

СЖИГАНИЕ МАЗУТА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ С НАДДУВОМ И РАЗРЕЖЕНИЕМ

Ахметова Р.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ahmetova_rv@bk.ru

Резюме: **ЦЕЛЬ.** Экспериментальное исследование и сравнение режимных параметров работы энергетических котлов при сжигании мазута с наддувом и при сжигании мазута с разрежением для повышения эффективности использования мазута как топлива (увеличения КПД) и снижения вредных выбросов оксидов азота. **МЕТОДЫ.** В ходе исследования использованы натурные экспериментальные исследования на промышленных котлах ТГМ-84Б и ТГМЕ-46. Оценка эффективности их работы выполнялась методом обратного теплового баланса. Для верификации результатов применялся комплекс взаимосвязанных методов: газовый анализ выбросов оксидов азота, серы и углерода, оптическая пирометрия факела и сопоставительный анализ энергетических затрат на работу тягодутьевых машин. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Сжигание мазута характеризуется высокими температурами в ядре факела и повышенными выбросами оксидов азота. При этом необходимость защиты хвостовых поверхностей от сернокислотной коррозии заставляет завышать температуру уходящих газов, что снижает КПД котла относительно газового режима. Одним из способов повышения эффективности использования мазута является его сжигание в котлах с наддувом, при котором в герметичной топке создается избыточное давление воздуха, а присосы холодного воздуха через неплотности обмуровки полностью отсутствуют. В котлах под наддувом удаление продуктов сгорания происходит за счет избыточного давления в топочной камере и естественной тяги дымовой трубы. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате экспериментального исследования сжигания мазута М100 на котле ТГМЕ-464 при сжигании с наддувом и на котле ТГМ-84Б при сжигании с разрежением получено повышение коэффициента полезного действия на 0,33% и снижение выбросов оксидов азота, удельные затраты электроэнергии на тягу и дутьё при наддуве в 2 раза ниже, чем при разрежении.

Ключевые слова: Мазут; котел; наддув; разрежение; сжигание; выбросы; оксиды азота; эффективность.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Для цитирования: Ахметова Р.В. Сжигание мазута в энергетических котлах с наддувом и разрежением // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 4. С. 157-169. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-157-169.

COMBUSTION OF FUEL OIL IN POWER BOILERS WITH OVERPRESSURE AND UNDER PRESSURE

Akhmetova R.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ahmetova_rv@bk.ru

Abstract. PURPOSE. Experimental study and comparison of operating parameters of power boilers during fuel oil combustion under pressurization versus draft conditions to increase fuel

oil utilization efficiency (boiler efficiency improvement) and reduce hazardous nitrogen oxide emissions. **METHODS.** The study involved full-scale experimental testing on industrial boilers TGM-84B and TGME-464. The boiler efficiency was evaluated using the heat-loss (indirect) balance method. To verify the results, an integrated set of interrelated methods was applied, including gas analysis of nitrogen, sulfur, and carbon oxide emissions, optical flame pyrometry, and a comparative analysis of the auxiliary energy consumption of draft fans and blowers.. **RESULTS.** Fuel oil combustion is characterized by high temperatures in the flame core and elevated nitrogen oxide emissions, while the necessity to protect downstream heating surfaces from sulfuric acid corrosion requires maintaining a higher flue gas temperature, which reduces boiler efficiency compared to gas-fired operation. One method to enhance fuel oil utilization efficiency is its combustion in pressurized boilers, where positive air pressure is maintained inside a gas-tight furnace, completely eliminating cold air infiltration through the casing defects. In pressurized boilers, the evacuation of combustion products occurs due to the overpressure in the furnace chamber and the natural draft of the stack. **CONCLUSION.** As a result of the experimental study of M100 fuel oil combustion in the TGME-464 boiler under pressurization and in the TGM-84B boiler under draft conditions, an increase in boiler efficiency by 0,33% and a reduction in nitrogen oxide emissions were obtained. The specific electricity consumption for forced and induced draft under pressurization is two times lower than under draft conditions.

Keywords. fuel oil, boiler, pressurization, draft, combustion, emissions, nitrogen oxides, efficiency..

Acknowledgments: This work was supported by a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific, and other organizations to support human resource development plans aimed at encouraging scientific and faculty staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities.

For citation: Akhmetova R.V. Combustion of fuel oil in power boilers with overpressure and under pressure. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (4): 157-169. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-157-169.

Введение (Introduction)

Мазут, не смотря на его дороговизну по сравнению с природным газом и углем, остаётся востребованным топливом на ТЭЦ как резервное, аварийное, для розжига или в специфических логистических условиях. Тем более многие ТЭС, где основным топливом является природный газ, имеют мазутное хозяйство как резерв на случай аварий на газопроводе или резкого падения давления в сети. Также в удалённых регионах Крайнего Севера, куда сложно подвести магистральный газ или организовать доставку угля, мазут остаётся экономически оправданным основным топливом. Поэтому при использовании мазута энергетическим компаниям необходимо для снижения эксплуатационных издержек и повышения экологической безопасности применять инновационные технологии подготовки и сжигания топлива. Как отмечено в работах [1-5], при сжигании мазута в энергетических котлах проблемными остаются вопросы повышения коэффициента полезного действия и снижения выбросов оксидов азота по сравнению с сжиганием природного газа. Значительная доля эксплуатационных затрат при использовании мазута в качестве топлива приходится на поддержание в рабочем состоянии мазутных хранилищ. Поэтому тема исследований по повышению экономической эффективности сжигания мазута в энергетических котлах является актуальной.

Цель исследования заключается в экспериментальном исследовании и сравнении режимных параметров работы энергетических котлов при сжигании мазута с наддувом и при сжигании мазута с разрежением для повышения эффективности использования мазута как топлива (увеличения КПД) и снижения вредных выбросов оксидов азота.

