text{ мг/м}^3$, а среднесуточная (ПДК с.с.) — $0,05 \text{ мг/м}^3$.

Диоксид серы (SO_2) — бесцветный газ с резким запахом, тяжелее воздуха. Хорошо растворяется в воде, образуя сернистую кислоту; в присутствии окислителей переходит в серную, являясь ключевым фактором кислотных дождей [7; 8]. Согласно Постановлению, диоксид серы относится к третьему классу опасности, предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест составляет $0,5 \text{ мг/м}^3$, среднесуточная (ПДК сс) — $0,05 \text{ мг/м}^3$.

Оксид углерода (CO) — бесцветный газ без вкуса и запаха, чуть легче воздуха. Практически нерастворим в воде; за счет тройной связи способен образовывать прочные комплексы с гемоглобином, что лежит в основе его высокой токсичности при незаметном накоплении [9; 10]. Согласно Постановлению, оксид углерода относится к третьему классу опасности, предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест составляет 5 мг/м^3 , среднесуточная (ПДК с.с.) — 3 мг/м^3 .

Бенз(а)пирен ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) — полициклический ароматический углеводород из пяти бензольных колец, типичный и повсеместный канцероген, приоритетный для всех процессов сжигания органического топлива [11; 12]. Согласно Постановлению, бенз(а)пирен отнесен к первому классу опасности, предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест не установлена, а среднесуточная (ПДК с.с.) составляет $1 \cdot 10^{-6} \text{ мг/м}^3$.

Мазутная зола — тонкодисперсный аэрозоль сложного состава. В отличие от угольной, содержит такие соединения, как оксид натрия (Na_2O) — 20–40 %, пентаоксид ванадия (V_2O_5) — 20–30 %, оксид кремния (SiO_2) — 5–20 %, триоксид железа (Fe_2O_3) — 3–20 %, оксид магния (MgO) — 3–10 %, триоксид серы (SO_3) — 20–40 %, оксид никеля (NiO) — 1–10 %, а также ряд других элементов в меньших концентрациях [13–15]. Согласно Постановлению, мазутная зола относится ко второму классу опасности, предельно допустимая максимальная разовая концентрация (ПДК м.р.) в атмосферном воздухе населенных мест не установлена, а среднесуточная (ПДК с.с.) составляет $0,002 \text{ мг/м}^3$.

Эмиссионные потоки водогрейных и паровых котлов содержат оксиды азота (NO , NO_2), диоксид серы (SO_3), оксид углерода (CO), твердые частицы (сажа, мазутная зола), полициклические ароматические углеводороды (включая бенз(а)пирен). Данные поллютанты способны индуцировать следующие последствия: подкисление почв (снижение pH на 1–2 единицы); аккумуляцию тяжелых металлов в верхних горизонтах (превышение фоновых значений в 5–20 раз); снижение активности почвенных ферментов на 30–50 %; гибель чувствительных видов лишайников; сокращение продолжительности жизни хвои у сосны с 3–5 до 1–2 лет; уменьшение радиального прироста на 40–60 %; закисление водных объектов ($\text{pH} < 5,0$), что с высокой вероятностью станет причиной исчезновения чувствительных видов зоопланктона и ихтиофауны. Паровые котлы дополнительно создают нагрузку за счет золоотвалов, содержащих ванадий, никель, мышьяк и радиоактивные элементы. Воздействие на организм человека реализуется через окислительный стресс, воспаление дыхательных путей, нарушение мукоцилиарного клиренса, иммуносупрессию и генотоксичность (образование ДНК-аддуктов в результате воздействия бенз(а)пирена).

Полученные в ходе исследования результаты представлены ниже.

Удельные выбросы загрязняющих веществ в пересчете на 1000 м^3 природного газа (табл. 10) демонстрируют, что по всем рассмотренным веществам, за исключением оксида углерода (CO), значения для водогрейного котла ниже, чем для парового. Наибольшее

превышение со стороны парового агрегата наблюдается по диоксиду серы (в 2,52 раза), диоксиду азота (в 1,83 раза) и бенз(а)пирену (в 20,4 раза). По оксиду углерода, напротив, водогрейный котел характеризуется более высоким удельным выбросом (на 7,7 %). Суммарная величина удельных выбросов всех семи загрязняющих веществ для парового котла оказалась в 1,92 раза выше, чем для водогрейного. Это свидетельствует о том, что при сжигании одинакового объема природного газа паровой котел формирует существенно большую массу выбросов, что обусловлено более высокими температурами горения и, как следствие, более интенсивным образованием оксидов азота и серы, а также неполнотой сгорания, приводящей к повышенной эмиссии бенз(а)пирена.

