

РЕЖИМНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

Ганиев Д.Л., Ильин В.К., Хайбуллина А.И.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
420066, Казань, Россия
e-mail: ilyinvk@mail.ru

В статье обоснованы режимные условия приготовления и пылевидного сжигания нефтяного кокса в энергетических котлах, ранее работавших на газомазутном топливе. Рассмотрена модернизированная система пылеприготовления с паровой сушкой, шаровой барабанной мельницей, сепарацией, очисткой сушильного агента и пневмотранспортом готовой пыли. Цель работы состояла в выделении режимных факторов, определяющих устойчивость сушки, помола, транспортирования и безопасного хранения коксовой пыли. Использованы агрегированные данные опытного пуска, расчетно-режимная матрица и лабораторные сведения о влажности и дисперсности топлива. Получены диагностические линейные зависимости температуры сушильного агента за сепаратором от расхода и влажности сырого топлива. Предложен безразмерный коэффициент режимной устойчивости, связывающий вентиляцию мельницы, температуру за сепаратором и фактическую тонкость пыли. Показано, что риск тления определяется не отдельной температурой, а совокупностью факторов: сниженной вентиляцией, сверхтонким помолом, низкой остаточной влажностью, временем накопления сухой пыли и условиями теплоотвода.

Ключевые слова: нефтяной кокс, пылевидное сжигание, пылеприготовление, тепловой баланс, диагностическая аппроксимация, самонагревание пыли, газовая подсветка, режимная устойчивость.

REGIME-STATISTICAL JUSTIFICATION OF PETROLEUM COKE PULVERIZING AND COMBUSTION IN POWER BOILERS

Ganiyev D.L., Il'in V.K., Khaybullina A.I.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

The paper presents an operating approach for petroleum coke pulverizing and pulverized-fuel combustion in power boilers converted from gas-and-oil firing. The study focuses on the technological chain that includes preliminary drying, ball-mill grinding, separation, dust collection and pneumatic transport of the prepared fuel. The empirical basis consists of aggregated start-up observations, laboratory data and a calculated matrix of operating states. The results indicate that stable operation cannot be assessed by separator outlet temperature alone. Moisture stratification in raw coke, mill ventilation, dust fineness and the residence time of dry deposits must be considered simultaneously. Two diagnostic linear relationships are obtained for separator outlet temperature as a function of raw-fuel flow rate and moisture content. A dimensionless operating-stability coefficient is introduced to compare actual regimes with the recommended operating domain. The proposed approach can be used for updating start-up procedures and risk-oriented operating maps for petroleum-coke pulverizing systems.

Keywords: petroleum coke, pulverized combustion, pulverizing system, heat balance, diagnostic approximation, dust self-heating, gas support, operating stability.

1. Введение

Нефтяной кокс относится к высокоуглеродистым низкорекреационным твердым топливам. Его энергетическое использование привлекательно вследствие высокой теплоты сгорания и низкой зольности, однако низкий выход летучих веществ, развитая пористая структура и повышенная доля фиксированного углерода усложняют воспламенение и выгорание частиц [9,13,15]. Для действующих газомазутных котлов практический интерес представляет модернизация с организацией отдельного узла пылеприготовления, газовой поддержки розжига и стабилизации факела, а также системы очистки дымовых газов [1,4].

В опубликованных исследованиях основное внимание уделяется горению нефтяного кокса в кипящем и циркулирующем кипящем слоях, кинетике окисления, использованию каталитических добавок и совместному сжиганию с углем или биомассой

[6-12,14,16]. Для пылевидного сжигания в энергетических котлах не менее важным является предшествующий этап подготовки топлива: сушка, измельчение, сепарация, транспортирование и накопление готовой пыли. Эти операции определяют как полностью выгорания, так и пожарную безопасность тракта.

Цель работы – обосновать режимные условия, при которых пылевидное сжигание нефтяного кокса может быть реализовано без раскрытия конфиденциальных сведений о полном компонентном составе топлива и детальной конфигурации объекта. В отличие от описательных подходов, в работе выделены расчетно-статистические показатели, позволяющие количественно интерпретировать опытный пуск и режимные карты.