Вопросы повышения экологических показателей при сжигании мазута долгое время рассматривались преимущественно в контексте сокращения выбросов оксидов азота [6-12]. Обобщение имеющихся данных свидетельствует о том, что наиболее действенной мерой в этом направлении служит рециркуляция продуктов сгорания: часть дымовых газов отводится из зоны расщепки водяного экономайзера и направляется непосредственно в топку. Применяются способы ступенчатого сжигания мазута и подача

водомазутной эмульсии в топку [13-18]. Однако, как отмечается в литературе, эффективность применения этих методов ограничена конструктивными особенностями энергетических котлов, работающих с разрежением при уравновешенной тяге дымососа [9], [12]. Наличие подсосов холодного воздуха через неплотности обмуровки снижает КПД и осложняет точное управление процессом горения, нивелируя часть экологического эффекта.

В связи с этим перспективным направлением повышения эффективности применения мазута как топлива для энергетических котлов является его сжигание при наддуве воздуха, при котором в топке при помощи дутьевого вентилятора создается избыточное давление. Дымосос при работе котла под наддувом не используется, и дымовые газы удаляются за счет избыточного давления в топке и аэродинамической тяги дымовой трубы. Это приводит к ограничению применения сжигания топлива под наддувом из-за необходимости регулирования количества подключаемых к дымовой трубе котлов, которые работают с дымососами при разрежении в топке. Перспективные разработки по применению автоматизированного управления для обеспечения аэродинамической тяги при включении в работу котлов для сжигания топлива под наддувом позволят в полной мере использовать преимущества этого способа, который экспериментально исследуется в данной статье.

Научная значимость исследования состоит в выявлении и количественном обосновании преимуществ сжигания мазута в герметичных топках с наддувом по сравнению с традиционным методом с уравновешенной тягой на основе натурных экспериментов на промышленных котлах.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций по повышению КПД, снижению вредных выбросов и уменьшению удельных затрат электроэнергии на тягу и дутьё при сжигании мазута на действующих тепловых электрических станциях.

Литературный обзор (Literature Review)

В публикациях [1–5] рассматриваются общие проблемы сжигания мазута, связанные с высокими температурами в ядре факела, повышенными выбросами оксидов азота и необходимостью защиты хвостовых поверхностей от серноокислотной коррозии.

В работах [6–12] подробно исследуются методы снижения выбросов оксидов азота при сжигании мазута. Абрютин А.А. [6] изучил влияние недостатка воздуха на образование NOx. Mitchell [7] предложил кинетическую модель образования оксидов азота. Zannis [8] исследовал применение водомазутных эмульсий как эффективного метода снижения NOx. Однако, как отмечается в литературе [9, 12], эффективность применения этих методов ограничена конструктивными особенностями котлов, работающих с разрежением при уравновешенной тяге. Подсосы холодного воздуха через неплотности обмуровки снижают КПД и осложняют управление процессом горения. В нормативном методе [9] приведены базовые соотношения для оценки потерь теплоты, однако отсутствуют экспериментальные данные по работе котлов в режиме наддува при сжигании мазута.

В последние годы активно развиваются исследования по повышению эффективности сжигания жидкого топлива. Radin и др. [13] показали, что при глубоких разгрузках барабанных котлов работа с разрежением приводит к дополнительным потерям теплоты. Shlegel и др. [14] экспериментально изучили процессы горения капель водомазутных эмульсий, подтвердив возможность снижения NOx. Chen и др. [15] выполнили исследование рециркуляции дымовых газов в мазутных промышленных котлах, показав высокую эффективность этого метода.

На основе анализа приведённых исследований можно заключить [19-21], что отсутствуют комплексные экспериментальные работы, сравнивающие работу энергетических котлов при сжигании мазута с наддувом и с разрежением. В нормативном методе [19] приведены базовые соотношения для оценки потерь теплоты, однако отсутствуют экспериментальные данные по работе котлов в режиме наддува при сжигании мазута. В работе Григорьева и др. [20] рассматриваются вопросы снижения выбросов NOx при двухстадийном сжигании, но без прямого сравнения режимов с наддувом и разрежением. Численное моделирование топочных процессов, выполненное в работе [22], показывает важность учёта аэродинамических факторов при организации сжигания, однако экспериментальные данные для мазутных котлов остаются ограниченными. Проведение такого сравнения и количественная оценка преимуществ наддувного режима по КПД, выбросам и энергопотреблению представляют собой ключевую задачу, решению которой посвящена настоящая статья.

Материалы и методы (Materials and methods)

Экспериментальная часть работы выполнена в промышленных условиях на базе действующих энергетических котлоагрегатов тепловых электрических станций. Исследования высокотемпературных режимов сжигания жидкого топлива под наддувом проводились в топочной камере котла ТГМЕ-464. Энергетический котел ТГМЕ-464 имеет гидравлический контур с естественной циркуляцией и предназначен для работы в блоке с турбиной Т-100/120-130/3 [10]. Геометрические размеры топки составляют $7,7 \times 13,5$ м при объеме 1610 м^3 и тепловом напряжении топочного пространства 230 кВт/м^3 [10]. На задней стене топки размещены 8 горелок ГМУ-45-12 в 2 яруса: нижний ярус на отметке 6,15 м, верхний на отметке 8,75 м. Проектный расход мазута через горелочные форсунки ТКЗ-6 по 8 т/ч при давлении 3,5 МПа и давлении пара 1,3 МПа при его расходе по 140 кг/ч. Воздух нагревается вне котельной регенеративным воздушным подогревателем РВП-88М. Мазут сжигается с подогревом воздуха калорифером КФСО-11 перед РВП-88М. Котел имеет дутьевой вентилятор ВДН-25×2 с расходом $V=528 \cdot 103 \text{ м}^3/\text{ч}$, дымосос рециркуляции ГД-31 с $V=94 \cdot 103 \text{ м}^3/\text{ч}$ и основной дымосос ДОД-28,5 с $V=752 \cdot 103 \text{ м}^3/\text{ч}$ для случая перехода на режим работы с уравновешенной тягой. Параметры пара и воды котла ТГМЕ-464 во время опытов: температура перегретого пара 560°C , давление 14 МПа, температура питательной воды 230°C , температура нагрева воздуха в РВП 260°C . Сжигался мазут М100 с теплотой сгорания $Q_H^p=39671 \text{ кДж/кг}$.

