

УДК 621.184.6

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Маркелов Д. А.<sup>1</sup>, Приймак А. Ю.<sup>1</sup>, Сербиновский М. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Публичное акционерное общество «Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик», Таганрог, Россия

Статья поступила 19.09.2025, принята к публикации 30.09.2025. Опубликовано онлайн.

**Аннотация.** Проблематика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу актуальна ввиду негативного влияния на здоровье человека (увеличение риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, рака легких, астмы, бронхита), качество воздуха (образование смога, ухудшение видимости) и экосистемы в целом (кислотные дожди, загрязнение почвы и водоемов). Проведен анализ современных нормативных требований (ГОСТы, законопроекты, приказы и локальные федеральные нормативные акты РФ), предъявляемых к уровню выбросов загрязняющих веществ в атмосферу к вновь проектируемым паровым котлам. Описаны основные технические решения и методы их реализации на примере паровых котлов, обеспечивающие снижение выбросов до требуемых значений. Приведено сравнение

основных внутритопочных мероприятий, влияющих на характеристики зоны активного горения и, соответственно, значения выбросов загрязняющих веществ. Приведены графические зависимости образования оксидов азота в топочной камере от схемы расположения горелочных устройств и самой конструкции горелки.

Уделено внимание отдельным узлам котла, на которые оказывают влияние технические решения, обеспечивающие снижение вредных выбросов в котле, в том числе сомкнутая компоновка топочных экранов и схема регулирования температуры пара за счет пароохладителей.

**Ключевые слова:** выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, ГРЭС, ТЭС, внутритопочные мероприятия, паровой котел, сомкнутая компоновка, форсунка, пароохладитель

## TECHNICAL SOLUTIONS RECOMMENDED IN THE DESIGN OF STEAM BOILERS TO ENSURE REGULATORY ENVIRONMENTAL PERFORMANCE

Markelov D. A.<sup>1</sup>, Priymak A. Y.<sup>1</sup>, Serbinovsky M. Y.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Public Joint Stock Company "Taganrog Boiler-Making Plant "Krasny Kotelshchik", Taganrog, Russia

**Abstract.** The problem of pollutant emissions into the atmosphere is relevant due to the negative impact on human health (increased risk of cardiovascular diseases, lung cancer, asthma, and bronchitis), air quality (smog formation, reduced visibility), and ecosystems in general (acid

rain, soil and water pollution). An analysis of current regulatory requirements (GOSTs, draft laws, orders, and local federal regulations of the Russian Federation) for the level of pollutant emissions into the atmosphere for newly designed steam boilers has been conducted.

The main technical solutions and methods of their implementation are described using the example of steam boilers, which ensure the reduction of emissions to the required values. A comparison of the main in-furnace measures affecting the characteristics of the active combustion zone and, accordingly, the values of pollutant emissions is provided. Graphical dependencies of the formation of nitrogen

oxides in the furnace chamber on the arrangement of burner devices and the furnace itself are provided.

**Keywords:** emissions of pollutants into the atmosphere, thermal power plant, thermal power station, internal combustion measures, steam boiler, closed layout, nozzle, and steam cooler

Сегодня мировое сообщество активно фокусируется на экологических проблемах, связанных с крупными промышленными предприятиями и теплоэлектростанциями. Загрязняющие вещества, выбрасываемые этими объектами, оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье населения, поэтому важно ежегодно снижать объемы вредных выбросов и стремиться к их минимизации.

Согласно действующей нормативной документации [1-10] концентрации оксидов азота за котельной установкой при сжигании газа должны составлять не более 125 мг/м<sup>3</sup> и мазута не более 250 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на концентрацию кислорода 6%).

Реальные концентрации оксидов азота NO<sub>x</sub> за газомазутными котлами прямо пропорциональны их производительности и колеблются в пределах 125-750 мг/м<sup>3</sup>, при этом они определяются в основном эмиссией оксидов азота.

При традиционных способах сжигания топлив в газомазутных котлах с избытком воздуха доли для мазута NO<sub>x</sub> невелики – на выходе из горелок  $\alpha_{\Gamma}=0,97-1,03$  и на выходе из топки  $\alpha_{\text{т}}=1,03-1,05$ . В настоящее время известно достаточное количество мероприятий по снижению выбросов оксидов азота.

Наиболее распространёнными с точки зрения эффективности, простоты реализации и стоимости получили внутритопочные (технологические) мероприятия: рециркуляция продуктов сгорания и ступенчатое сжигание топлива, усовершенствование конструкций горелочных устройств и т.п.

Степень снижения концентрации NO<sub>x</sub> в уходящих газах при их реализации на паровых котлах колеблется от 20 до 70%. Согласно исследованиям, на эмиссию NO<sub>x</sub> влияют следующие факторы зоны активного горения (далее – ЗАГ, заг):

1. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha_{\text{заг}}$ :

$$\alpha_{\text{заг}} = \alpha_{\text{т}} - 0,5\Delta\alpha_{\text{т}} = \alpha_{\Gamma} + 0,5\Delta\alpha_{\text{т}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{т}}$  – коэффициент избытка воздуха на выходе из топки;

$\alpha_{\Gamma}$  – коэффициент избытка воздуха на выходе в горелках;

$\Delta\alpha_{\text{т}}$  – присос воздуха в топке.

2. Продолжительность пребывания продуктов сгорания в области высоких температур  $\tau_{\text{заг}}$ .
3. Отражённый тепловой поток  $q_{\text{отрзаг}}$ :

$$q_{\text{отрзаг}} = q_{\text{заг}}(1 - \psi_{\text{заг}}), \quad (2)$$

$$q_{\text{заг}} = Q_{\text{тг}} B_{\text{п}} / f_{\text{заг}}, \quad (3)$$

где  $q_{\text{заг}}$  – падающий поток излучения на поверхности, ограничивающие ЗАГ;

$\psi_{\text{заг}}$  – средняя тепловая эффективность экранов;

$Q_{\text{тг}}$  – тепловыделение в топке, ккал/кг;  $V_p$  – расчетный расход топлива, кг/ч;

$f_{\text{заг}}$  – площадь экранов, ограничивающих ЗАГ, м<sup>2</sup>.

4. Среднеинтегральная температура факела  $T_{\text{заг}}$ , °K.

Массовая концентрация оксидов азота (в пересчете на NO<sub>2</sub>, для нормальных условий) в уходящих газах описывается зависимостью:

• для природного газа:

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^{\text{I}} = & 2,05 \cdot 10^{-3} K_{\Gamma} \left[ 26,0 \cdot \exp \left( 0,26 \cdot \frac{\bar{T}_{\text{заг}} - 1700}{100} \right) - 4,7 \right] \times \\ & \times \left[ \exp(q_{\text{заг}}^{\text{отр}}) - 1 \right] \times \left[ 13,0 - 79,8 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,07)^4 + 18,1 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,07)^3 + \right. \\ & \left. + 59,4 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,07)^2 + 9,6 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,07) \right] \cdot \tau_{\text{заг}}; \end{aligned} \quad (3)$$

• для мазута:

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^{\text{II}} = & 2,05 \cdot 10^{-3} K_{\Gamma} \left\{ \left[ 24,3 \cdot \exp \left( 0,19 \cdot \frac{\bar{T}_{\text{заг}} - 1650}{100} \right) - 12,3 \right] \times \right. \\ & \times \left[ \exp(q_{\text{заг}}^{\text{отр}}) - 1 \right] \times \left[ 15,1 - 131,7 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,09)^4 + 72,3 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,09)^3 + \right. \\ & \left. \left. + 73,0 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,09)^2 + 2,8 \cdot (\alpha_{\text{заг}} - 1,09) \right] \cdot \tau_{\text{заг}} + \Delta \text{NO}_2^{\text{III}} \right\}; \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\bar{T}_{\text{заг}}$  – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения, К;

$q_{\text{заг}}^{\text{отр}}$  – отраженный тепловой поток в зоне активного горения, МВт/м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{заг}}$  – коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения;

$\tau_{\text{заг}}$  – время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения, с;

$K_{\Gamma}$  – коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства;

$\Delta \text{NO}_2^{\text{III}}$  – член, учитывающий количество топливных оксидов азота при превышении содержания азота в составе мазута 0,3%, рассчитываемый как:

$$\Delta \text{NO}_2^{\text{III}} = \frac{650 \cdot (N^r - 0,3)}{V_{\Gamma}}, \quad (5)$$

где  $V_{\Gamma}$  – объем продуктов сгорания в ЗАГ.

Эти зависимости показывают, что для снижения эмиссии NO<sub>x</sub> необходимо снижать указанные значения характеристик зоны активного горения ЗАГ. Однако, для коэффициента  $\alpha_{\text{заг}}$  это справедливо лишь

до определённых значений, т.к. при дальнейшем его снижении (менее 1) выход оксидов азота может повыситься из-за увеличения образования быстрых оксидов азота.

Из таблицы 1 видно, что из всех мероприятий только два – рециркуляция продуктов сгорания и двухступенчатое сжигание – обеспечивают одновременное

снижение трёх характеристик ЗАГ из четырёх. Поэтому они и являются наиболее эффективными и универсальными для любых газомазутных котлов.

Таблица 1

**Влияние различных внутритопочных мероприятий на основные характеристики зоны активного горения**

Мероприятие	$q_{отрзг}$	T	$\tau_{заг}$	$a_{заг}$	Влияние на NO <sub>x</sub>
Рециркуляция дымовых газов 20%	снижается	снижается	снижается	увеличивается	снижается на 30-40%
Впрыск влаги 8%	снижается	снижается	не меняется	не меняется	снижается на 15-25%
Двухступенчатое сжигание $\beta=20\%$	снижается	снижается	снижается	снижается	снижается на 20-40%

**Вывод:** выход оксидов азота при сжигании газа и мазута в топках котлов в большей степени определяются значениями основных характеристик зоны активного горения, нежели просто конструктивными признаками топочных камер.

Горелки с подачей газов рециркуляции в общий воздух прошли испытание на котлах ТГМП-114, ТГМЕ-436 (ТЭЦ-11 Мосэнерго), ТГМЕ-464 (ТЭЦ-27 Мосэнерго) и ТГМЕ-190 (Ижевская ТЭЦ-2) и в сочетании с другими мероприятиями позволили обеспечить выбросы оксидов азота на уровне 40-70 мг/м<sup>3</sup>. При этом выбросы монооксида углерода СО составили менее 100 мг/м<sup>3</sup>.

На рисунке 1 приведена гистограмма распределения концентраций оксидов азота при применении односторонней

компоновки низкотоксичных круглофакельных горелок с трубчатой раздачей природного газа и подачей газов рециркуляции в общий воздух для следующих случаев:

- горелки обычной конструкции с центральной раздачей газа ( $\delta_{ст}=0$ ,  $R=0$ );
- горелки с трубчатой раздачей газа ( $\delta_{ст}=0$ ,  $r=0$ );
- горелки с трубчатой раздачей газа ( $\delta_{ст}=25\%$ ,  $r=0$ ) – ТГМЕ-464. ( $\delta_{ст}=38\%$ ,  $r=0$ ) – ТГМЕ-190;
- горелки с трубчатой раздачей газа ( $\delta_{ст}=25\%$ ,  $r=23\%$ ) – ТГМЕ-464. ( $\delta_{ст}=38\%$ ,  $r=23\%$ ) – ТГМЕ-190.

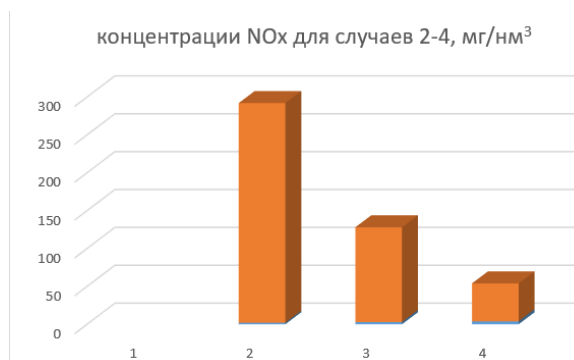


Рис. 1. Показатели низкотоксичных круглофакельных горелок с трубчатой раздачей природного газа и подачей газов рециркуляции. Односторонняя компоновка горелок

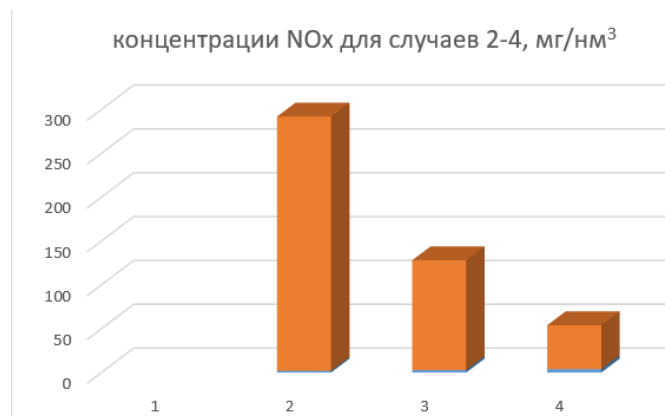


Рис. 1а. Показатели низкотоксичных круглофакельных горелок с трубчатой раздачей природного газа и подачи газов рециркуляции. Встречное расположение горелок

Ступенчатое сжигание газа осуществляется за счёт подачи части воздуха через сопла, расположенные встречно на фронтальной и задней стенах топки в верхней части НРЧ. Выбросы оксидов азота NOx в расчётных режимах при сжигании природного газа снижаются до 125 мг/м³ и ниже.

При сжигании мазута главным мероприятием по подавлению оксидов азота NOx является подача газов рециркуляции в горелки и сама конструкция горелок, обеспечивающая ступенчатое сжигание мазута на горизонтальном участке факела. В

горелки подаётся 25% газов рециркуляции. В таком режиме работы котла выбросы оксидов азота не превысят 250 мг/м³.

Так на котле ТГМП-344А Минской ТЭЦ-4 без изменения конструкции горелок (горелки типа ГМУ-50) только за счёт подачи газов рециркуляции во внутренний канал горелок, и подачи части воздуха выше горелок при сжигании газа удалось снизить выбросы NOx до 70-90 мг/м³ (рис. 2). Причем наибольший эффект достигается от подачи газов рециркуляции (в 4-6 раз).



Рис. 2. Образование оксидов азота в топке котла ТГМП-114 на номинальной нагрузке при различных режимах сжигания газа и мазута для следующих случаев горелок с обычной и усовершенствованной конструкцией: 1) вихревые горелки обычной конструкции (УП НА ДРГ = 0.  $\alpha_{III}=0$ ); 2) вихревые горелки обычной конструкции (УП НА ДРГ = 100.  $\alpha_{III}=0$ ); 3)\*низкотоксичные горелки (УП НА ДРГ = 0.  $\alpha_{III}=0$ ) на газе, (УП НА ДРГ = 100.  $\alpha_{III}=0$ ) на мазуте; 4) низкотоксичные горелки (УП НА ДРГ = 0.  $\alpha_{III}=20\%$ ); 5)\*низкотоксичные горелки (УП НА ДРГ = 100.  $\alpha_{III}=0\%$ ); 6)низкотоксичные горелки (УП НА ДРГ = 100.  $\alpha_{III}=20\%$ )

\*сопла третичного дутья в режиме охлаждения

Значительно меньший эффект получается при сжигании мазута. На новом котле ТГМЕ-190, спроектированном для Ижевской ТЭЦ-2 с низкотоксичными горелками, но расположенными встречно в два яруса, была заложена более глубокая ступенчатость ( $\alpha_r=0,6-0,7$ ).

При загрузке дымососов рециркуляции на 60% и полностью

открытых клапанах к соплам верхнего дутья выбросы  $\text{NO}_x$  были снижены до  $40 \text{ мг/м}^3$ .

Во всех режимах работы как на котле ТГМЕ-464, так и на котле ТГМЕ-190 концентрация  $\text{CO}$  не превышала  $100 \text{ мг/м}^3$ . Эксплуатационный избыток воздуха находился на уровне  $\alpha=1,1$ .



Рис. 2а. Образование оксидов азота в топке котла ТГМП-114 на номинальной нагрузке при различных режимах сжигания мазута для для вышеперечисленных случаев горелок с обычной и усовершенствованной конструкцией

Конструктивные особенности горелки и аэродинамики её проточной части в сочетании с двухпоточностью газораздающих узлов позволяют обеспечить надёжную и экономичную работу котла во всех режимах с низкими концентрациями оксидов азота  $\text{NO}_x$  в уходящих газах.

Основной проблемой, связанными с внедрением внутритопочных мероприятий с целью достижения нормируемых показателей по выбросам оксидов азота при сжигании мазута, является обеспечение надёжности экранных труб по условиям высокотемпературной коррозии.

Причиной высокотемпературной коррозии экранных труб является взаимодействие металла с сероводородом ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

В результате происходит интенсивное окалинообразование на наружной поверхности трубы, утонение и разрыв ее стенки.

Сероводород образуется в зоне активного горения топочной камеры при сжигании сернистого топлива с недостатком кислорода. Его образование происходит при взаимодействии диоксида серы и молекулярной серы с водородом:



Обязательным условием появления водорода и сероводорода в факеле является восстановительная газовая среда,

характеризующаяся высокой концентрацией продуктов неполного сгорания ( $\text{CO} > 2\%$ ) при практическом отсутствии кислорода.



Образование восстановительной среды происходит при недостатке воздуха на горение, т. е. при работе горелок с  $\alpha_T < 1$ , при затянутах смесеобразовании в факеле либо при неравномерности раздачи топлива и воздуха по горелкам.

Минимальная концентрация  $H_2S$ , при которой отмечено развитие коррозионных процессов, для стали 12Х1МФ и стали 20 при температуре поверхности трубы 400-450°C составляет 0,01%.

При сжигании сернистых мазутов ( $S^p \geq 0,6$  г/МДж) сульфидная коррозия топочных экранов наблюдалась на котлах блоков 300-800 МВт в зонах, где температура металла выше 520°C и объемная концентрация  $H_2S$  0,2-0,08 %.

При внедрении вышеуказанных технические решения особое внимание необходимо обратить на способ регулирования температуры пара.

Регулирование температуры пара в котле осуществляется посредством системы впрыска охлаждающей воды в тракт высокого давления, тогда как температура пара в низком давлении контролируется паропаровым теплообменником и первой ступенью пароохладителя.

Современные конструкции котлов диктуют необходимость модернизации как самой схемы регулирования температуры пара, так и конструкций пароохладительных устройств [11].

Предлагаемое решение заключается в замене традиционных струйных форсунок на современные центробежные форсунки в устройствах запуска. