

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-156-166>

УДК 662.61

Эффективность сжигания природного газа на объекте малой энергетики*

В. К. Любов¹⁾, А. Н. Попов¹⁾, А. А. Власов¹⁾

¹⁾Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
(Архангельск, Российская Федерация)

Реферат. С развитием технологий и ростом населения на нашей планете увеличивается потребление энергетических ресурсов. Растущий темп потребления ресурсов и их нерациональное использование ведут к быстрому истощению ископаемого топлива. В связи с этим проведено комплексное исследование эффективности использования природного газа на объектах малой энергетики в водогрейных котлах GKS-Dynatherm-3200 и GKS-Dynatherm-1100. Проведены промышленно-эксплуатационные испытания, определены тепловые потери при работе оборудования, полнота сжигания природного газа, исследован состав сжигаемого топлива, определены концентрация, размер и форма твердых частиц в дымовых газах с помощью электронного растрового микроскопа Zeiss SIGMA VP. Результаты испытаний показали, что горелочные устройства водогрейных котлов обеспечивают подготовку воздушно-топливной смеси высокого качества, что дает возможность организовать топочный процесс с минимальным избытком воздуха. Выявлено, что при увеличении доли кислорода в топочной камере котла GKS-Dynatherm-1100 до 3,7–5,35 % наблюдается повышение эмиссии NO_x и CO. Несмотря на высокие теплотехнические показатели, даже в процессе сжигания природного газа в топочных устройствах котлоагрегатов топливный углерод выпадает в виде сажи. При исследовании содержания твердых частиц в уходящих дымовых газах выявлено, что преобладают частицы размером от 1 до 5 мкм. При этом более 95 % частиц имеют форму, близкую к сферической. Частиц размером 20 мкм и более в уходящих газах намного меньше, однако их суммарная масса доминирует в валовых выбросах твердых частиц. Эмиссия твердых частиц при работе водогрейного котла GKS-Dynatherm-3200 с нагрузкой 1,73 МВт составила 0,17 мг/МДж. В ходе проведенных промышленно-эксплуатационных испытаний установлено, что оборудование котельной имеет высокие энергоэкологические показатели работы и резерв для их дальнейшего повышения.

Ключевые слова: высококачественное топливо, газоиспользующее оборудование, эффективность сжигания, потери теплоты, вредные вещества

Для цитирования: Любов, В. К. Эффективность сжигания природного газа на объекте малой энергетики / В. К. Любов, А. Н. Попов, А. А. Власов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2026. Т. 69, № 2. С. 156–166. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-156-166>

Адрес для переписки

Попов Анатолий Николаевич
Северный (Арктический) федеральный университет
имени М. В. Ломоносова
наб. Северной Двины, 17,
163002, г. Архангельск, Российская Федерация
Тел.: +7 (8182) 21-61-75
a.n.popov@narfu.ru

Address for correspondence

Popov Anatolii N.
Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov
17, Northern Dvina Emb.,
163002, Arkhangelsk, Russian Federation
Tel.: +7 (8182) 21-61-75
a.n.popov@narfu.ru

* Авторы выражают благодарность сотрудникам ЦКП НО «Арктика» за проведение исследований на электронном микроскопе Zeiss SIGMA VP.

Efficiency of Natural Gas Combustion at a Small Power Facility*

V. K. Lyubov¹⁾, A. N. Popov¹⁾, A. A. Vlasov¹⁾

¹⁾Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russian Federation)

Abstract. With the development of technology and population growth, the consumption of energy resources on our planet is increasing. The increasing rate of resource consumption and their irrational use lead to the rapid depletion of fossil fuels. In this regard, a comprehensive study of the efficiency of using natural gas at small power facilities in water heating boilers GKS-Dynatherm-3200 and GKS-Dynatherm-1100 was carried out. Industrial and operational tests were fulfilled, heat losses during operation of the equipment and the completeness of natural gas combustion were determined, the composition of the fuel burned was investigated, the concentration, size and shape of solid particles in flue gases were determined using a Zeiss SIGMA VP electron scanning microscope. The test results showed that the burner devices of hot water boilers provide the preparation of a high-quality air-fuel mixture, which makes it possible to organize the combustion process with a minimal excess of air. It was found out that with an increase in the proportion of oxygen in the combustion chamber of the GKS-Dynatherm-1100 boiler to 3.7–5.35 %, an increase in NO_x and CO emissions is observed. Despite the high thermal performance, even during the combustion of natural gas in the combustion devices of boiler units, fuel carbon is released in the form of soot. When studying the content of solid particles in exhaust flue gases, it was found that particles with a size from 1 to 5 microns predominate. At the same time, more than 95 % of the particles have a shape close to spherical. Particles of 20 microns or more in the exhaust gases are much smaller, however, their total mass dominates the gross emissions of particulate matter. The emission of particulate matter during operation of the GKS-Dynatherm-3200 water heating boiler with a load of 1.73 MW was 0.17 mg/MJ. During the conducted industrial and operational tests, it was found that the boiler house equipment has high energy-ecological performance and has potential for further improvement.

Keywords: high-quality fuel, gas-using equipment, combustion efficiency, heat loss, harmful substances

For citation: Lyubov V. K., Popov A. N., Vlasov A. A. (2026) Efficiency of Natural Gas Combustion at a Small Power Facility. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (2), 156–166 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-156-166>

Введение

Увеличение потребления энергоресурсов, а также экологическая политика современного общества заставляют человечество находиться в постоянном поиске путей повышения эффективности использования топлива и уменьшения антропогенной нагрузки на окружающую среду [1–5]. Более 80 % энергии в мире получают за счет сжигания ископаемых видов топлива [6–8]. Традиционно для этих целей используют древесину, уголь, нефть, природный газ, кокс [9, 10].

На сегодняшний момент приоритетным видом топлива является природный газ [11]. Природный газ – это высококачественное топливо, при сжигании которого выделяется наименьшее количество загрязняющих веществ [12, 13], а низшая теплота сгорания составляет 31–38 МДж/м³ [14–16].

Учитывая, что природный газ – это ограниченный ресурс, мировая цена на газ достаточно велика и продолжит расти. Вслед за мировой цена природного газа на внутреннем рынке будет тоже расти [17–20]. В связи с этим следует добиваться его эффективного использования.

Исходя из этого были выполнены исследования по сжиганию природного газа в котлах, установленных в блочно-модульной котельной в деревне Рикасиха Архангельской области.

Оборудование котельной работает на природном газе и предназначено для выработки тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение жилых и административных зданий Рикасихи. Суммарная тепловая мощность котельной 7,5 МВт. На территории деревни применяется закрытая теплоснабжающая система, состоящая из двух трубопроводов. Регулирование подачи теплоты осуществляется за счет изменения качественного показателя по температурному режиму 95–70 °С.

В качестве основного газоиспользующего оборудования в котельной установлены стальные жаротрубные водогрейные котлы, применение которых обусловлено их надежностью и низкой себестоимостью [21] (два котла марки GKS-Dynatherm-3200 (рис. 1) и один котел марки GKS-Dynatherm-1100). Все котлы работают под наддувом. Продукты сгорания поступают в индивидуальные дымоходы, выполненные из металла.

Трехходовые стальные жаротрубные котлы GKS-Dynatherm сконструированы с центральным расположением жаровой трубы и концентрически расположенными вокруг жаровой трубы дымогарными трубами второго и третьего ходов (рис. 2). Для увеличения теплопередачи в третьем ходе установлены шнековые турбулизаторы, эффективность которых приведена в [22, 23].

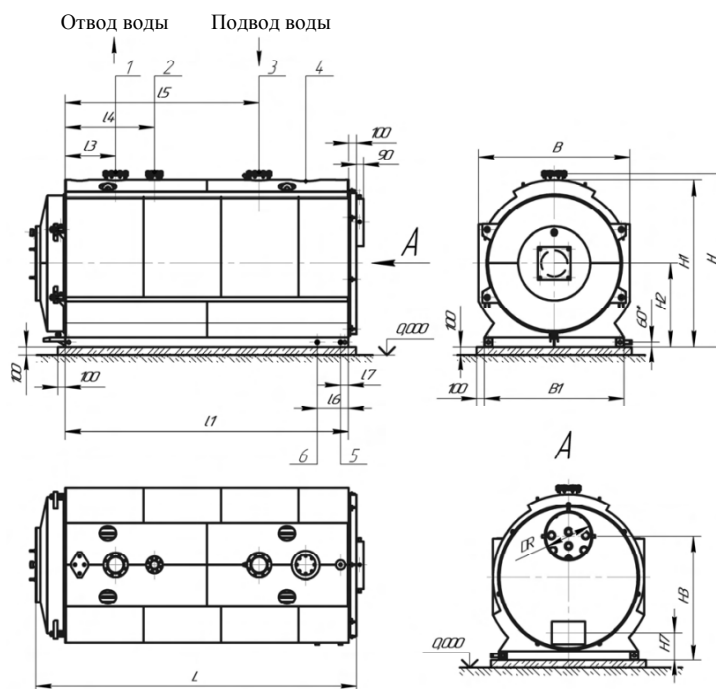


Рис. 1. Конструкция котлов марки GKS-Dynatherm-3200: 1 – отвод воды; 2 – штуцер предохранительного клапана; 3 – подвод воды; 4 – смотровое окно; 5 – слив конденсата котла; 6 – дренажный штуцер