В качестве объекта для изучения сжигания мазута при пониженном давлении в топке выбран котёл ТГМ-84Б, изготовленный на Таганрогском котельном заводе [10]. Конструкция топливной камеры включает шесть горелочных аппаратов марки ГМУ-45, смонтированных на фронтальной стене в два уровня: четыре – на нижнем ярусе и две – на верхнем. Двухсветный экран обеспечивает разделение топочного объёма на две симметричные половины. Для котла ТГМ-84Б установлены следующие номинальные параметры рабочей среды: температура пара на выходе из котла – 560°C , рабочее давление – 14 МПа, температура питательной воды – 230°C . Воздух, подаваемый в топку, предварительно нагревается в калориферах до 70°C перед поступлением в регенеративный воздухоподогреватель, после которого его температура повышается до 225°C .

Оценка эффективности работы котла проводилась по значению КПД, определяемого через обратный баланс с вычислением потерь теплоты: $q_2=(H_{yx} - \alpha_{yx}N_{хв})100/Q_p^p$. Здесь H_{yx} – энтальпия отходящих дымовых газов; $N_{хв}$ – энтальпия холодного воздуха; обе величины отнесены к 1 кг сожжённого топлива; α_{yx} – коэффициент, характеризующий избыток воздуха в продуктах горения; Q_p^p – располагаемая теплота, выделяемая при сгорании единицы топлива [1-4, 10]. Все основные показатели фиксировались с помощью штатной измерительной аппаратуры, при этом для повышения достоверности отдельные параметры контролировались дополнительными приборами. В процессе экспериментов паровая производительность котла изменялась варьированием числа работающих горелок и расхода мазута через них. Содержание оксидов CO , SO_x , O_2 , NO_x^{ppm} контролировалось газоанализатором ДАГ-16 в сечении опускного газохода в зоне рассечки водяного экономайзера. Отбор проб осуществлялся в фиксированной точке - сечении опускного газохода в зоне рассечки водяного экономайзера - для обеспечения сопоставимости результатов по всем режимам. Погрешность измерения газоанализатора ДАГ-16 составляет: для $\text{O}_2 \pm 1,5\%$ от измеряемой величины, для $\text{NO}_x \pm 2\%$, для $\text{SO}_x \pm 3\%$, для $\text{CO} \pm 2,5\%$, что соответствует паспортным данным прибора и обеспечивает достоверность полученных результатов. Полученные значения NO_x^{ppm} приводились к единому показателю при $\alpha = 1,4$ с использованием соотношения $\text{NO}_x^{1,4}=2,05 \text{ NO}_x^{\text{ppm}}\alpha/1,4$ [5-8]. Для определения интенсивности свечения факела на уровне горелок применялся радиометр ТЕРА-50, измерения выполнялись через технологические лючки. Поскольку на котле ТГМЕ-464 смотровые отверстия закрыты защитными стёклами, вносимая ими погрешность компенсировалась путём предварительной тарировки прибора с учётом коэффициента пропускания стекла.

Результаты (Results)

Для корректного сравнения эмиссионных характеристик все значения NO_x , CO и SO_x в данной работе приведены к единому коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$, который является типовым для мазутных котлов данного класса и рекомендован для приведения в нормативной документации [9, 11]. В ходе экспериментов фактический коэффициент избытка воздуха в котле ТГМЕ-464 поддерживался в диапазоне 1,18–1,22, а в котле ТГМ-84Б — в диапазоне 1,08–1,12, что обусловлено необходимостью снижения образования оксидов серы и предотвращения сернокислотной коррозии при наддувом

режиме.

Полученные экспериментальные результаты для сжигания мазута М100 с наддувом в топке котла ТГМЕ-464 и для сжигания с разрежением в топке котла ТГМ-84Б приведены в таблице при различных паровых нагрузках [11].

Как видно из таблицы 1, КПД котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом воздуха в топке при всех нагрузках превышает значение КПД котла ТГМ-84Б при сжигании мазута с разрежением в топке в среднем на 0,33 %. Это объясняется отсутствием присосов в топке и по газовому тракту котла ТГМЕ-464 и меньшими потерями теплоты с уходящими газами [11]. Для котла ТГМ-84Б потери теплоты с уходящими газами в среднем на 0,38 % выше по сравнению с котлом ТГМЕ-464.

Зависимости затрат электроэнергии на тягу и дутье b в котлах ТГМЕ-464 при наддуве и ТГМ-84Б при разрежении для различных паровых нагрузок D при сжигании мазута приведены на рисунке 1.

Таблица

Table

Результаты по режимным параметрам работы котла ТГМЕ-464 при сжигании с наддувом и котла ТГМ-84Б при сжигании с разрежением

The results for the operating parameters of the TGME-464 boiler when burning with forced draft and the TGM-84B boiler when burning with vacuum draft