Научная новизна работы заключается в следующем: для условий модернизированной системы пылеприготовления выделена переходная область влажности сырого топлива 6-9%, в которой

одновременно возрастают риски потери сыпучести, налипания и нестабильности сушки; для агрегированных точек опытного пуска получены диагностические линейные аппроксимации температуры за сепаратором от расхода и влажности топлива; предложен безразмерный коэффициент режимной устойчивости $K_{гн}$, связывающий вентиляцию мельницы, температуру за сепаратором и фактическую тонкость пыли; показано различие между минимальной группой взрывоопасности по критерию K_t и реальным риском тления отложенной сухой пыли.

2. Материалы и методы исследования

Объектом анализа является система пылеприготовления действующей теплоэлектроцентрали с котлоагрегатами типа ТГМЕ-464. Система предназначена для получения сухой коксовой пыли с остаточной влажностью не более 1% и расчетной тонкостью $R_{90}=6-8\%$. Технологическая линия включает бункер сырого кокса, питатель, паровую панельную сушилку, шаровую барабанную мельницу, сепаратор, циклон, рукавный фильтр и пневмотранспорт готовой пыли. Конкретная компоновка узлов и полный компонентный состав топлива в статье не раскрываются.

Исходная информационная база включала визуальное обследование тракта пылеприготовления, агрегированные параметры опытного пуска, лабораторную оценку влажности и дисперсности проб, поверочные тепловые балансы сушилки и мельницы, а также расчетные режимные карты. Для повышения корректности интерпретации данные разделены на две группы: фактическая выборка опытного пуска и расчетно-режимная матрица, полученная при варьировании влажности и расхода топлива.

Тепловой баланс записывался в форме равенства приходных и расходных тепловых потоков. Приходные статьи включали тепло пара, вентиляционного воздуха, рециркуляции сушильного агента, горячих газов и механической работы мельницы; расходные статьи включали испарение влаги, подогрев топлива, вынос тепла сушильным агентом и потери в окружающую среду [5,7,13]. Для оценки испаренной влаги использовалась зависимость:

$$G_w = G_f(W_1 - W_2)/(100 - W_2),$$

где G_f – расход топлива, т/ч; W_1 и W_2 – влаж-

ность до и после стадии сушки, %; G_w – количество испаренной влаги, т/ч.

Для описания низкотемпературного тепловыделения при окислении сухой пыли использовалась полуэмпирическая зависимость:

$$q = A S_{\text{spec}} C_{O_2}^n \exp[-E/(RT)] \phi(W),$$

где A – эмпирический коэффициент; S_{spec} – удельная реакционная поверхность; C_{O_2} – концентрация кислорода; n – порядок реакции по кислороду; E – эффективная энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; $\phi(W)$ – поправка на влажность. Самонагревание развивается при превышении тепловыделения над теплоотводом из слоя пыли.

3. Результаты и математическая обработка

Опытный пуск показал, что длительное хранение сырого кокса в бункере приводит к неоднородности влажности по высоте слоя. Из-за гидрофобности материала свободная влага смещается в нижние зоны, поэтому фактическая влажность топлива на входе в систему может кратковременно превышать среднее проектное значение. После сработки части слоя влажность поступающего топлива снижается.

Даже при отключенном генераторе горячих газов и сниженном расходе пара наблюдался рост температуры сушильного агента за сепаратором. Это указывает на положительный тепловой баланс мельничного узла при малой загрузке: вклад вносят механическая работа мелющих тел, рециркуляция нагретого сушильного агента и уменьшенный теплоотвод с топливом.

Для агрегированных точек пусковой траектории выполнена линейная аппроксимация зависимости температуры за сепаратором от расхода сырого топлива:

$$T_{\text{sep}} = 3.19G + 16.87, R^2 = 0.972.$$

В пределах наблюдаемого диапазона увеличение расхода сопровождалось ростом температуры, однако зависимость следует рассматривать как диагностическую: одновременно изменялись влажность топлива и вентиляция мельницы. Экстраполяция за пределы указанного диапазона недопустима.