Fig. 1. The design of boilers of the GKS-Dynatherm-3200 brand: 1 – water outlet; 2 – safety valve fitting; 3 – water supply; 4 – observation window; 5 – boiler condensate drain; 6 – drainage fitting

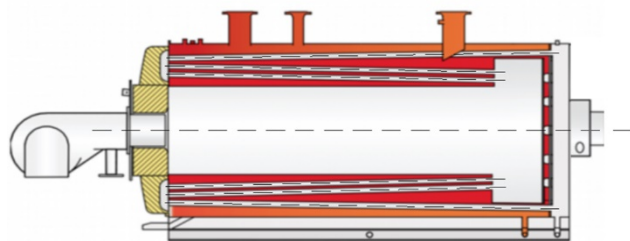


Рис. 2. Продольный разрез котла GKS-Dynatherm
Fig. 2. Longitudinal section of the GKS-Dynatherm boiler

Котлы GKS-Dynatherm являются газоплотными. Элементы котлов, работающие под давлением и в зоне высоких температур, изготавливаются из котловой спецстали [24], в качестве теплоизоляции применяются минераловатные маты, которые снаружи закрыты обшивкой из металла. Котлы этой марки относятся к жаротрубно-дымогарным с реверсивной топкой. В них применяется обратный ход продуктов сгорания.

Для обеспечения эффективной работы и простоты очистки поверхностей теплообмена в котлах предусмотрена возможность открытия фронтальной крышки, а также установлена камера сбора дымовых газов с возможностью демонтажа.

В верхней части котла осуществляются подвод и отвод теплоносителя, а также располагается люк для его осмотра. На фронтальной части располагаются горелки, они устанавливаются на камеры с поворотными механизмами, которые при открытии обеспечивают доступ к жаровым и дымогарным трубам.

Для обслуживания котлов на газопроводах устанавливают съемные крышки, которые имеют лючки для их очистки от продуктов сгорания. Конструкция котлов обладает повышенной прочностью, это позволяет отказаться от установки взрывных предохранительных клапанов.

Котлы оборудованы горелками марок IBSM-200 MG и IBSM-450 MG. Режим работы горелок модулируемый. Горелки оснащены вентилятором воздуха для горения, реле давления газа, жидкотопливным насосом, сервоприводом для автоматической модуляции нагрузки горелки, пилотной запальной горелкой, камерой смешивания газового и жидкого топлива, а также электродом поджига. Система химводоподготовки котельной БМК обеспечивает подготовку подпиточной воды как для котлового, так и сетевого контуров котельной [25].

Материалы и методы исследования

Для определения составляющих теплового баланса и экологических показателей водогрейных котлов ст. № 1 GKS-Dynatherm-1100 и ст. № 2 GKS-Dynatherm-3200 были проведены промышленно-эксплуатационные испытания [26–28].

Метод внешней фильтрации применяли для определения концентрации твердых частиц в дымовых газах. Для этого использовали аспирационную

установку «ОП-442 ТЦ» с пылезаборной трубкой и фильтродержателем. Размер и форму уловленных твердых частиц исследовали с помощью электронного растрового микроскопа Zeiss SIGMA VP. Состав продуктов сгорания определяли с помощью газоанализатора «ДАГ-510».

Для определения потерь теплоты в окружающую среду использовался относительный метод [29], дополненный результатами тепловизионной съемки, выполненной с помощью тепловизора Testo 885-2 и инфракрасного пирометра TemPro.

Результаты исследования

Основные результаты исследования приведены в табл. 1. На каждом котле проводились опыты при нагрузках 54, 74 и 92 % от номинальной. В качестве топлива использовался природный газ, основными составляющими которого являлись: метан – 96,86 %; этан – 2,08 %; азот – 0,5 % и др.; низшая теплота сгорания $Q_i^* = 34,15$ МДж/м³, плотность $\rho_r = 0,76$ кг/м³.

Таблица 1

Результаты промышленно-эксплуатационных испытаний
Results of industrial and operational tests

Параметр	Обозначение, размерность	GKS-Dynatherm-1100 ст. № 1			GKS-Dynatherm-3200 ст. № 2		
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
Теплопроизводительность	Q , МВт	0,598	0,805	1,013	1,732	2,355	2,952
Расход воды через котел	G_v , т/ч	38,0	38,0	38,0	107,0	107,0	107,0
Давление воды на выходе	P_v , МПа	0,36	0,35	0,4	0,41	0,42	0,41
Температура воды на выходе	t_v , °C	82,6	88,5	90,9	85,1	86,8	88,8
Давление газа на горелку	P_r , кПа	0,5	1,2	2,4	1,2	2,1	2,4
Давление воздуха на горелку	P_a , кПа	0,3	0,7	1,1	0,7	1,3	1,5
Температура уходящих газов	t_{yx} , °C	108,0	140,3	140,0	125,0	142,0	144,0
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	α_{yx} , –	1,21	1,34	1,24	1,15	1,19	1,20
Потери теплоты:							
с уходящими газами	q_2 , %	4,21	4,21	4,2	4,90	4,63	4,81
с химическим недожогом	q_3 , %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
с мехнедожогом	q_4 , %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
в окружающую среду	q_5 , %	1,66	1,23	0,98	1,11	0,82	0,65
КПД котла брутто	$\eta_{ка}$, %	94,13	93,77	94,30	94,00	94,56	94,54
Полный расход топлива	B , м ³ /ч	67,1	90,8	113,2	194,0	263,0	329,0
Удельный расход природного газа на выработку 1 ГДж теплоты	b , м ³ /ГДж	31,15	31,32	31,01	31,09	30,95	30,99
Эмиссия оксидов азота	NO _x , мг/МДж	43,8	44,0	41,0	56,6	58,7	58,6
Эмиссия оксида углерода	CO, мг/МДж	3,80	2,60	2,60	0,36	0,81	0,81

Для определения потерь теплоты в окружающую среду использовался относительный метод [29], дополненный результатами тепловизионной съемки, представленной на рис. 3, 4. При этом ограждающие конструкции разбивались на отдельные участки, в каждом из которых с помощью пирометра измерялись средние температуры. На основании результатов замеров температур на 112 участках котла GKS-Dynatherm-3200 и 60 участках котла GKS-Dynatherm-1100 рассчитаны коэффициенты теплопередачи, а затем потери теплоты в окружающую среду.

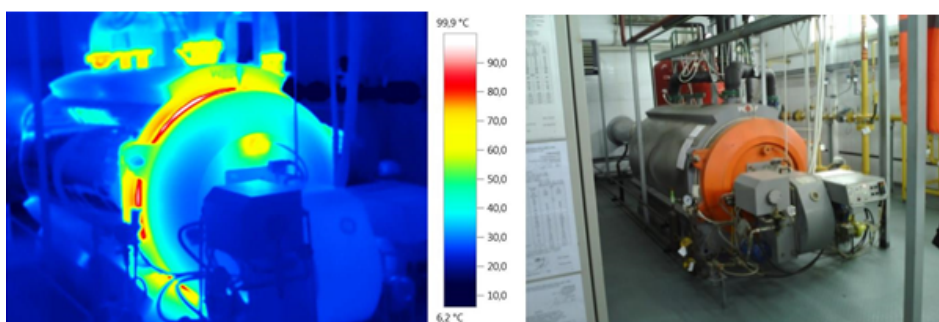


Рис. 3. Тепловизионная съемка котла GKS-Dynatherm-1100

Fig. 3. Thermal imaging of the GKS-Dynatherm-1100 boiler

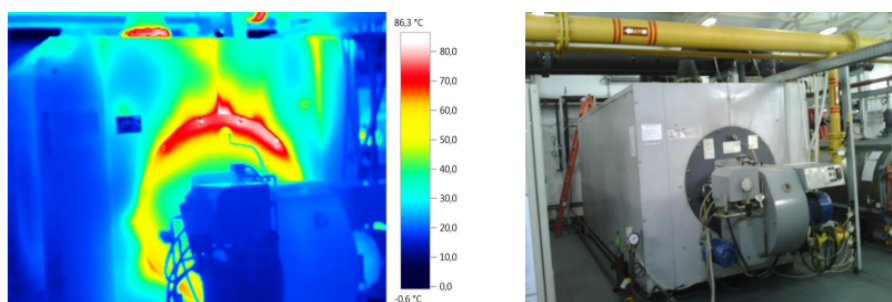


Рис. 4. Тепловизионная съемка котла GKS-Dynatherm-3200

Fig. 4. Thermal imaging of the GKS-Dynatherm-3200 boiler

Обсуждение

Наивысшие энергетические и экологические показатели для котла ст. № 1 GKS-Dynatherm-1100 достигнуты при работе с нагрузкой 92 % от номинальной (табл. 1). Наибольший КПД брутто, минимальные потери с уходящими газами и минимальный удельный расход газа на выработку тепловой энергии для котла ст. № 2 GKS-Dynatherm-3200 получен при нагрузке 74 % от номинальной (табл. 1).

При исследовании содержания твердых частиц в уходящих дымовых газах было выявлено, что преобладают частицы с размером от 1 до 5,0 мкм (рис. 5). При этом более 95 % частиц имеют форму, близкую к сферической (рис. 6). Частиц размером 20 мкм и более в уходящих газах намного меньше, однако их суммарная масса доминирует (рис. 7) в валовых выбросах твердых частиц.

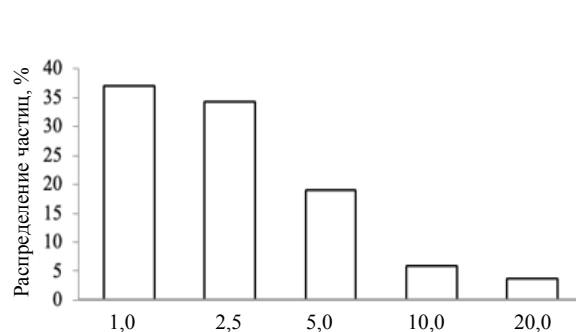


Рис. 5. Размер частиц, мкм

Fig. 5. Particle size, microns

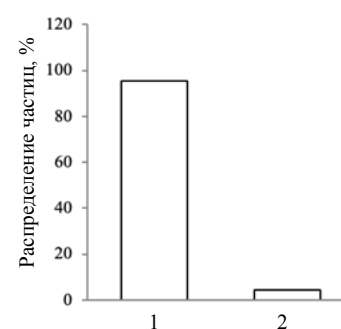


Рис. 6. Отношение длины частицы к эквивалентному диаметру

Fig. 6. The ratio of the particle length to the equivalent diameter



Рис. 7. Распределение и весовое содержание частиц, мкм

Fig. 7. Distribution and weight content of particles, microns

С помощью электронного растрового микроскопа Zeiss SIGMA VP получены фотографии (рис. 8), которые показывают наиболее характерную форму и вид частиц, выбрасываемых с уходящими газами в атмосферный воздух при работе котла GKS-Dynatherm-3200.

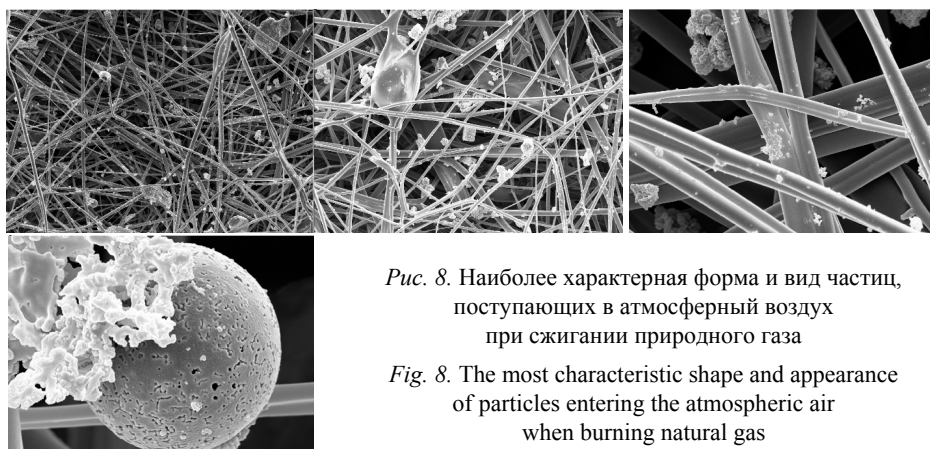


Рис. 8. Наиболее характерная форма и вид частиц, поступающих в атмосферный воздух при сжигании природного газа

Fig. 8. The most characteristic shape and appearance of particles entering the atmospheric air when burning natural gas

ВЫВОДЫ

1. Результаты испытаний показали, что горелочные устройства водогрейных котлов ст. № 1 GKS-Dynatherm-1100 и № 2 GKS-Dynatherm-3200 обеспечивают подготовку воздушно-топливной смеси высокого качества, что дает возможность организовать топочный процесс с минимальным избытком воздуха. Выявлено, что при увеличении доли кислорода в топочной камере котла GKS-Dynatherm-1100 до 3,70–5,35 % наблюдается повышение эмиссии NO_x и CO (табл. 1). Оптимальный диапазон изменения концентрации кислорода в продуктах сгорания данных котлов составляет 2,5–3,5 %.

2. Несмотря на высокие теплотехнические показатели, даже в процессе сжигания природного газа в топочных устройствах котлоагрегатов топливный углерод может выпадать в виде сажи и уноситься вместе с дымовыми газами в окружающую среду. Это явление может быть связано с неравномерным распределением кислорода в топке ввиду несовершенства процесса смесеобразования, низкой температурой горения в отдельных зонах, особенно у водоохлаждаемых поверхностей нагрева. Доля невыгоревшего углерода (сажевых частиц) и концентрация газообразных продуктов неполного сгорания топлива в дымовых газах котлоагрегатов настолько малы, что соответствующие потери теплоты q_3 и q_4 стремятся к нулю. Эмиссия твердых частиц при работе водогрейного котла ст. № 2 с нагрузкой 1,73 МВт составила 0,17 мг/МДж.

3. Таким образом, исследованные водогрейные котлы имеют достаточно высокие энергоэкологические показатели, однако возможно дальнейшее комплексное повышение эффективности их работы путем оптимизации воздушного режима.

Исследование, приведшее к этим результатам, финансировалось за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FSRU-2024–0007.

Обозначения:

Q_i^r – низшая теплота сгорания, МДж/м³; Q – тепловая мощность, МВт; ρ_g – плотность газа, кг/м³; k – коэффициент теплопередачи, Вт/м·К; $\eta_{ка}$ – КПД брутто, %; b – удельный расход газа, м³/ГДж; РМ – эмиссия твердых частиц, мг/МВт. Индексы: i – низшая; r – рабочая масса; $г$ – природный газ; $ка$ – котлоагрегат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Летягина, Е. Н. Текущая оценка и прогнозы производства и потребления топливно-энергетических ресурсов в мире / Е. Н. Летягина // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 3 (1). С. 249–252.
2. Вазим, А. А. Мировое потребление первичных энергоносителей: основные тенденции во втором десятилетии / А. А. Вазим // Векторы благополучия: экономика и социум. 2020. № 3 (38). С. 75–97. [https://doi.org/10.18799/26584956/2020/3\(38\)/1044](https://doi.org/10.18799/26584956/2020/3(38)/1044)

3. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Президентом Рос. Федерации 30.04.2012. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/15177>.
4. Артамонов, Г. Е. Экологическая оценка объектов тепловой энергетики по влиянию на экологические услуги депонирования углерода локальными наземными экосистемами / Г. Е. Артамонов, И. И. Васнев, В. А. Гутников // Проблемы региональной экологии. 2019. № 6. С. 125–132.
5. Соловьянов, А. А. Климат, Российская энергетика, парижское соглашение / А. А. Соловьянов // Энергетическая политика. 2017. № 4. С. 48–54.
6. Белоусов, В. Н. Топливо и процессы горения: учеб. пособие / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Д. Цимбал. 1-е изд. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. 148 с.
7. Афанасьев, В. Я. Перспективы углеводородной энергетики в России в условиях санкционного давления / В. Я. Афанасьев, В. М. Краев, А. И. Тихонов // Уголь. 2023. № 6. С. 43–47. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-6-43-47>
8. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности / С. В. Алексеенко, Л. И. Мальцев, А. Р. Богомолов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. № 12. С. 16–29.
9. Вавилова, П. С. Виды топлива и его использование / П. С. Вавилова, М. М. Мишин, М. Н. Мишина // Наука и образование. 2022. Т. 5, № 2. Ст. № 210.
10. Пономарева, А. А. Топливо-энергетические ресурсы: учеб. пособие / А. А. Пономарева, Е. О. Самуйлова, А. В. Лесных. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 107 с.
11. Жила, В. А. Газоснабжение / В. А. Жила. М.: Изд-во АСВ, 2014. 368 с.
12. Лесных, А. В. Анализ экологического эффекта перевода Владивостокской ТЭЦ-2 на сжигание природного газа / А. В. Лесных, Д. А. Пазников // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2017. № 3 (32). С. 72–80.
13. Гафаров, А. Х. Мониторинг вредных выбросов при сжигании природного газа по выработке тепловой энергии в районах РТ / А. Х. Гафаров, Л. И. Лаптева // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 3. С. 463–466.
14. Мунц, В. А. Горение и газификация органических топлив / В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 148 с.
15. Котельные установки и парогенераторы / А. В. Лесных, К. А. Штым, А. А. Глазепная, М. В. Упский. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 127 с.
16. Белоусов, В. Н. Основы сжигания газа: учеб. пособие / В. Н. Белоусов, О. С. Смирнова, С. Н. Смородин. СПб., 2009. 41 с.
17. Любов, В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив: учеб. пособие / В. К. Любов, С. В. Любова. 2-е изд., перераб. и доп. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с.
18. Ивашкина, Е. Н. Технология переработки газа / Е. Н. Ивашкина, Е. М. Юрьев. М.: КНОРУС, 2024. 230 с.
19. Новиков, Ю. Н. Динамика изменений и современное состояние мировых запасов, добычи и потребления газа / Ю. Н. Новиков // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. № 1. URL: https://www.ngtp.ru/rub/6/14_2013.pdf
20. Бушуев, В. В. Учет факторов изменения климата при прогнозировании цен на природный газ в ЕС / В. В. Бушуев, Д. А. Соловьев // Окружающая среда и энерговедение. 2023. № 3. С. 16–33.
21. Хаустов, С. А. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов / С. А. Хаустов, А. С. Заворин // Вестник науки Сибири. 2014. № 2 (12). С. 21–27.
22. Интенсификация теплообмена винтовыми турбулизаторами потока / Р. Х. Зиятдинов, Ф. А. Галеев, Ю. Ф. Коротков, Б. С. Азизов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 22. С. 134–135.
23. Коротков, Ю. Ф. Трубчатые теплообменники с интенсификаторами потоков теплоносителей / Ю. Ф. Коротков, Г. Х. Гумерова, И. С. Докучаева // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 22. С. 145–146.
24. Котлы стационарные. Стальные конструкции. Общие технические условия: ГОСТ Р 56204–2014. Введ. 01.09.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 26 с.

25. Артемов, И. Н. Обзор и анализ ВПУ, применяемых в блочно-модульных котельных / И. Н. Артемов, Д. В. Тиханкин, Д. С. Свиридова // Инновации и инвестиции. 2021. № 6. С. 180–183.
 26. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 1 / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>
 27. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 2: Образование вредных веществ при сжигании природного газа в атмосферных горелках: экспериментальные исследования / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461>
 28. Любов, В. К. Теплотехнические испытания отопительных котельных при работе на торфяном топливе / В. К. Любов, Д. Г. Чухчин, А. Н. Попов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 422–435. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-422-435>
 29. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.
- Поступила 10.02.2025 Подписана в печать 15.12.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2026

REFERENCES

1. Letyagina E. N. (2010) Current Estimates and Forecasts of Production and Consumption of Fuel and Energy Resources in the World. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, (3), 249–252 (in Russian).
2. Vazim A. A. (2020) Global Primary Energy Consumption: The Main Trends in the Second Decade of the XXI Century. *Journal of Wellbeing Technologies*, (3), 75–97 (in Russian). [https://doi.org/10.18799/26584956/2020/3\(38\)/1044](https://doi.org/10.18799/26584956/2020/3(38)/1044)
3. *Fundamentals of State Policy in the Field of Environmental Development of Russia for the Period up to 2030*: Approved by the President of the Russian Federation 30.04.2012. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/15177> (in Russian).
4. Artamonov G. E., Vasenev I. I., Gutnikov V. A. (2019) Environmental Evaluation of Thermal Energy Facilities Influence on Ecological Services of Carbon Deposition by Local Terrestrial Ecosystems. *Problemy regional'noi ekologii* [Regional Environmental Issues], (6), 125–132 (in Russian).
5. Soloviyarov A. A. (2017) Climate, Russian Energy Sector, Paris Agreement. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], (4), 48–54 (in Russian).
6. Belousov V. N., Tsimbal V. D. (2020) *Fuel and Combustion Processes*. 1st ed. St. Petersburg: HSTPE SPbSUITD. 148 (in Russian).
7. Afanasiev V. Ya., Kraev V. M., Tikhonov A. I. (2023) Prospects for Hydrocarbon Energy in Russia under Sanctions Pressure. *Ugol'*, (6), 43–47 (in Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-6-43-47>
8. Alekseenko S. V., Maltsev L. I., Bogomolov A. R., Chernetskiy M. Yu., Kravchenko I. V., Kravchenko A. I., Lapin D. A., Shevyrev S. A., Lyrshchikov S. Yu. (2017) Results of Pilot-Operating Combustion of Coal-Water Fuel in a Low-Capacity Hot Water Boiler. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 328 (12), 16–28 (in Russian).
9. Vavilova P. S., Mishin M. M., Mishina M. N. (2022) Types of Fuel and Its Use. *Nauka i obrazovaniye* [Science and Education], 5 (2), 210 (in Russian).
10. Ponomareva A. A., Samuilova E. O., Lesnykh A. V. (2021) *Fuel and Energy Resources*. SPb, ITMO University. 107 (in Russian).
11. Zhila V. A. (2014) *Gas Supply*. Moscow, ASB Publishing House. 368 (in Russian).
12. Lesnykh A., Paznikov D. (2017) Analysis of the Environmental Effect of Converting Vladivostok CHPP-2 to Natural Gas Combustion. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU = FEFU: School of Engineering Bulletin*, (3), 72–80 (in Russian).

13. Gafarov A. H., Lapteva L. I. (2010) Monitoring of Harmful Emissions from Natural Gas Combustion for Thermal Energy Generation in the Regions of the Republic of Tatarstan. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, (3), 463–466 (in Russian).
14. Munts V. A., Pavlyuk E. Yu. (2019) *Combustion and Gasification of Organic Fuels*. Yekaterinburg, Ural University Publishing House. 148 (in Russian).
15. Lesnykh A. V., Shtym K. A., Glazebnaya A. A., Upsky M. V. (2021) *Boiler Installations and Steam Generators*. Vladivostok, Publishing House of the Far Eastern Federal University. 127 (in Russian).
16. Belousov V. N., Smirnova O. S., Smorodin S. N. (2009) *Fundamentals of Gas Combustion*. 1st ed. St. Petersburg. 41 (in Russian).
17. Lyubov V. K., Lyubova S. V. (2017) *Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels*. Arkhangelsk, NArFU. 533 (in Russian).
18. Ivashkina E. N., Iur'ev E. M. (2024) *Gas Processing Technology*. Moscow, KnoRus Publ. 230 (in Russian).
19. Novikov Yu. N. (2013) Dynamics of Changes and the Current state of World Reserves, Production and Consumption of Gas. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* [Oil and Gas Geology. Theory and practice], 8 (1). Available at: https://www.ngtp.ru/rub/6/14_2013.pdf (in Russian).
20. Bushuev V. V., Solovyev D. A. (2023) Accounting for Climate Change Factors in Forecasting Natural Gas Prices in the EU. *Journal of Environmental Earth and Energy Study (JEEES)*, (3), 16–33 (in Russian).
21. Khaustov S. A., Zavorin A. S. (2014) Modern Trends in the Design of Fire-Tube Boilers. *Vestnik nauki Sibiri* [Bulletin of Siberian Science], (2), 21–27 (in Russian).
22. Ziyatdinov R. H., Galeev F. A., Korotkov U. F., Azizov B. S. (2014) Intensification of Heat Exchange by Screw Flow Turbulators. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 17 (22), 134–135 (in Russian).
23. Korotkov Yu. F., Gumerova G. H., Dokuchaeva I. S. (2014) Tubular Heat Exchangers with Heat Transfer Flow Intensifiers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 17 (22), 145–146 (in Russian).
24. State Standart R 56204–2014. *Stationary Boilers. Steel Structures. General Technical Conditions*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 26 (in Russian).
25. Artemov I. N., Tikhankin D. V., Sviridova D. S. (2021) Review and Analysis of TLUs Used in Modular Boiler Houses. *Innovation & Investment*, (6), 180–183 (in Russian).
26. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 340–354 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>
27. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 2. Pollutants Formation by Natural Gas Combustion in Atmospheric Burners: Experimental Studies. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (5), 450–461 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461>
28. Lyubov V. K., Chukhchin D. G., Popov A. N. (2022) Thermal Engineering Tests of Heating Boiler Houses when Working on Peat Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 422–435 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-422-435>
29. Trembovlya V. I., Finger E. D., Avdeeva A. A. (1991) *Thermal Engineering Tests of Boiler Installations*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 416 (in Russian).