Котел	ТГМЕ-464, наддув			ТГМ-84Б, разрежение		
Паровая нагрузка, т/ч	250	350	460	260	340	420
Число работающих горелок, шт.	4	6	8	4	6	6
Давление мазута перед форсунками, МПа	1,6	2,2	2,8	1,7	2,0	2,8
Давление пара на распыл мазута, МПа	0,8	0,8	0,8	1,0	1,1	1,2
Давление воздуха перед горелками, кгс/м ²	150	250	420	100	97	203
Температура воздуха перед РВП, °С	80	72	70	80	75	70
Давление в топке, кгс/м ²	23	78	210	-	-	-
Разрежение в топке, кгс/м ²	-	-	-	3,5	4	5
Температура газов за поворотной камерой, °С	590	618	655	568	600	650
Доля рециркуляции газов в топку, %	10	19	20	-	-	-
Содержание кислорода O ₂ в РВЭ, %	2,4	2,3	2,1	2,2	1,8	1,6
Температура уходящих газов, °С	147	153	156	142	150	154
Потери тепла с уходящими газами, %	6,14	6,33	6,49	6,59	6,71	6,84
Потери в окружающую среду, %	0,74	0,53	0,41	0,62	0,48	0,41
КПД котла брутто, %	93,12	93,14	93,10	92,79	92,81	92,75
Энергия на тягу и дутье, кВт×ч/Гкал	2,73	3,09	5,2	6,3	8,1	8,5
NO _x ^{1,4} в дымовых газах при α=1,4, мг/нм ³	197	238	314	219	251	318
CO ^{1,4} в дымовых газах при α=1,4, мг/нм ³	7	10	14	5	8	10
SO _x ^{1,4} в дымовых газах при α=1,4, мг/нм ³	1965	2430	3054	482	1006	1590

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

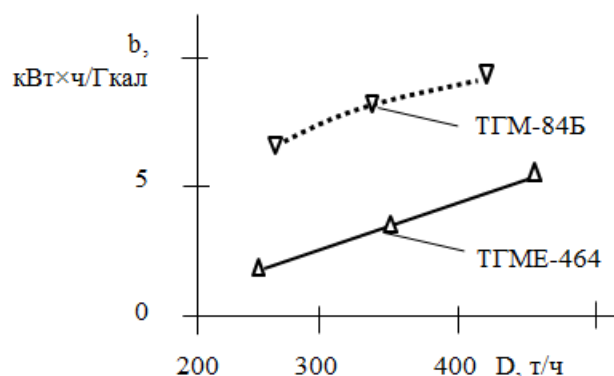


Рис.1 Зависимости затрат электроэнергии на тягу и дутье b в котлах ТГМЕ-464 при наддуве и ТГМ-84Б при разрежении для различных паровых нагрузок при сжигании мазута

Fig.1. Dependences of electricity consumption for draft and forced draft b in TGME-464 boilers under pressurization and in TGM-84B boilers under negative pressure for various steam loads D when firing fuel oil

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сопоставление режимов работы, отражённое на рисунке 1, свидетельствует о том, что для котла ТГМ-84Б, функционирующего с разрежением в топке, характерны повышенные значения удельного электропотребления b приводами тягодутьевых машин – эта тенденция сохраняется при всех исследуемых паровых нагрузках D . В противоположность этому, у котла ТГМЕ-464, работающего под наддувом, удельный расход электроэнергии b на единицу производимой теплоты оказывается значительно ниже: разница с показателями котла ТГМ-84Б составляет от 1,7 до 2,3 раза.

На рисунке 2 для сжигания мазута приведены зависимости содержания оксидов азота $\text{NO}_x^{1,4}$ в дымовых газах при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,4$ для котла ТГМЕ-464 при наддуве и для котла ТГМ-84Б при разрежении для различных паровых нагрузок D .

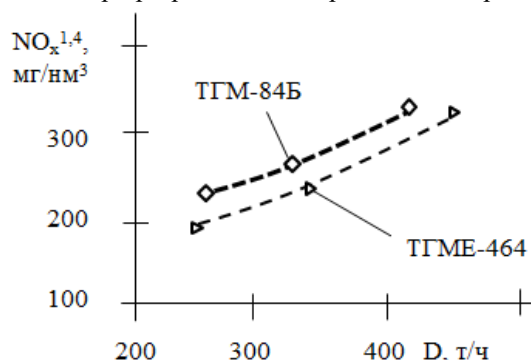


Рис.2. Зависимости содержания оксидов азота $\text{NO}_x^{1,4}$ в дымовых газах котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом и в котле ТГМ-84Б при сжигании с разрежением для различных паровых нагрузок D

Fig.2. Dependencies of nitrogen oxides NO_x content in flue gases of a TGME-464 boiler under pressurization and a TGM-84B boiler under negative pressure for various steam loads D when firing fuel oil

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 2, при сжигании мазута с наддувом содержание оксидов азота $\text{NO}_x^{1,4}$ в дымовых газах в котле ТГМЕ-464 заметно меньше по сравнению с котлом ТГМ-84Б при сжигании с разрежением для всех паровых нагрузок D . Это объясняется рециркуляцией дымовых газов, отбираемых рециркуляционным дымососом в количестве от 10 % до 20 % из расщетки водяного экономайзера и подачей их в топку котла ТГМЕ-464. На котле ТГМ-84Б рециркуляция дымовых газов в топку не предусмотрена. Регламентированное значение содержания оксидов азота $\text{NO}_x^{1,4}$ в дымовых газах при сжигании мазута равно 350 мг/нм³. При рециркуляции на котле ТГМЕ-464 дымовые газы отбираются рециркуляционным дымососом ГД-31 из опускного газохода в расщелке водяного экономайзера и подаются в смесительную камеру воздуховода, после которого вместе с воздухом через горелку поступают в топку. Рециркуляция снижает коэффициент полезного действия котла ТГМЕ-464, так как снижается температура дымовых газов,

поступающих в горизонтальный газоход для перегрева водяного пара. Учет снижения коэффициента полезного действия при рециркуляции выполняется путем введения поправки в формулу для расчета потерь теплоты с уходящими газами.

На рисунке 3 приведены полученные экспериментальные зависимости содержания оксида углерода $\text{CO}^{1,4}$ в дымовых газах при $\alpha=1,4$ для котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом и для котла ТГМ-84Б при сжигании с разрежением для различных паровых нагрузок D .

Согласно зависимостям, приведённым на рисунке 3, содержание оксида углерода $\text{CO}^{1,4}$ в отходящих газах обнаруживает прямую корреляцию с уровнем паровой нагрузки: по мере её увеличения концентрация CO возрастает. Сопоставление двух режимов сжигания показывает, что наддувная схема работы котла ТГМЕ-464 сопровождается более высокими показателями эмиссии $\text{CO}^{1,4}$ в сравнении с разреженным режимом котла ТГМ-84Б. Причиной данного различия служит более высокое значение коэффициента избытка воздуха, поддерживаемое в топке котла ТГМЕ-464.

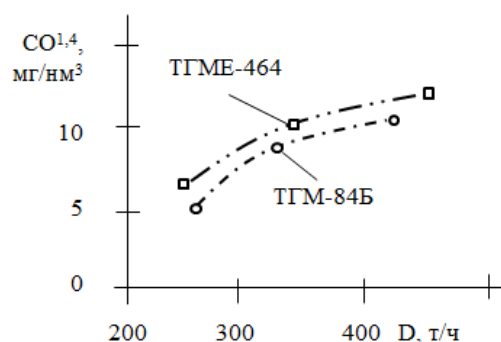


Рис.3. Зависимости содержания оксида углерода $\text{CO}^{1,4}$ в дымовых газах при $\alpha=1,4$ для котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом и для котла ТГМ-84Б при сжигании с разрежением для различных паровых нагрузок D

Fig.3. Dependencies of carbon monoxide CO content in flue gases at $\alpha=1.4$ for a TGME-464 boiler under pressurization and for a TGM-84B boiler under negative pressure for various steam loads D when firing fuel oil

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сопоставление уровней эмиссии оксидов серы, отражённое на рисунке 4, показывает, что для котла ТГМЕ-464, работающего под наддувом, содержание $\text{SO}_x^{1,4}$ в отходящих газах в среднем в 2–4 раза выше, чем для котла ТГМ-84Б при сжигании мазута с разрежением. Причём это превышение носит системный характер и фиксируется во всём диапазоне изменения паровых нагрузок D [11].

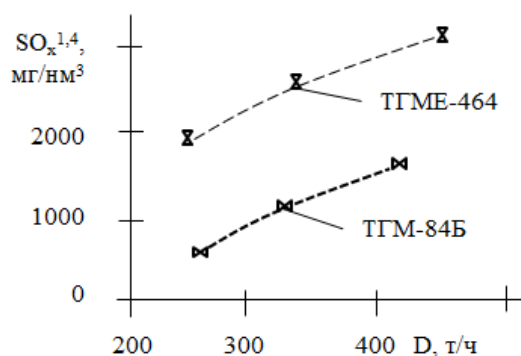


Рис.4. Зависимости содержания оксидов серы $\text{SO}_x^{1,4}$ в дымовых газах котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом и в котле ТГМ-84Б при сжигании с разрежением для различных паровых нагрузок D

Fig.4. Dependencies of sulfur oxides SO_x content in flue gases at $\alpha=1.4$ for a TGME-464 boiler under pressurization and a TGM-84B boiler under negative pressure for various steam loads D when firing fuel oil

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Повышенное содержание оксидов серы в дымовых газах котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом (рис. 4) объясняется более высокими значениями избытка воздуха по сравнению с избытками воздуха в котле ТГМ-84Б. Норматив выбросов оксидов

серы $\text{SO}_x^{1,4}$ в дымовых газах котлов с производительностью 420 и 500 т/ч составляет 3000 мг/нм³ [11].

На рисунке 5 для котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом приведены значения интенсивностей излучения факела, измеренные с помощью радиометра ТЕРА-50 через смотровые лючки в стенах топки при нагрузке 460 т/ч. Смотровые лючки расположены на уровне горелок. Направления тангенциальных периферийных круток воздуха в горелках показаны стрелками. Для котла ТГМЕ-464 угол наклона лопаток периферийных круток в горелках равен 45°. Из рис. 5 видно, что на уровне горелок верхнего яруса интенсивность излучения факела выше по сравнению с уровнем нижнего яруса.

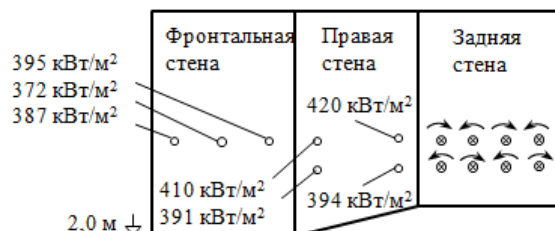


Рис. 5. Значения интенсивностей излучения факела $E(\text{кВт}/\text{м}^2)$, измеренные с помощью радиометра ТЕРА-50 через смотровые лючки в стенах топки для котла ТГМЕ-464 при сжигании мазута с наддувом при паровой нагрузке 460 т/ч

Fig.5. Flame radiation intensity values $E(\text{kW}/\text{m}^2)$ measured with a TERA-50 radiometer through observation ports in the furnace walls of a TGME-464 boiler during pressurized fuel oil combustion at a steam capacity of 460 t/h

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Значения интенсивностей излучения факела, измеренные с помощью радиометра ТЕРА-50 через смотровые лючки в стенах для котла ТГМ-84Б при сжигании мазута с разрежением при паровой нагрузке 420 т/ч приведены на рисунке 6. Крутка воздуха в горелках периферийная тангенциальная, угол наклона лопаток периферийных круток для котла ТГМ-84Б в горелках равен 45°.



Рис. 6. Значения интенсивностей излучения факела $E(\text{кВт}/\text{м}^2)$, измеренные с помощью радиометра ТЕРА-50 через смотровые лючки в стене топки для котла ТГМ-84Б при сжигании мазута с разрежением при паровой нагрузке 420 т/ч

Fig.6. Flame radiation intensity values $E(\text{kW}/\text{m}^2)$, measured with a TERA-50 radiometer through observation ports in the furnace wall of a TGM-84B boiler during balanced-draft fuel oil combustion at a steam capacity of 420 t/h

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 6, значения интенсивности излучения факела $E(\text{кВт}/\text{м}^2)$ для котла ТГМ-84Б при сжигании мазута с разрежением при паровой нагрузке 420 т/ч значительно меньше по сравнению с сжиганием мазута под наддувом в котле ТГМЕ-464.

На рисунке 7 приведены измеренные через боковые смотровые лючки с помощью радиометра ТЕРА -50 на уровне горелок второго яруса значения интенсивностей излучения факела E при сжигании мазута под наддувом в котле ТГМЕ-464 и под разрежением в котле ТГМ-84Б при изменении паровых нагрузок.

Как видно из рисунка 7, значения интенсивности излучения факела E на уровне горелок второго яруса при сжигании мазута под наддувом в котле ТГМ-464 заметно превышают значения при сжигании под разрежением в котле ТГМ-84Б для всех нагрузок D . Это объясняется тем, что концентрация сажистых частиц при сжигании мазута под наддувом в факеле котла ТГМЕ-464 значительно выше по сравнению с факелом в котле

ТГМ-84Б при разрежении. Частицы сажи дают сплошной спектр излучения, на основе которого формируется интенсивность излучения в видимой и инфракрасной областях. Для паровой нагрузки 412 т/ч при сжигании мазута под разрежением в работе [6] при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,13$ было получено значение интенсивности излучения начального ядра факела 390 кВт/м^2 , что коррелирует с результатами настоящей статьи.

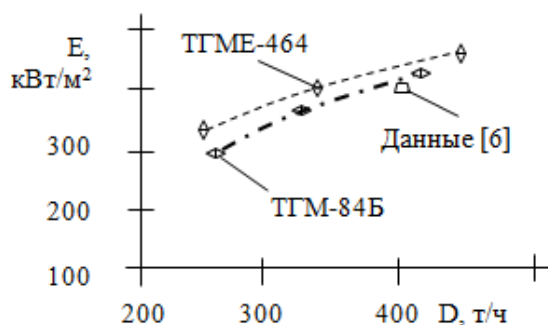


Рис. 7. Измеренные через смотровые лючки с помощью радиометра ТЕРА -50 на уровне горелок второго яруса значения интенсивностей излучения E на начальном участке факела при сжигании мазута под наддувом в котле ТГМЕ-464 и под разрежением в котле ТГМ-84Б при изменении паровых нагрузок D

Fig.7. Flame radiation intensity values E at the initial flame zone measured with a TERA-50 radiometer through observation posts at the level of the second-row burners during pressurized fuel oil combustion in a TGME-464 boiler and balanced-draft combustion in a TGM-84B boiler under varying steam loads D

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С учетом рекомендаций Нормативного метода теплового расчета котлов [9] можно определить степень черноты факела при сжигании мазута под наддувом в котле ТГМЕ-464 и при разрежении в котле ТГМ-84Б. Исходя из закона Стефана-Больцмана по измеренным значениям интенсивности излучения E и степени черноты факела получены значения температуры факела, представленные на рисунке 8.

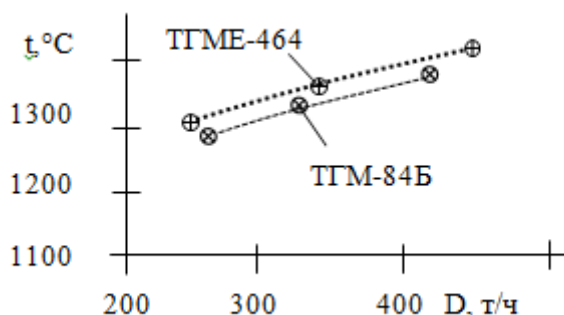


Рис. 8. Температура ядра факела на уровне горелок второго яруса t при сжигании мазута под наддувом в котле ТГМЕ-464 и под разрежением в котле ТГМ-84Б при изменении паровых нагрузок D

Fig.8. Flame core temperature t at the level of the second-row burners during pressurized fuel oil combustion in a TGME-464 boiler and balanced-draft combustion in a TGM-84B boiler under varying steam loads D

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Температура в ядре факела при сжигании мазута с наддувом в котле ТГМЕ-464 сравнительно невелика и составляет 1410°C при наибольшей паровой нагрузке 460 т/ч, что объясняется рециркуляцией дымовых газов из опускного газохода в топку. Невысокие температуры факела при сжигании мазута с разрежением в топке котла ТГМ-84Б связаны с подсосами холодного воздуха в зону горения через неплотности в топке и центральную коаксиальную трубу горелки ГМУ-45.

Обсуждение результатов (Discussions)

Полученные экспериментальные данные позволяют провести сравнительный анализ эффективности сжигания мазута в котлах с наддувом (ТГМЕ-464) и с разрежением

(ТГМ-84Б) и дать практические рекомендации для оптимизации режимов работы энергетических котлов на резервном топливе.

Прежде всего, следует отметить устойчивое превышение КПД брутто котла ТГМЕ-464 над аналогичным показателем котла ТГМ-84Б во всём диапазоне паровых нагрузок (в среднем на 0,33 %). Это обусловлено отсутствием присосов воздуха в топку и газовый тракт при работе с наддувом, что снижает потери теплоты с уходящими газами примерно на 0,38 %. Данный результат согласуется с известными положениями нормативного метода теплового расчёта [9] и подтверждает, что герметизация топки является ключевым фактором повышения топливной эффективности.

Значительное преимущество наддувного режима выявлено и по удельному расходу электроэнергии на тягу и дутьё. Для котла ТГМЕ-464 эти затраты в 1,7...2,3 раза ниже, чем для ТГМ-84Б, что объясняется отсутствием основного дымососа в схеме с наддувом – удаление продуктов сгорания происходит за счёт избыточного давления в топке и аэродинамической тяги трубы. Это даёт существенную экономию на собственные нужды и может рассматриваться как один из главных аргументов в пользу перевода котлов на наддувное сжигание мазута, особенно в периоды длительной работы на резервном топливе.

Выводы (Conclusions)

Сжигание мазута с наддувом воздуха в топке при осуществлении рециркуляции дымовых газов из опускного газохода характеризуется повышенным значением коэффициента полезного действия котла и сопровождается снижением вредных выбросов оксидов азота в атмосферу по сравнению с сжиганием мазута в котлах при разрежении в топке.

Удельные затраты электроэнергии на электропривод тягодутьевых устройств в котлах при сжигании мазута с наддувом значительно ниже затрат электроэнергии на тягодутьевой электропривод в котлах с разрежением в топке.

Сложностью в эксплуатации котлов при сжигании мазута с наддувом является обеспечение газоплотности топки, так как имеющееся избыточное давление топочных газов приводит к выбиванию дымовых газов в помещение котельной и загазованности помещения. Другой сложностью в эксплуатации котлов под наддувом является обеспечение аэродинамической тяги дымовой трубы, к которой подключены дымоходы котлов работающих с разрежением в топке.

Литература

1. Bueters K.A. NOx emissions from utility boilers // AICHE Symposium Series. 1975. Vol. 148. P. 85-94.
2. Lavoie, G.A. Combustion // The Science and Technology of Coal Utilization / ed. by B.R. Cooper and W.A. Ellingson. – New York: Plenum Press, 1984.
3. Fenimore, C.P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames // Combustion and Flame. 1972. Vol. 19. No. 2. P. 289–296.
4. Демин А.В., Демина Г.В. Экологические характеристики термической утилизации отходов с внешним и внутренним подводом тепловой энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 6. С. 143-152. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152.
5. Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Халиулин Р.Р., Теляшов Д.А., Тихонов О.А. Исследование газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй с вихревым воздушным потоком // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 156-167. DOI: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-156-167.
6. Абрютин А.А. Сжигание мазута с недостатком воздуха // Теплоэнергетика. 2011. № 2. С. 16–21.
7. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // AICHE Journal. 1982. Vol. 28. No. 2. P. 302–311.
8. Hountalas D.T., Mavropoulos G.C., Zannis T.C. Comparative evaluation of EGR, intake water injection and fuel/water emulsion as NOx reduction techniques for heavy duty diesel engines // SAE Technical Paper. 2007. No. 2007-01-0120. P. 1–18.
9. Ахметова, Р. В. Разработка и исследование энергоэффективных методов сжигания газового топлива в энергетических системах / Р. В. Ахметова, Ю. Н. Звонарева, И. Р. Шорохов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 1(53). – С. 13-23.

10. Таймаров М.А., Лавирко Ю.В. Работа котла ТГМЕ-464 под наддувом при сжигании газа // Прорывные научные исследования как двигатель науки: сборник статей Международной научно-практической конференции; 27 февраля 2021 г., Магнитогорск. Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2021. С. 83–85.

11. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Ильин В.К., Маргулис С.М. Сжигание мазута в котлах при различных компоновках горелок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 7-8. С. 55-62.

12. Stenin V.A., Ershova I.V. Improving energy efficiency and environmental safety of marine steam boilers // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2020. Vol. 3. P. 40–46. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-40-46.

13. Radin Yu.A., Lenev S.N., Khaneev K.V., Melnikov D.A., Smyshlyaev V.B. Features of Deep Load Reduction of Mosenergo Drum-Type 130 kgf/cm² Steam Pressure Boilers // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 55. P. 888–893. DOI: 10.1007/s10749-022-01447-y.

14. Shlegel N., Islamova A., Klimenko A., et al. Combustion and fragmentation of droplets of fuel oil/water emulsions // Environmental Science and Pollution Research. 2025. Vol. 32. P. 12630–12645. DOI: 10.1007/s11356-025-36468-3.

15. Chen Z., Wang L., Zhang Y., et al. Experimental study on flue gas recirculation for NO_x reduction in fuel oil-fired industrial boilers // Energy. 2023. Vol. 263. P. 125678. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125678.

16. Zhang Q., Liu H., Li M., et al. Influence of excess air ratio on combustion characteristics and NO_x emissions of fuel oil // Journal of the Energy Institute. 2024. Vol. 112. P. 101456. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101456.

17. Катин В.Д., Журавлев А.А. Анализ действующих и разработка модернизированных конструкций горелок типа ГП с низким выбросом оксидов азота для трубчатых нефтезаводских печей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 2. С. 126-135.

18. Ениватов А.В., Артемов И.Н., Савонин И.А. Оптимизация тепловой схемы котельной с утилизатором тепла дымовых газов // Вестник Мордовского университета. 2024. Т. 34. № 2. С. 45–52. DOI: 10.15507/0236-2910.034.202402.045-052 (дата обращения: 30.06.2026).

19. Пономарева Н.В., Родионов А.А. Методика технико-экономической оптимизации тепловой схемы котлоагрегата с системой газоочистки // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 5. С. 33–41. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.033-041. (дата обращения: 30.06.2026).

20. Григорьев С.В., Михайлов Д.А., Федотов К.В. Снижение выбросов оксидов азота при сжигании мазута в энергетических котлах с использованием двухстадийного сжигания // Теплоэнергетика. 2025. № 3. С. 54–63. DOI: 10.1134/S004036362503001X.

21. Слюсарский К.В., Асильбеков А.К. Закономерности зажигания и горения смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 1. С. 151-164. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-1-151-164.

22. Варфоломеева О.И., Тененев В.А., Хворенков Д.А. Разработка универсальной модели для численного анализа топочных процессов в теплогенерирующих установках. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025;27(6):171-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-6-171-186>.

Авторы публикации

Ахметова Римма Валентиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Bueters K.A. NO_x emissions from utility boilers // AICHE Symposium Series. 1975. Vol. 148. P. 85-94.

