ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА/THERMAL PHYSICS AND THERMOLOGY

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6

УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ NOX ПУТЕМ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Научная статья

Мочалов О.В.[1, *]
[1] ORCID : 0009-0005-8110-3312;
[1] Дальневосточная генерирующая компания, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (moov[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с методами уменьшения выбросов оксидов азотов как побочного явления значительных объемов использования угля в энергетическом балансе РФ. Отдельное внимание уделено подходу ступенчатого сжигания топлива. В процессе исследования приведены результаты компьютерного моделирования работы топки котла ТП-87 Ново-Кемеровской ТЭЦ с системой ступенчатого сжигания угля. Полученные данные эксперимента свидетельствуют о том, что обозначенная методика обеспечивает снижение выбросов оксидов азота на уровне 26,4%. Перспективы дальнейших научных изысканий заключаются в уточнении механизма химической кинетики и подходов к расчету процессов восстановления оксидов азота до молекулярного состояния, что позволит реализовать потенциал снижения его выбросов до 50%.

Ключевые слова: уголь, выбросы, сжигание, котел, топка, газы, температура.

REDUCTION OF NOX EMISSIONS BY STAGED COMBUSTION OF FUEL

Research article

Mochalov O.V.[1, *]
[1] ORCID : 0009-0005-8110-3312;
[1] Far Eastern Generating Company, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (moov[at]mail.ru)

Abstract

The article examines topical issues related to the methods of reducing nitrogen oxide emissions as a side effect of significant volumes of coal utilization in the energy balance of the Russian Federation. Special attention is paid to the approach of staged fuel combustion. The results of computer modelling of TP-87 boiler furnace operation at Novo-Kemerovskaya TPP with staged coal combustion system are given in the course of the study. The obtained experimental data show that the specified methodology provides reduction of nitrogen oxide emissions at the level of 26.4 per cent. Prospects for further scientific research consist in clarification of the mechanism of chemical kinetics and approaches to calculation of the processes of nitrogen oxides reduction to the molecular state, which will make it possible to implement the potential to reduce its emissions up to 50%.

Keywords: coal, emissions, combustion, boiler, furnace, gases, temperature.

Введение

На сегодняшний день выбросы тепловых электростанций в России в 7–15 раз превышают международные стандарты, и представляют собой один из основных валовых загрязнителей воздуха в стране. Продуктами сжигания топлива, главным образом угля, являются твердые частицы золы (пыль), оксиды серы (SO_2), оксиды азота (NO_x) и углерода (CO_2). Так, на ТЭС приходится около 75% выбросов диоксида серы и 32% оксидов азота [1].

Выбросы предприятий тепловой электроэнергетики не уменьшаются несмотря на то, что правительством страны была подписана дорожная карта «Чистый ноль углерода к 2025 году», в соответствии с которой угольные электростанции должны быть заменены на более экологически чистые, работающие на природном газе и водороде [2]. Согласно мониторинговым данным, объем выбросов оксиды азота в России постепенно увеличивается в течении практически последних двух десятков лет, начиная с 70,9 млн тонн CO_2-эквивалента, выброшенных в 2005 году, и достигая 87,1 млн тонн CO_2-эквивалента в 2021 году [3] (рис. 1).

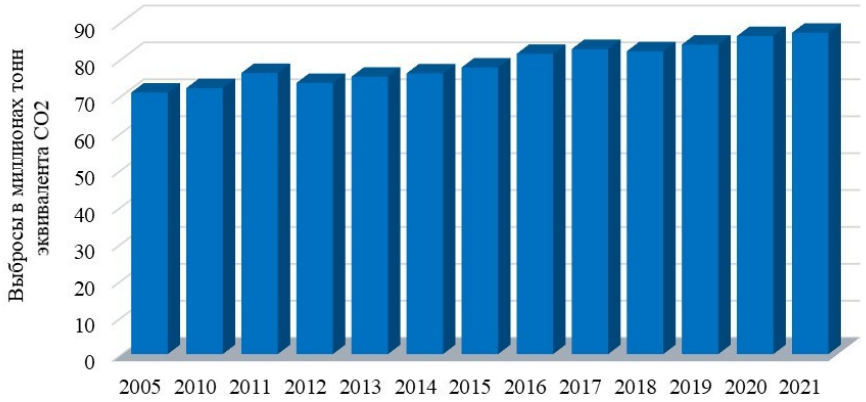

Рисунок 1 - Динамика выбросов оксидов азота в России [3]
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.1

Энергетические предприятия в большинстве своем не вкладывают денежные средства в природоохранные мероприятия на эксплуатируемых энергоблоках, за исключением единичных проектов реконструкции пылеуловительного оборудования. Строительство новых установок, соответствующих экологическим нормативам, которые приняты в рамках Парижского соглашения, в ближайшем будущем, не предполагается.

С экологической точки зрения угольные котлы на отечественных ТЭС оснащены только системой улавливания частиц – электрофильтрами и мокрыми скрубберами. В то же время, вопросам снижения выбросов оксидов азота уделяется недостаточно внимания. Как известно, одним из методов уменьшения количества образования NOx является усовершенствование технологии подготовки и сжигания пылеугольной смеси, в частности, метод ступенчатого сжигания угля. При реализации данного метода расход топлива разделяется не менее чем на два потока: первый (75-90% по теплу) подается в основные горелки с рабочим избытком воздуха; второй (топливо дожигания) – в дополнительные горелки, расположенные выше основных, с количеством воздуха ниже стехиометрического значения. Благодаря этому образуется зона восстановления оксидов азота до молекулярного азота, что приводит к снижению эмиссии примерно на 50% [4]. Остальной, необходимый для полного сжигания топлива воздух, подается в сопла дожигания, которые расположены выше дополнительных горелок.

Однако, несмотря на существующие публикации и практические эксперименты по применению рассматриваемого метода на практике, вопросы, связанные с использованием определенной конструкции котла, геометрическими характеристиками топки, остаются открытыми, что предполагает необходимость проведения дальнейших более углубленных исследований этой проблематики.

Таким образом, обозначенные обстоятельства обуславливают выбор темы данной статьи.

Основные результаты

Исследованиям проблем экологической безопасности находящихся под влиянием ТЭС территорий, занимаются такие авторы как Горбатюк С.М., Макаров П.С., Сухорукова М.А., Sorge, J. N.; Hardman, R.R.; Wilson, S. M.

Проблема снижения выбросов NOx путем модернизации теплосиловых установок ТЭС, а также их оснащения высокоэффективным газоочистным оборудованием рассматривается в трудах Елсукова В.К., Латушкиной С.В., Мессерле В.Е., Умбеткалиева К.А., Устименко А.Б., Vinciguerra, Timothy; Bull, Emily; Canty, Timothy; He, Hao.

Анализу современных методов сжигания твердого органического топлива в комбинированных парогазовых энергетических установках и перспективам их развития посвящены публикации Прохорова В.Б., Киричкова В.С., Чернова С.Л., Фоменко Н.Е., Zalewsky, Eric; Woodman, Michael; Aburn, George; Ehrman, Sheryl.

Однако, несмотря активный интерес ученых и конструкторов к данной тематике, а также имеющиеся труды и наработки, необходимо отметить, что ряд ключевых аспектов требует более детального анализа. В частности, отдельного внимания заслуживают экспериментальные вопросы, связанные с тем каким образом изменяется концентрация оксидов азота по высоте топки котла при разном количестве горелок и при различных нагрузках котла. В дополнительном обосновании нуждаются методы оценки эффективности воздействия термохимической подготовки различных марок угля на образование оксидов азота.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении возможностей уменьшения выбросов NOx, используя различные подходы к сжиганию топлива.

В процессе исследования рассмотрим метод трехступенчатого сжигания угля на энергетических котлах, цель которого заключается в восстановлении NOx до молекулярного азота. Основой для организации данного метода является разбиение области активного горения на зоны: главная, восстановление и дожигание. В главной зоне происходят обычные процессы горения, в данную зону поступает около 65-85% (по теплоте) топлива, и при избытке воздуха 1,02-1,05. В зоне восстановления происходит введение более реакционного топлива, обычно природный газ в количестве 15%-35% (по теплоте) при коэффициенте избытка воздуха 0,85-0,95, в данной зоне происходят сложные химические процессы при высоких температурных режимах. В зоне дожигания наблюдается процесс ввода третичного воздуха, куда подают остаток нужного для выгорания воздуха, например 15-20% отбора воздуха после воздухоподогревателя [5].

Проведенные учеными из Института энергетики и турбомашин Силезского технического университета (Польша) исследования показали взаимосвязь концентрации NOx в зависимости от мощности котла при одноярусном, двухъярусном и трехъярусном расположении горелок (табл. 1). Анализ проводился на котлах марки Wenta.

Таблица 1 - Концентрация NOx в зависимости от мощности котла [6]

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.2

Наименование	Величина			
Мощность котла Вр, %	40	60	80	100
Одноярусное расположение NOx, г/м^3	0,306	0,42	0,527	0,63
Двухъярусное расположение NOx, мг/м^3	0,286	0,398	0,505	0,61
Трехъярусное расположение NOx, мг/м^3	0,265	0,375	0,482	0,589

Как свидетельствуют полученные результаты эксперимента, при изменении расположения горелок изменяется температура в зоне активного горения, что приводит к уменьшению NOx ориентировочно на 10%-13% (от одно- до трехъярусного расположения), это снижение является линейным в зависимости от нагрузки котла.

Для проведения натурного эксперимента рассмотрим эффективность системы ступенчатого сжигания угля, смонтированного на котле ТП-87 Ново-Кемеровской ТЭЦ.

В качестве проектного топлива дожигания запланировано использовать угольную пыль. В дополнительные горелки будет подаваться уголь такого же фракционного состава, как и на основные горелки, без дополнительных мер по измельчению топлива, идущего на дожигание. Вертикальная компоновка котла представлена на рис. 2.

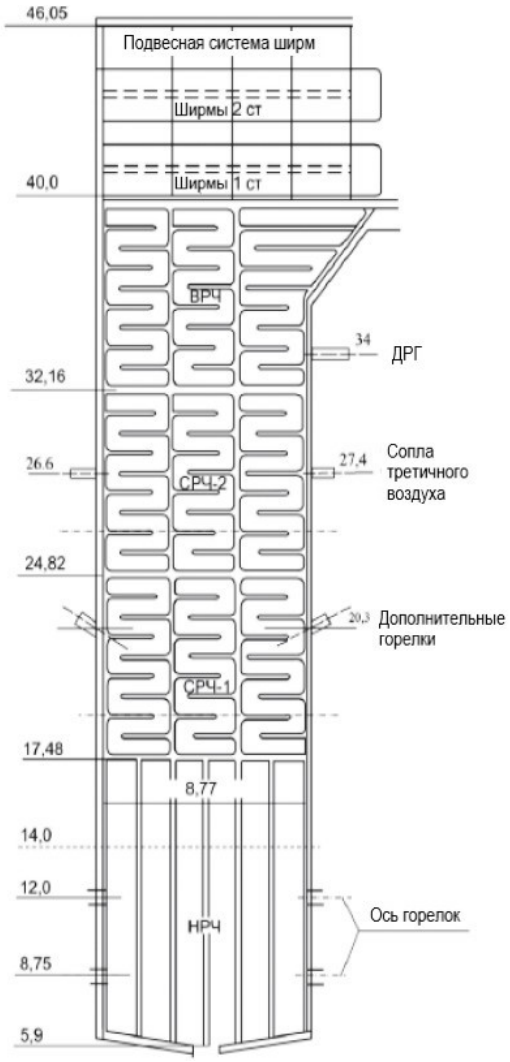

Рисунок 2 - Вертикальная компоновка котла ТП-87 с системой ступенчатого сжигания угля
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.3

Примечание: ВРЧ - верхняя радиационная часть; ДРГ - дымовые рециркуляционные газы; СРЧ - средняя радиационная часть; НРЧ - нижняя радиационная часть

На отметке 20,3 м. смонтированы дополнительные горелки для подачи топлива, имеющие прямоугольное сечение 0,3×0,3 м. и установленные под горизонтальным углом 20°. На передней и задней части смонтировано 10 дополнительных горелок. На передней части котла на отметке 26,6 м. и на задней на отметке 27,4 м. установлены сопла третичного воздуха. Каждая сторона имеет по десять сдвоенных по вертикали сопел прямоугольного сечения 0,3×0,15 м., при чем верхняя часть установлена под углом 22° к боковой поверхности.

Котел ТП-87 работает на углях марки Д. Анализ данных качества угля, используемого на станции, позволил вывести его средние характеристики. Состав пиролизных газов, подаваемых для восстановления оксидов азота приведен в таблице 2.

Таблица 2 - Состав пиролизных газов

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.4

Вещество	Массовая доля, мг/г
Водород (H_2)	3,37
Углекислый газ (CO_2)	278,21
Монооксид углерода (CO)	41,22
Метан (CH_4)	8,79
Этан (C_2H_6)	1,46
Ацетилен (C_2H_2)	5,59

Массовая доля летучих в горючей составляющей угля составляет 42%. При нагревании угольной частицы при термохимической деструкции топлива 42% горючей массы угля переходит в газовую фазу, а 58% массы остается в твердой фазе. Процесс термохимической деструкции угля проходит по следующей схеме:

1 кг угля = (1- 0,42) кг углерода + 0,42 кг летучих

Исходя из химического состава горючей летучей массы, молекулярная формула летучих представлена как $C_xH_yO_zS_wN_r$. Поскольку азот не горит и составляет незначительную долю в составе летучих, в дальнейшем он исключался из рассмотрения и формула летучих углей представлялась в виде $CH_{2,72}O_{0,277}$ $S_{0,019}$. Молекулярная масса летучих составляет 19,75 кг/кмоль.

Исходя из состава продуктов пиролиза (таблица 2), блок газофазных реакций необходимо дополнить реакциями горения водорода, метана, этана и ацетилена.

$$C_x + H_y + x/2O_2 = xCO + y/2H_2$$
$$CO + 1/2O_2 = CO_2$$
$$H_2 + 1/2O_2 = H_2O$$

К модулю расчета были добавлены следующие начальные реакции горения углеводородов:

$$CH_4 + 1/2O_2 = CO + 2H_2$$
$$C_2H_6 + O_2 = 2CO + 3H_2$$
$$C_2H_2 + 3/2O_2 = 2CO + H_2O$$

Итак, процесс горения летучих по трехстадийной схеме можно записать следующим образом:

$$CH_2,72J_0,277S_0,019 + 1,063O_2 = CO + 1,36H_2O + 0,0187SO_2$$

Для определения тепловых граничных условий использовались данные станции по входным и выходным температурам каждой из радиационных поверхностей. На каждой радиационной поверхности температура задавалась постоянной и определялась как среднее арифметическое исходной и входной температур. По этой температуре задавался удельный радиационный поток, воспринимаемый каждой из поверхностей. Мера черноты труб была принята постоянной и равнялась 0,8. Для расчета радиационного теплообмена использовалась P-1 модель [7]. Температуры радиационных поверхностей были увеличены на значение термического перепада в толщине материала труб. Для расчета двухфазного течения использовался метод Лагранжа [8].

В ходе эксперимента были произведены расчеты двух режимов работы системы ступенчатого сжигания:

Вариант 1 – подача пыли осуществляется дымовыми газами в количестве 60 тыс. м^3/ч;

Вариант 2 – подача пыли осуществляется дымовыми газами в количестве 120 тыс. м^3/час.

Расход угля в основные и дополнительные горелки, а также расход воздуха у сопла третичного воздуха для обоих вариантов были одинаковы. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программы Phoenics.

На рис. 3 приведено температурное поле на оси котла.

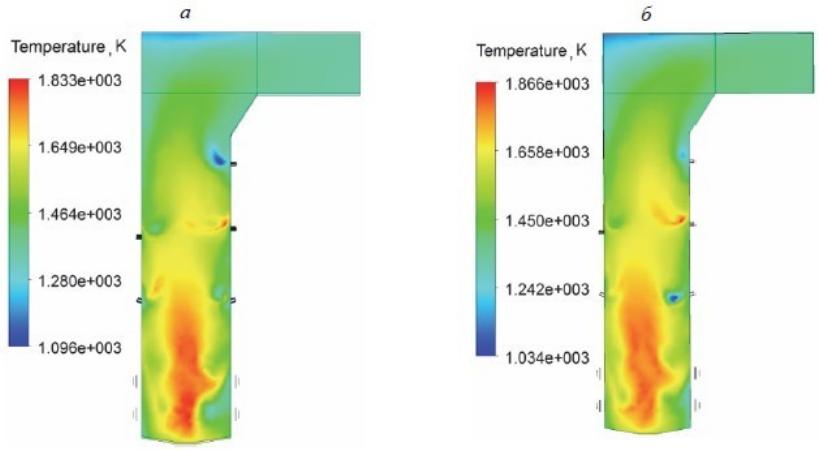

Рисунок 3 - Температурное поле на оси котла

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.5

Примечание: а – Вариант 1; б – Вариант 2

При работе системы ступенчатого сжигания поле температур трансформируется (рис. 6а и рис. 6б). Так, наблюдается уменьшение максимальной температуры на 60 градусов. В зоне основных горелок зона высоких температур заканчивается до дополнительных горелок. В зоне подачи топлива фиксируется снижение температуры, что в первую очередь связано с расходом тепловой энергии на нагрев топлива и термическую деструкцию «сырого» угля, в результате которой выходят летучие.

Кроме того, следует отметить, что степень выгорания коксового остатка зависит от скорости подачи угля в дополнительные горелки. При большей скорости подачи угольной пыли (Вариант 2) ожидается полное сжигание коксового остатка до ширм. В случае использования Варианта 1, скорость подачи топлива обеспечивает меньший импульс частицам угля, которого недостаточно для движения внутрь топки. В этом случае отмечается снос несгоревшего коксового остатка в зону ширм, в первую очередь частиц большего диаметра.

На рисунке 4 изображено распределение массовой концентрации оксида азота на оси котла в зависимости от скорости подачи угля в дополнительные горелки.

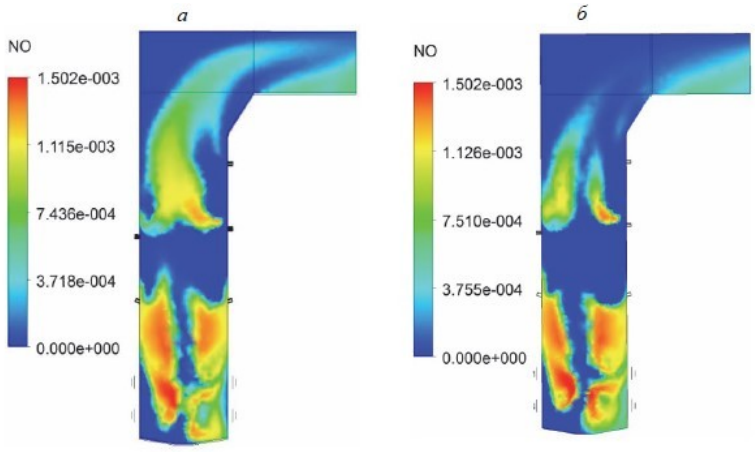

Рисунок 4 - Массовая концентрация оксида азота на оси котла
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.6

Примечание: а – Вариант 1; б – Вариант 2

Как свидетельствует рис. 4 При работе топки котла с системой ступенчатого сжигания угля наблюдается зона восстановления оксида азота, которая расположена между дополнительными горелками и соплами третичного воздуха (рис. 4а и рис. 4б). После сопел третичного воздуха фиксируется новая зона образования оксидов азота. В случае подачи топлива в дополнительные горелки с большей скоростью, зона восстановления оксида азота имеет большую площадь.

Эффективность системы ступенчатого сжигания угля для снижения выбросов оксида азота приведена в таблице 3.

Таблица 3 - Эффективность системы трехступенчатого сжигания угля в котле ТП-87

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.7

Вариант	Эмиссия оксида азота, кг/с	Снижение эмиссии оксида азота, %
Вариант 1	0,078254	15,5
Вариант 2	0,068165	26,4

Результативность вариантов 1 и 2 сравнивалась с режимом работы котла без системы ступенчатого сжигания.

Заключение

Таким образом, подводя итоги проведенного исследования, отметим следующее.

В статье рассмотрена перспективная методика снижения выбросов NOx, путем ступенчатого сжигания топлива. Полученные данные эксперимента свидетельствуют о том, что обозначенная методика обеспечивает снижение выбросов оксидов азота на уровне 26,4%. Перспективы дальнейших научных изысканий заключаются в уточнении механизма химической кинетики и подходов к расчету процессов восстановления оксидов азота до молекулярного состояния, что позволит реализовать потенциал снижения его выбросов до 50%.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Канарейкин А.И., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва Российская Федерация
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.8

Conflict of Interest

None declared.

Review

Kanareikin A.I., Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow Russian Federation
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.6.8

Список литературы / References

1. Копань А.В. Тестирование технических решений по топочно-горелочным устройствам в составе низкоэмиссионной системы сжигания кузнецкого угля / А.В. Копань // Известия Томского политехнического университета. — Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 4. — С. 140-147.

2. Dorokhov V.V. Anthropogenic Emissions from Coal-water Slurry Combustion: Influence of Component Composition and Registration Methods / V.V. Dorokhov // Environmental research. — 2023. — vol.223. — p. 89-96.

3. Jolibois N. Oscillating Combustion of Different Fuel Types for NOX Reduction in Grate Furnaces and Coal Burners / N. Jolibois // Fuel. — 2023. — vol. 340. — p. 56-62.

4. Росляков П.В. Оценка затрат внедрения наилучших доступных технологий золоулавливания на угольных тепловых электростанциях / П.В. Росляков, А.А, Сибгатуллина // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. — 2023. — № 3. — С. 119-129.

5. Chen X. Nitrogen Oxide Emissions in a Coal-Powered 1000-MW Boiler / X. Chen, H. Zhang, H.W. Qin [et al.] // Journal of Sensors. — 2021. — vol. 2021. — p 76-81.

6. Pronobis Marek. Environmentally Oriented Modernization of Power Boilers / Marek Pronobis. — Amsterdam: Elsevier, 2020. — 354 p.

7. Волков Э.П. Исследование процесса сжигания твердого топлива в топках с прямоточными горелками / Э.П. Волков, В.Б. Прохоров, С.Л. Чернов [и др.] // Теплоэнергетика. — 2020. — № 6. — С. 47-56.

8. Алексеенко С.В. Расчетное исследование аэродинамики и теплообмена в перспективной конструкции пылеугольной топки / С.В. Алексеенко, А.А. Дектерев, В.А. Кузнецов // Теплофизика и аэромеханика. — 2022. — Т. 29. — № 6. — С. 973-980.

9. Тчаро Хоноре. Цифровизация нефтяной промышленности: базовые подходы и обоснование "интеллектуальных" технологий / Хоноре Тчаро, А.Е. Воробьев, К.А. Воробьев // Вестник евразийской науки. — 2018. — №2. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-neftyanoy-promyshlennosti-bazovye-podhody-i-obosnovanie-intellektualnyh-tehnologiy (дата обращения: 22.10.2023).

10. Дмитриевский А.Н. Современная НТР и смена парадигмы освоения углеводородных ресурсов / А.Н. Дмитриевский, Н.А. Еремин // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — №2 (24). — 2016. — С. 13-19.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kopan A.V. Testirovanie tekhnicheskih reshenij po topochno-gorelochnym ustrojstvam v sostave nizkoemissionnoj sistemy szhiganiya kuzneckogo uglya [Testing of Technical Solutions for Furnace and Burner Devices as Part of a Low-emission Kuznetsk Coal Combustion System] / A.V. Kopan' // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering]. — 2021. — Vol. 332. — No. 4. — P. 140-147. [in Russian]

2. Dorokhov V.V. Anthropogenic Emissions from Coal-water Slurry Combustion: Influence of Component Composition and Registration Methods / V.V. Dorokhov // Environmental research. — 2023. — vol.223. — p. 89-96.

3. Jolibois N. Oscillating Combustion of Different Fuel Types for NOX Reduction in Grate Furnaces and Coal Burners / N. Jolibois // Fuel. — 2023. — vol. 340. — p. 56-62.

4. Roslyakov P.V. Ocenka zatrat vnedreniya nailuchshih dostupnyh tekhnologij zoloulavlivaniya na ugol'nyh teplovyh elektrostanciyah [Estimation of the Costs of Implementing the Best Available Ash Collection Technologies at Coal-fired Thermal Power Plants] / P.V. Roslyakov, A.A, Sibgatullina // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta [Bulletin of the Moscow Energy Institute. Bulletin of MPEI]. — 2023. — No. 3. — P. 119-129. [in Russian]

5. Chen X. Nitrogen Oxide Emissions in a Coal-Powered 1000-MW Boiler / X. Chen, H. Zhang, H.W. Qin [et al.] // Journal of Sensors. — 2021. — vol. 2021. — p 76-81.

6. Pronobis Marek. Environmentally Oriented Modernization of Power Boilers / Marek Pronobis. — Amsterdam: Elsevier, 2020. — 354 p.

7. Volkov E.P. Issledovanie processa szhiganiya tverdogo topliva v topkah s pryamotochnymi gorelkami [Study of the Combustion Process of Solid Fuel in Furnaces with Direct-flow Burners] / E.P. Volkov, V.B. Prohorov, S.L. CHernov [et al.] // Teploenergetika [Thermal Power Engineering]. — 2020. — No. 6. — p. 47-56. [in Russian]

8. Alekseenko S.V. Raschetnoe issledovanie aerodinamiki i teploobmena v perspektivnoj konstrukcii pyleugol'noj topki [Computational Study of Aerodynamics and Heat Transfer in a Promising Design of a Pulverized Coal Furnace] / S.V. Alekseenko, A.A. Dekterev, V.A. Kuznecov // Teplofizika i aeromekhanika // [Thermophysics and Aeromechanics]. — 2022. — Vol. 29. — No. 6. — P. 973-980. [in Russian]

9. Charo Honore. Cifrovizaciya neftyanoj promyshlennosti: bazovye podhody i obosnovanie "intellektual'nyh" tekhnologij [Digitalization of the Oil Industry: Basic Approaches and Justification of “Intelligent” Technologies] / Honore Tcharo, A.E. Vorob'ev, K.A. Vorob'ev // Vestnik evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]. — 2018. — No. 2. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-neftyanoy-promyshlennosti-bazovye-podhody-i-obosnovanie-intellektualnyh-tehnologiy (accessed: 10.22.2023). [in Russian]

10. Dmitrievsky A.N. Sovremennaya NTR i smena paradigmy osvoeniya uglevodorodnyh resursov [Modern Scientific and Technological Progress and a Paradigm Shift in the Development of Hydrocarbon Resources] / A.N. Dmitrievskij, N.A. Eremin // Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom [Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex]. — No. 2 (24). — 2016. — p. 13-19. [in Russian]