Таблица 10

Сравнение удельных выбросов водогрейного и парового котлов на единицу топлива (жирным шрифтом выделено большее значение)

№ п/п	Наименование ЗВ	Удельные выбросы водогрейного котла на единицу топлива, т/тыс.м ³	Удельные выбросы парового котла на единицу топлива, т/тыс.м ³
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	0,0027351	0,0050139
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	0,0004510	0,0008220
3	Углерод (Сажа)	0,0000130	0,0000351
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	0,0014336	0,0036080
5	Углерод оксид	0,0005999	0,0005568
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	0,0000000049	0,0000001
7	Мазутная зола	0,0000066	0,0000208
	Итого	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Составлено авторами

При сопоставлении удельных выбросов в расчете на 1 Гкал выработанной теплоты (табл. 11) сохраняется та же тенденция: паровой котел превосходит водогрейный по всем показателям, кроме оксида углерода. Наиболее значительное различие фиксируется по бенз(а)пирену (в 14 раз), диоксиду серы (в 2,52 раза) и диоксиду азота (в 1,83 раза). Удельный выброс оксида углерода у водогрейного котла выше на 7,7 %. Суммарный удельный выброс загрязняющих веществ (в кг/Гкал) для парового котла превышает аналогичный показатель для водогрейного в 1,92 раза. Данный результат подтверждает, что паровой котел, даже с учетом его более высокой тепловой эффективности, остается более «грязным» источником в расчете на единицу полезно отпущенной энергии.

Таблица 11

Сравнение удельных выбросов водогрейного и парового котлов на единицу произведенной тепловой энергии (жирным шрифтом выделено большее значение)

№ п/п	Наименование ЗВ	Удельные выбросы водогрейного котла на единицу произведенной тепловой энергии, кг/Гкал	Удельные выбросы парового котла на единицу произведенной тепловой энергии, кг/Гкал
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	0,356894747	0,654254155
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	0,058843592	0,107254902
3	Углерод (Сажа)	0,00170235	0,004576921
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	0,187059777	0,470795067
5	Углерод оксид	0,078284458	0,072660518
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$
7	Мазутная зола	0,000863794	0,002710096
	Итого	0,684	1,312

Составлено авторами

Сравнение выбросов водогрейного и парового котлов за час работы (табл. 12) позволяет оценить интенсивность воздействия на атмосферу, при функционировании агрегатов в единицу времени. Паровой котел характеризуется более высокими значениями по всем загрязняющим веществам, кроме оксида углерода.

Превышение по диоксиду азота составляет 37 %, по диоксиду серы — 88 %, по бенз(а)пирену — почти 11 раз. Часовая эмиссия оксида углерода, напротив, выше у водогрейного котла (на 44 %). Суммарный часовой выброс всех загрязняющих веществ у парового агрегата превышает аналогичный показатель водогрейного в 1,44 раза. Это указывает на то, что при одинаковой длительности работы паровой котел вносит более существенный вклад в текущее загрязнение приземного слоя атмосферы.

Таблица 12

**Сравнение выбросов водогрейного и парового котлов
за час работы (жирным шрифтом выделено большее значение)**

№ п/п	Наименование ЗВ	Удельные выбросы водогрейного котла на единицу произведенной тепловой энергии, т/час	Удельные выбросы парового котла на единицу произведенной тепловой энергии, т/час
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	0,006823786	0,009371325
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	0,001125083	0,001536285
3	Углерод (Сажа)	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	0,003576561	0,006743516
5	Углерод оксид	0,00149679	0,001040766
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
7	Мазутная зола	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
	Итого	0,013	0,019

Составлено авторами

Анализ эмиссии парниковых газов (табл. 13) показывает, что водогрейный котел, несмотря на меньшие удельные выбросы традиционных загрязнителей, генерирует более высокие абсолютные и часовые выбросы CO₂, CH₄ и N₂O. Суммарный выброс парниковых газов в CO₂-эквиваленте для водогрейного котла (22 100,84 тCO₂-экв/год) в 1,2 раза превышает аналогичный показатель для парового (18 439,20 тCO₂-экв/год). Это объясняется более высоким расходом природного газа у водогрейного котла (на 19,8 %). Однако удельные выбросы в расчете на единицу произведенной тепловой энергии и на единицу расхода топлива у обоих типов котлов оказались идентичными: (0,26 тCO₂-экв/Гкал и 2,01 тCO₂-экв/тыс.м³ соответственно). Это свидетельствует о том, что при одинаковом КПД и одинаковом топливе парниковый эффект на единицу тепловой продукции эквивалентен. Часовая интенсивность выбросов парниковых газов у водогрейного котла выше в 1,33 раза.