2. Lavoie, G.A. Combustion // The Science and Technology of Coal Utilization / ed. by B.R. Cooper and W.A. Ellingson. – New York: Plenum Press, 1984.

3. Fenimore, C.P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames // Combustion and Flame. 1972. Vol. 19. No. 2. P. 289–296.

4. Demin AV, Demina GV. Jekologicheskie harakteristiki termicheskoj utilizacii othodov s vneshnim i vnutrennim podvodom teplovoj jenerгии [Environmental characteristics of thermal

waste utilization with external and internal heat supply]. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2022;24(6):143-152. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152.

5. Shajhutdinov JaO, Pavlov GI, Haliulin RR, Teljashov DA, Tihonov OA. Issledovanie gazodinamicheskikh processov vzaimodejstviya hordal'nyh gazovyh struj s vihrevym vozdushnym potokom [Investigation of gas-dynamic processes of interaction of chordal gas jets with vortex air flow]. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2026;28(1):156-167. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2026-28-1-156-167.

6. Abryutin AA. Szhiganie mazuta s nedostatkom vozduha [Combustion of fuel oil with air deficiency]. Teploenergetika. 2011;2:16-21. (In Russ).

7. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // AIChE Journal. 1982. Vol. 28. No. 2. P. 302–311.

8. Hountalas D.T., Mavropoulos G.C., Zannis T.C. Comparative evaluation of EGR, intake water injection and fuel/water emulsion as NO_x reduction techniques for heavy duty diesel engines // SAE Technical Paper. 2007. No. 2007-01-0120. P. 1–18.

9. Akhmetova R.V., Zvonareva Yu.N., Shorokhov I.R. Development and research of energy-efficient methods of gaseous fuel combustion in energy systems // Power engineering: research, equipment, technology. 2022. Vol. 14. No. 1(53). P. 13–23.

10. Tajmarov MA, Lavirko YuV. Rabota kotla TGME-464 pod nadduvom pri szhiganii gaza [Operation of the TGME-464 boiler under pressurization when burning gas]. In: Proryvnye nauchnye issledovaniya kak dvigatel' nauki: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii; 27 Feb 2021; Magnitogorsk, Russia. Ufa: OMEGA SAYNS; 2021. p. 83-85. (In Russ).

11. Taimarov MA, Akhmetova RV, Ilyin V.K, Margulis S.M. Combustion of fuel oil in boilers with different burner arrangements. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2018, 20 (7–8): 55–62. (In Russ).

12. Stenin VA, Ershova IV. Improving energy efficiency and environmental safety of marine steam boilers. Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2020;3:40-46. doi:10.24143/2073-1574-2020-3-40-46.

13. Radin Yu.A., Lenev S.N., Khaneev K.V., Melnikov D.A., Smyshlyaev V.B. Features of Deep Load Reduction of Mosenergo Drum-Type 130 kgf/cm² Steam Pressure Boilers // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 55. P. 888–893. DOI: 10.1007/s10749-022-01447-y.

14. Shlegel N, Islamova A, Klimentov A, et al. Combustion and fragmentation of droplets of fuel oil/water emulsions. Environmental Science and Pollution Research. 2025;32:12630-12645. doi:10.1007/s11356-025-36468-3.

15. Chen Z, Wang L, Zhang Y, et al. Experimental study on flue gas recirculation for NO_x reduction in fuel oil-fired industrial boilers. Energy. 2023;263:125678. doi:10.1016/j.energy.2022.125678.

16. Zhang Q, Liu H, Li M, et al. Influence of excess air ratio on combustion characteristics and NO_x emissions of fuel oil. Journal of the Energy Institute. 2024;112:101456. doi:10.1016/j.joei.2023.101456.

17. Katin V.D., Zhuravlev A.A. Analysis of existing and development of modernized structures GP type burners with low nitrogen oxide emissions for tubular refinery furnaces // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2024. Vol. 32. No. 2. P. 126-135. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-126-135. (In Russ).

18. Enivatov A.V., Artemov I.N., Savonin I.A. Optimization of the boiler house thermal scheme with the utilization of flue gas heat // Mordovia University Bulletin. 2024. Vol. 34. No. 2. P. 45–52. DOI: 10.15507/0236-2910.034.202402.045-052. Accessed: 30 Jun 2026. (In Russ).

19. Ponomareva N.V., Rodionov A.A. Methodology for technical and economic optimization of the thermal scheme of a boiler unit with a gas cleaning system // Vestnik IGEU. 2023. No. 5. P. 33–41. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.033-041. Accessed: 30 Jun 2026. (In Russ).

20. Grigor'ev SV, Mihajlov DA, Fedotov KV. Snizhenie vybrosov oksidov azota pri szhiganii mazuta v energeticheskikh kotlah s ispol'zovaniem dvuhstadijnogo szhiganiya [Reduction of nitrogen oxide emissions during fuel oil combustion in power boilers using two-stage combustion]. Teploenergetika. 2025;3:54-63. (In Russ). doi:10.1134/S004036362503001X.

21. Sljusarskij KV, Asil'bekov AK. Zakonomernosti zazhiganiya i gorenija smesej nizkosortnogo uglja s piroliznoj zhidkost'ju [Patterns of ignition and combustion of mixtures of low-grade coal with pyrolysis liquid]. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2024;26(1):151-164. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-

2024-26-1-151-164.

22. Varfolomeeva OI, Tenenev VA, Khvorenkov DA. Razrabotka universal'noj modeli dlja chislennogo analiza topochnyh processov v teplogenerirujushhih ustanovkah [Development of a universal model for numerical analysis of firebox processes in heat-generating plants]. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2025;27(6):171-186. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2025-27-6-171-186.

Authors of the publication

Rimma V. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Получено **06.08.2026 г.**

Отредактировано **11.08.2026 г.**

Принято **15.08.2026 г.**