Дополнительно получена аппроксимация тем-

Таблица 1

Объем использованного расчетно-эксплуатационного материала

Группа данных	Количество режимов	Диапазон расхода сырого топлива	Диапазон влажности	Назначение данных
Опытный пуск	3 агрегированные точки	≈14-30 т/ч	≈5.7-16.6 %	Проверка фактической траектории роста температуры
Расчетно-режимная матрица	9 расчетных состояний	20-56.3 т/ч	8-12 %	Определение диапазонов пара, горячих газов и холодного воздуха
Лабораторные данные	серии проб	обезличено	обезличено	Подтверждение влажности, дисперсности и склонности сухой пыли к тлению

Таблица 2

Агрегированные параметры опытного пуска

Расход сырого топлива, т/ч	Влажность сырого топлива, %	Расход пара, т/ч	Вентиляция мельницы, тыс. м³/ч	Температура за сепаратором, °С
≈14	≈16.6	≈1.7	≈70-105	≈59-94
≈22	≈9.0	≈1.4	≈105	≈90-92
≈30	≈5.7	≈1.5	≈85-100	≈96-110

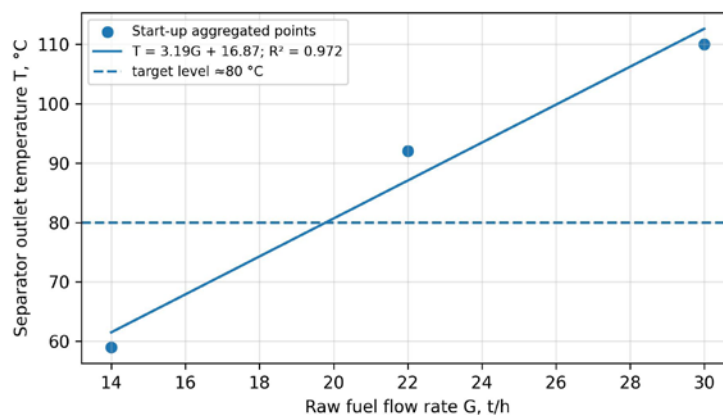


Рис. 1. Регрессионная аппроксимация температуры за сепаратором по агрегированным точкам опытного пуска

пературы за сепаратором по влажности сырого топлива:

$$T_{\text{sep}} = -4.62W + 135.20, R^2 = 0.997.$$

Отрицательный коэффициент при W отражает фактическую траекторию пуска: по мере сработки нижнего переувлажненного слоя снижалась влажность поступающего топлива, но возрастал вклад положительного теплового баланса мельничного узла.

4. Коэффициент режимной устойчивости

Для количественного усиления выводов введен

безразмерный коэффициент режимной устойчивости $K_{\text{ру}}$. Он не является универсальным нормативным критерием, а используется как диагностический показатель для сопоставления фактических режимов с рекомендуемой областью работы системы пылеприготовления:

$$K_{\text{ру}} = (V_m/120) \cdot (80/T_{\text{sep}}) \cdot (R_{90}/7),$$

где V_m – вентиляция мельницы, тыс. м³/ч; T_{sep} – температура за сепаратором, °С; R_{90} – остаток на сите 90 мкм, %. В качестве базовых значений приняты $V_m=120$ тыс. м³/ч, $T_{\text{sep}}=80^\circ\text{C}$ и $R_{90}=7\%$.

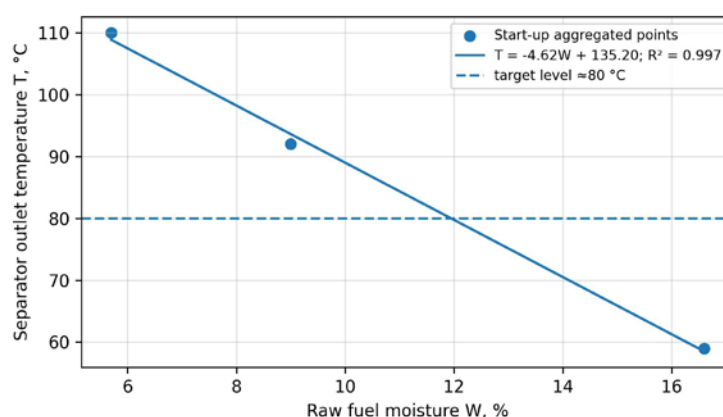


Рис. 2. Диагностическая зависимость температуры за сепаратором от влажности сырого топлива

Таблица 3

Расчетные диапазоны режимных воздействий при стабилизации температуры за сепаратором около 80°C

Влажность сырого топлива, %	Расход сырого топлива, т/ч	Пар на ППС, т/ч	Горячие газы, м³/ч	Холодный воздух в мельницу, м³/ч
12	20-56.3	2.40-5.45	0-36000	0-15000
10	20-56.3	2.17-4.67	0-25500	0-21000
8	20-56.3	1.94-4.02	0-17740	0-27000

Снижение K_{ru} указывает на одновременное ухудшение вентиляции, перегрев тракта и чрезмерное утонение пыли.

Полученные значения K_{ru} ниже рекомендуемой области, что объясняется сочетанием сниженной вентиляции мельницы, фактической тонкости пыли R_{90} около 3% вместо расчетных 6-8% и повышенной температуры за сепаратором. Следовательно, основным направлением стабилизации является не только ограничение температуры, но и возврат к проектной вентиляции и требуемой тонкости помола.

5. Причины тления и режимные ограничения

Фактические очаги тления были связаны преимущественно с готовой сухой пылью, находящейся в накопленном объеме более суток: в сепараторе, патрубках, бункерах и фильтрующих элементах. Для сырого топлива устойчивого тления не установлено. Это согласуется с механизмом низкотемпературного окисления: с уменьшением влажности и размера частиц возрастает удельная поверхность контакта с кислородом, а в застойном слое ухудшается теплоотвод [5,7,15].

Расчет критерия взрываемости для исследованных проб дает $K_t=0.72-0.77$, что соответствует минимальной группе взрывоопасности. Этот вывод не снимает пожарных рисков: взрывоопасность аэрозоля и склонность отложенной пыли к тлению являются разными эксплуатационными опасностями. Поэтому главным направлением управления риском является устранение длительного накопления сухой пыли, поддержание проектной вентиляции мельницы и недопущение сверхтонкого помола.

С учетом физико-химической природы нефтя-

ного кокса критической является не одна величина влажности, а две разные области: для сырого топлива переходная зона 6-9% связана с потерей сыпучести и налипанием, а для готовой пыли влажность менее 1% при высокой дисперсности повышает склонность отложений к самонагреванию. Поэтому режимная карта должна одновременно учитывать сушильную производительность, вентиляцию и допустимое время нахождения пыли в накопленном объеме.

6. Практические рекомендации

Для промышленной эксплуатации целесообразно поддерживать вентиляцию шаровой барабанной мельницы не ниже 120 тыс. $m^3/ч$ и регулировать сепаратор так, чтобы готовая пыль соответствовала проектной тонкости $R_{90}=6-8\%$. Температуру сушильного агента за сепаратором следует удерживать около $80^\circ C$; дальнейшее снижение требует контроля точки росы, поскольку работа ниже безопасного температурного запаса вызывает конденсацию, налипание пыли и последующее тление.

На низких нагрузках необходимо компенсировать положительный тепловой баланс мельницы увеличением расхода холодного воздуха либо иным конструктивным способом отвода избытка тепла. При высокой влажности сырого топлива первичным регулирующим воздействием остается расход пара на паровую панельную сушилку, а при снижении влажности – перераспределение расходов горячих газов и холодного воздуха.

В схему контроля следует включать непрерывный мониторинг температуры в застойных зонах, состояния рукавного фильтра, влажности сырого топлива и разрежения или перепада давления на мельнице. Для дальнейшего усиления доказательной

Таблица 4

Диагностическая оценка K_{ru} по агрегированным режимам опытного пуска

Расход сырого топлива, т/ч	V_m , тыс. $m^3/ч$	T_{sep} , $^\circ C$	R_{90} , %	K_{ru}
≈ 14	87.5	94	3	0.27
≈ 22	105.0	92	3	0.33
≈ 30	92.5	110	3	0.24

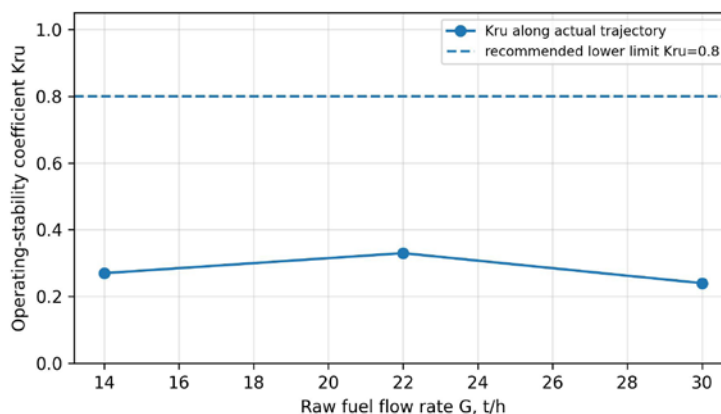


Рис. 3. Изменение коэффициента режимной устойчивости в фактической пусковой траектории

базы рекомендуется расширить промышленную выборку: фиксировать не менее 20-30 устойчивых режимов в диапазоне нагрузок 20-56.3 т/ч, повторять режимы при близкой влажности сырого топлива, отдельно учитывать положение лопаток сепаратора и фактическое значение R90, а также регистрировать температуру за сепаратором не только как конечное значение, но и как временной ряд.

Заключение

1. Пылевидное сжигание нефтяного кокса в энергетических котлах возможно при выделении подготовки топлива в самостоятельную регулируемую систему и применении газовой поддержки горения.

2. Научная новизна уточнена через расчетно-статистические признаки: выделение переходной области влажности 6-9%, получение диагностических регрессионных зависимостей температуры за

сепаратором и введение коэффициента режимной устойчивости $K_{ру}$.

3. Для агрегированных точек опытного пуска получены зависимости $T_{sep}=3.19G+16.87$ ($R^2=0.972$) и $T_{sep}=135.20-4.62W$ ($R^2=0.997$). Их следует применять только в пределах исследованного диапазона как диагностические, а не универсальные расчетные уравнения.

4. Ключевыми параметрами надежности являются влажность готовой пыли не более 1%, расчетная тонкость $R90=6-8\%$, вентиляция мельницы не менее 120 тыс. м³/ч и температура сушильного агента за сепаратором около 80°C.

5. Основной эксплуатационный риск связан не с сырым топливом, а с сухой пылью, длительно находящейся в накопленном объеме. Механизм риска определяется низкотемпературным окислением и ухудшением теплоотвода в отложениях.

Список литературы

- Брагина О.Н., Булысова Л.А., Володин А.М., Епихин А.Н. Моделирование и усовершенствование конструкции скруббера охлаждения дымового газа от сжигания мазута и нефтяного кокса на ТЭС // Электрические станции. 2018. №7. С. 19-26.
- Иваницкий М.С. Сжигание нефтяного кокса марки К2 на ТЭС (на примере котла ТП-80) // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. №3. С. 13-18.
- Иваницкий М.С. Сжигание твердого топлива в котлах малой тепловой мощности // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. №5. С. 56-61.
- Пак Д.Ф., Кучеров В.В., Шабанов И.И., Епихин А.Н., Тресков И.В., Кудрявцев С.А. Применение инновационных технологий в проекте реконструкции котлоагрегатов ТГМЕ-464 Нижнекамской ТЭЦ для пылевого сжигания нефтяного кокса // Электрические станции. 2018. №10. С. 23-29.
- Швандин С.А., Халатов А.А. Тепломассообмен и горение дисперсных топлив. М.: Энергоатомиздат. 1990. 240 с.
- Anthony E.J., Granatstein D.L. Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems. Progress in Energy and Combustion Science. 2001. No. 27. Pp. 215-236.
- Basu P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Boca Raton: CRC Press. 2006. 496 p.
- Bora A., Mahapatra S. Experimental study on combustion characteristics of Bambusa tulda and petcoke at varying blending ratios. Energy. 2025. 320. 135383. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135383.
- Chen J., Lu X. Progress of petroleum coke combustions in circulating fluidized bed boilers – a review and future perspectives. Resources, Conservation and Recycling. 2007. No. 49(3). Pp. 203-216. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.03.012.
- Jameel A.G.A. Comprehensive CFD Investigation of Oxyfuel Combustion in Petcoke-Fired Boilers for Carbon Capture. Proceedings of the 17th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-17). 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5010481.
- Li L., Sun G., Qi W., Wei J., Chen Q., Niu W., Hao D., Yuan Y., Sun Z., Duan L. Improvement of coal and petroleum coke combustion in a fluidized bed by using ilmenite ore as bed material. Journal of the Energy Institute. 2023. 111. 101400. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101400.
- Liu Y., Tan W., Liang S., Bi X. Effect of limestone on NO emission during the co-combustion of semi-coke and bituminous coal. Journal of Thermal Science. 2024. No. 33(6). Pp. 2413-2425. DOI: 10.1007/s11630-024-2045-6.
- Miller B.G. Coal Energy Systems. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press. 2017. 856 p.
- Saifullin E.R., Sadikov K.G., Varfolomeev M.A., Emelianov D.A., Rodionov N.O. Petroleum coke combustion in fixed fluidized bed mode in the presence of metal catalysts. ACS Omega. 2020. No. 5(35). Pp. 22171-22178. DOI: 10.1021/acsomega.0c02250.
- Speight J.G. The Chemistry and Technology of Petroleum. 5th ed. Boca Raton: CRC Press. 2014. 953 p.
- Wang P., Liu H., Zhang S., Li X., Wang Q. Co-combustion behavior and kinetics of semi-coke and bituminous coal: influence of blending method and oxygen concentration. Fuel Processing Technology. 2023. 252. 107962. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107962.

References

- Bragina O.N., Bulysova L.A., Volodin A.M., Epikhin A.N. Modeling and improvement of the design of a flue-gas cooling scrubber for fuel oil and petroleum coke combustion at thermal power plants. *Elektricheskie stantsii*. 2018. No. 7. Pp. 19-26.
- Ivanitskii M.S. Combustion of K2 petroleum coke at thermal power plants: the TP-80 boiler case. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2018. No. 3. Pp. 13-18.
- Ivanitskii M.S. Solid fuel combustion in low-capacity boilers. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2020. No. 5. Pp. 56-61.
- Pak D.F., Kuchero V.V., Shabanov I.I., Epikhin A.N., Treskov I.V., Kudryavtsev S.A. Application of innovative technologies in the reconstruction project of TGME-464 boiler units of Nizhnekamsk CHP for pulverized petroleum coke combustion. *Elektricheskie stantsii*. 2018. No. 10. Pp. 23-29.
- Shvandin S.A., Khalatov A.A. *Teplomassoobmen i gorenie dispersnykh topliv* [Heat and Mass Transfer and Combustion of Dispersed Fuels]. Moscow. Energoatomizdat. 1990. 240 p.
- Anthony E.J., Granatstein D.L. Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems. Progress in Energy and Combustion Science. 2001. No. 27. Pp. 215-236.
- Basu P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Boca Raton: CRC Press. 2006. 496 p.
- Bora A., Mahapatra S. Experimental study on combustion characteristics of Bambusa tulda and petcoke at varying blending ratios. Energy. 2025. 320. 135383. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135383.

9. Chen J., Lu X. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers – a review and future perspectives. Resources. Conservation and Recycling. 2007. No. 49(3). Pp. 203-216. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.03.012.
10. Jameel A.G.A. Comprehensive CFD Investigation of Oxyfuel Combustion in Petcoke-Fired Boilers for Carbon Capture. Proceedings of the 17th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-17). 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5010481.
11. Li L., Sun G., Qi W., Wei J., Chen Q., Niu W., Hao D., Yuan Y., Sun Z., Duan L. Improvement of coal and petroleum coke combustion in a fluidized bed by using ilmenite ore as bed material. Journal of the Energy Institute. 2023. 111. 101400. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101400.
12. Liu Y., Tan W., Liang S., Bi X. Effect of limestone on NO emission during the co-combustion of semi-coke and bituminous coal. Journal of Thermal Science. 2024. No. 33(6). Pp. 2413-2425. DOI: 10.1007/s11630-024-2045-6.
13. Miller B.G. Coal Energy Systems. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press. 2017. 856 p.
14. Saifullin E.R., Sadikov K.G., Varfolomeev M.A., Emelianov D.A., Rodionov N.O. Petroleum coke combustion in fixed fluidized bed mode in the presence of metal catalysts. ACS Omega. 2020. No. 5(35). Pp. 22171-22178. DOI: 10.1021/acsomega.0c02250.
15. Speight J.G. The Chemistry and Technology of Petroleum. 5th ed. Boca Raton: CRC Press. 2014. 953 p.
16. Wang P., Liu H., Zhang S., Li X., Wang Q. Co-combustion behavior and kinetics of semi-coke and bituminous coal: influence of blending method and oxygen concentration. Fuel Processing Technology. 2023. 252. 107962. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107962.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Ганиев Динар Ленарович

аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Ильин Владимир Кузьмич

доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Information about authors
Affiliations

Ganiev Dinar Lenarovich

Postgraduate Student of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Ilyin Vladimir Kuzmich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Head of the Department of «Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures», Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Khaibullina Aigul Ilgizarovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 14.05.2026 г.