Таблица 13

**Сравнение выбросов парниковых газов водогрейным
и паровым котлами (жирным шрифтом выделено большее значение)**

№ п/п	Показатель	Водогрейный котел	Паровой котел
1	Прямые выбросы CO ₂ , тCO ₂ /год	21 502,92	17 940,35
2	Прямые выбросы CH ₄ , тCO ₂ -экв/год	307,18	256,29
3	Прямые выбросы N ₂ O, тCO ₂ -экв/год	290,73	242,56
4	Суммарное количество выбросов парниковых газов, тCO ₂ -экв/год	22 100,84	18 439,20
5	Удельные выбросы парниковых газов на единицу произведенной тепловой энергии, тCO ₂ -экв/Гкал	0,26	0,26
6	Удельные выбросы парниковых газов на единицу расхода топлива, тCO ₂ -экв/тыс.м ³	2,01	2,01
7	Удельные выбросы парниковых газов на час работы, тCO ₂ -экв/ч	5,03	3,77

Составлено авторами

Расчет платы за выбросы загрязняющих веществ (табл. 14) показал, что экономический ущерб от эксплуатации одного парового котла составляет 131 406,76 руб./год, что в 5,91 раза превышает аналогичный показатель для водогрейного котла (22 247,06 руб./год). Основной вклад в это различие вносит бенз(а)пирен, плата за выбросы которого у парового агрегата почти в 12 раз выше (110 775,78 руб./год против 9398,28 руб./год).

Это обусловлено значительно более высокой массой выбросов бенз(а)пирена паровым котлом (0,0001 т/год против $5,34 \cdot 10^{-6}$ т/год) при чрезвычайно высокой ставке платы для данного канцерогена. Также существенный вклад вносят диоксид азота и диоксид серы.

Таблица 14

**Результаты расчета экономического ущерба для каждого
загрязняющего вещества для каждого из рассматриваемых видов
котлов (жирным шрифтом выделено большее значение)**

№ п/п	Наименование	Ставка платы, руб./т	Плата за выброс ЗВ для водогрейного котла, руб./г	Плата за выброс ЗВ для парового котла, руб./г
1	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	209,59	9 961,85	15 236,31
2	Азот (II) оксид (Азота оксид)	141,19	1 106,45	1 682,61
3	Углерод (Сажа)	209,59	47,52	106,59
4	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	68,55	1 707,72	3 585,93
5	Углерод оксид	2,42	25,23	19,54
6	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	$1,2 \cdot 10^{-8}$	9 398,28	110 775,78
Итого:			22 247,06	131 406,76

Составлено авторами

Обсуждение

Анализ расчетных данных для водогрейного котла выявляет характерный эмиссионный профиль, свойственный современным газовым теплогенераторам с высоким коэффициентом полезного действия. Структура удельных выбросов в пересчете на единицу топлива и на единицу произведенной тепловой энергии демонстрирует доминирование оксидов азота (NO_x), на долю которых приходится более 60 % суммарной массы выбрасываемых поллютантов, причем, превалирует диоксид азота, что объясняется термическим механизмом Зельдовича, интенсифицирующимся при высоких температурах в ядре факела. Следующим по значимости компонентом выступает диоксид серы; его присутствие в выбросах, несмотря на использование природного газа, обусловлено наличием серосодержащих одорантов в топливе. Концентрации бенз(а)пирена и мазутной золы находятся на следовом уровне, что подтверждает высокое качество организации процесса горения газообразного топлива и отсутствие значимых источников сажеобразования. Часовые выбросы водогрейного котла характеризуются умеренной интенсивностью, что в сочетании с относительно небольшим радиусом зоны влияния формирует локальный характер антропогенной нагрузки. Расчет экономического ущерба, составивший 22 247,06 руб./год на один агрегат, демонстрирует, что основными драйверами платы выступают диоксид азота и бенз(а)пирен, причем вклад последнего в стоимостном выражении непропорционально высок по отношению к его малой массе, что обусловлено чрезвычайно высокой ставкой платы, отражающей его принадлежность к первому классу опасности и выраженные канцерогенные свойства.

По результатам анализа водогрейного котла следует вывод, что при работе на природном газе он представляет собой источник с умеренным уровнем экологической опасности, где ключевыми мишенями для дальнейшего снижения воздействия являются подавление термических оксидов азота первичными режимно-технологическими методами и минимизация выбросов диоксида серы посредством использования газа с пониженным содержанием одорантов. Рекомендацией в данном случае является внедрение низкокэмиссионных горелочных устройств с рециркуляцией дымовых газов и ступенчатой подачей воздуха, что позволит без существенных капитальных затрат уменьшить образование NO_x, непосредственно в топочном объеме.

Переходя к анализу расчетов для парового котла, следует констатировать кардинально иную картину распределения экологической нагрузки.

Удельные выбросы на единицу топлива и тепловой энергии демонстрируют существенный, в ряде случаев кратный, рост по всем загрязняющим веществам, за исключением оксида углерода. Наибольшую тревогу вызывает масштаб эмиссии бенз(а)пирена, удельный выброс которого на единицу топлива превышает показатель водогрейного котла более чем в 20 раз, что однозначно указывает на наличие в топочном процессе парового котла зон с неоптимальным смесеобразованием, локальным недостатком окислителя и пиролизом углеводородов даже при использовании природного газа. Более высокие температуры факела, необходимые для эффективной генерации пара, парадоксальным образом не обеспечивают полноты выгорания углеводородных радикалов, а, напротив, могут инициировать реакции полимеризации, ведущие к образованию полициклических ароматических углеводородов. Существенно возросшие выбросы диоксида серы и мазутной золы, вероятно, связаны не только с особенностями горения, но и с периодическим использованием резервного жидкого топлива, что характерно для паровых котельных на крупных предприятиях. Экономический ущерб от одного парового котла, составивший 131 406,76 руб./год, является наиболее ярким интегральным показателем его высокой экологической опасности, причем подавляющий вклад в эту сумму (более 84 %) вносит плата за выбросы бенз(а)пирена. Это придает эколого-экономической оценке ярко выраженную канцерогенную окраску, акцентируя проблему неприемлемо высокого риска для здоровья населения. Вывод по результатам расчета для парового котла заключается в том, что он даже при работе на газе демонстрирует характеристики, приближающиеся к оборудованию, сжигающему жидкое или твердое топливо, и представляет собой объект повышенного экологического риска, неприемлемый для размещения вблизи селитебных зон без оснащения дорогостоящими системами очистки. В качестве первоочередной рекомендации следует рассматривать не просто модернизацию горелочных устройств, а комплексное изменение топочного режима с внедрением систем глубокого автоматического регулирования соотношения топливо-воздух на базе датчиков кислорода и монооксида углерода, а в случае невозможности подавления бенз(а)пирена технологическими методами — установку систем каталитического дожигания на байпасных линиях.

Общий анализ и вывод для водогрейного котла позволяют охарактеризовать его как теплоэнергетическую установку, экологическая опасность которой определяется преимущественно высокотемпературным образованием оксидов азота и в меньшей степени — эмиссией продуктов неполного сгорания, при этом абсолютные величины выбросов и экономического ущерба позволяют отнести ее к категории источников с умеренным воздействием, поддающимся эффективному регулированию малозатратными способами. Для парового котла общий вывод радикально иной: его экологический профиль характеризуется экспоненциальным ростом эмиссии высокотоксичных канцерогенов, что превращает его в объект с высокой степенью эколого-токсикологической угрозы, рентабельное снижение которой возможно лишь путем кардинальной реконструкции топочного процесса.

Ключевой этап исследования — сравнительный анализ двух типов котлов — выявил фундаментальную асимметрию в структуре их воздействия на окружающую среду и экономику природопользования. Прямое количественное сопоставление демонстрирует, что суммарный удельный выброс загрязняющих веществ на единицу полезной энергии у парового котла в 1,92 раза выше, чем у водогрейного, что служит объективным доказательством его более низкой экологической эффективности.

Этот разрыв не является равномерным, а сконцентрирован в области эмиссии наиболее токсичных компонентов: по бенз(а)пирену и диоксиду серы превышение носит кратный, а по первому — на порядок больший характер. Это свидетельствует о том, что при равной тепловой мощности паровой котел генерирует не просто больше загрязнителей, а производит их в качественно более опасной пропорции, смещенной в сторону ультратоксикантов.

Сравнение часовых выбросов подтверждает, что и в единицу времени паровой агрегат создает значительно более интенсивную токсикологическую нагрузку на приземный слой атмосферы, что актуально при инверсиях и неблагоприятных метеоусловиях. Анализ выбросов парниковых газов вносит важный нюанс в, казалось бы, однозначную картину: абсолютный выброс диоксида углерода у водогрейного котла выше в 1,2 раза, что обусловлено его большим среднегодовым расходом топлива. Однако равенство удельных показателей на Гкал и на тысячу кубометров газа указывает на термодинамическую идентичность процесса горения метана в обоих агрегатах. Этот результат имеет глубокое методологическое значение: он доказывает, что климатический фактор не может служить критерием выбора между водогрейным и паровым котлом при равном КПД, и решение должно приниматься исключительно на основе анализа выбросов традиционных загрязнителей и их класса опасности. Наиболее чувствительным и интегральным индикатором экологического неблагополучия является экономический ущерб, превышение которого для парового котла в 5,91 раза над водогрейным является кульминационным результатом сравнительного анализа. Этот пятикратный дисбаланс, практически полностью сформированный бенз(а)пиреном, превращает экономический механизм платы за негативное воздействие в точный инструмент ранжирования экологической опасности. Он сигнализирует о том, что общественные издержки от эксплуатации одного парового котла эквивалентны издержкам от почти шести водогрейных, что должно быть решающим аргументом в технико-экономическом обосновании проектов теплоснабжения.

Обобщающий вывод из проведенного сравнительного анализа состоит в том, что при сжигании идентичного топлива паровой котел демонстрирует значительно более высокую экологическую опасность по сравнению с водогрейным по всему спектру проанализированных индикаторов, за исключением климатического, являясь источником непропорционально большого количества веществ первого класса опасности, что квалифицирует его как объект, требующий приоритетного внимания надзорных органов и первоочередной модернизации. Научная ценность полученных результатов заключается в выявлении количественной меры этой опасности, позволяющей перейти от качественных утверждений к строгим расчетным обоснованиям. Практические рекомендации, вытекающие из анализа, носят дифференцированный характер: для водогрейных котлов приоритетом является дальнейшее снижение эмиссии оксидов азота посредством оптимизации режимов горения, что экономически эффективно и технологически реализуемо; для паровых котлов настоятельно рекомендуется либо их поэтапный вывод из эксплуатации с заменой на водогрейные агрегаты в тех сегментах, где потребности в паре могут быть удовлетворены перегретой водой, либо оснащение их комплексными многоступенчатыми системами газоочистки, включающими каталитическое дожигание и скрубберы, что позволит приблизить их экологические параметры к уровню наилучших доступных технологий и минимизировать неприемлемо высокие канцерогенные риски для населения и экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, А. Р. Новые подходы в оценке рисков здоровью людей при загрязнении атмосферы диоксидом азота / А. Р. Иванов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. — 2021. — № 4(23). — С. 70–80. — DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.64.86.009. — EDN LSAJRH.
2. Niskikh, K.K. The impact of nitrogen dioxide on human life / K.K. Niskikh, I.I. Maksimova, E.N. Lashina // Dialogue of cultures, 20–22 мая 2021 года. Vol. Часть I. — Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна Высшая школа технологий и энергетики, 2021. — Р. 95–98. — EDN UQBUBC.

3. Очистка дымовых газов от оксида азота и угольной пыли / А. О. Орлов, Е. Э. Чернушевич, С. С. Максимович, С. И. Лепетило // Современные достижения научно-технического прогресса. — 2023. — № 2(7). — С. 14–18. — DOI 10.18411/sdntp-03-2023-03. — EDN GLJJEM.
4. Study of nitric oxide levels in the serum of patients with bronchial asthma / A. Sabirova, A. Aitkazina, A. Kussainova [et al.] // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Серия: Биологические науки. — 2025. — No. 3(152). — P. 7–19. — DOI 10.32523/2616-7034-2025-152-3-7-19. — EDN BGTX XU.
5. Кумачева, В. Д. Оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на территории полигона отходов / В. Д. Кумачева, А. А. Войтенко // АгроЭкоИнфо. — 2024. — № 6(66). — DOI 10.51419/202146627. — EDN TOSFZQ.
6. Маслобоев, В. А. Влияние микрочастиц черного углерода на здоровье населения и климат арктических регионов / В. А. Маслобоев, Е. М. Ключникова // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. — 2022. — № 2(10). — С. 32–45. — DOI 10.51823/74670_2022_2_32. — EDN AKXNWX.
7. Влияние диоксида серы на здоровье человека (обзор литературы) / В. В. Кислицына, М. С. Бугаева, Д. В. Суржиков, В. А. Штайгер // Гигиена и санитария. — 2025. — Т. 104, № 9. — С. 1120–1125. — DOI 10.47470/0016-9900-2025-104-9-1120-1125. — EDN UQOMXP.
8. Миниярова, Д. В. Диоксид серы и его влияние на здоровье человека / Д. В. Миниярова // Центральный научный вестник. — 2019. — Т. 4, № 2(67). — С. 8–9. — EDN YVKIGD.
9. О концентрации оксида углерода в воздушной среде придорожных территорий / В. Н. Азаров, Ю. П. Иванова, А. А. Добринская [и др.] // Экономика строительства и природопользования. — 2023. — № 4(89). — С. 5–14. — EDN SKYJYM.
10. Суркова, И. В. Причина экологически обусловленной заболеваемости населения — атмосфера техногенного мегаполиса / И. В. Суркова, С. И. Лещук // Вестник ИрГСХА. — 2023. — № 115. — С. 99–111. — DOI 10.51215/1999-3765-2023-115-99-111. — EDN ASABBX.
11. Чиглинцев, И. А. Содержание бензапирена в почве и атмосфере вблизи котельной / И. А. Чиглинцев, Е. Н. Чиглинцева // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11, № 3. — DOI 10.15862/06NZOR324. — EDN DHATXO.
12. Елгина, С. И. Особенности воздействия бенз(а)пирена на организм: обзор современных данных / С. И. Елгина, А. А. Перегудова // Бюллетень медицинской науки. — 2026. — № 1(38). — С. 142–153. — DOI 10.31684/25418475-2026-1-142. — EDN JNYXJD.
13. Щепетова, Е. В. Влияние техногенной нагрузки на биохимические показатели растений / Е. В. Щепетова, Н. М. Абдурахманова // Геология, география и глобальная энергия. — 2024. — № 1(92). — С. 134–139. — DOI 10.54398/20776322_2024_1_134. — EDN LNTWDQ.
14. Методологический подход к комплексной оценке экологической безопасности теплоснабжения на примере Москвы / Н. А. Осокин, А. Г. Максимов, А. А. Куров, И. Ю. Золотова // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2025. — Т. 16, № 1. — С. 10–19. — DOI 10.17747/2618-947X-2025-1-10-19. — EDN OPUFFY.
15. Берген, Д. Н. Методические предложения по оценке и повышению энергетической безопасности систем теплоснабжения РФ / Д. Н. Берген // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2022. — Т. 28, № 4. — С. 65–72. — DOI 10.21209/2227-9245-2022-28-4-65-72. — EDN QFIMRK.

Fadeev Vladislav Viktorovich

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
Institute of Environmental Engineering
E-mail: fadeev.vladislav@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2439-8127>

Pinaev Vladimir Evgenievich

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
Institute of Environmental Engineering
E-mail: pinaev-ve@rudn.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8943-5462>

Arias Ordones Winston Rodolfo

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
Institute of Environmental Engineering
E-mail: rodolfoarias@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3672-7469>

Comparative environmental and toxicological assessment of hot-water and steam boilers fueled by natural gas based on operational data

Abstract. This publication presents the results of a comparative analysis of the impact of hot water and steam boilers operating on natural gas on environmental quality and public health. The rationale for this study stems from the presence of a large fleet of obsolete boiler equipment in the Russian Federation, necessitating a rationale for selecting environmentally preferential heat generation technologies. The authors characterized the pathogenic effects of key pollutants (nitrogen oxides, sulfur dioxide, benzo(a)pyrene, and suspended particles). By processing the operating parameters of 215 hot water and 147 steam units, specific emission rates were calculated per unit of fuel burned and heat generated, hourly emission flows were determined, greenhouse gas volumes were determined, and economic damages (in the form of a fee for negative impacts) were calculated. Empirical studies have confirmed that the total specific pollutant emissions from a steam boiler exceed those from a hot water boiler by 1,92 times, while the calculated economic damage is 5,91 times higher, even with identical climatic parameters in the regions where the boilers are deployed. Benzo(a)pyrene plays a dominant role in this discrepancy, with its emissions from a steam boiler exceeding those from a hot water boiler by an order of magnitude. This study concludes that steam boilers pose a significantly greater environmental threat, even when using gaseous fuel. The results obtained can serve as a basis for argumentation when selecting equipment for the reconstruction and modernization of heating systems.

Keywords: hot water boiler; steam boiler; pollutant emissions; benz(a)pyrene; economic damage; atmospheric air; natural gas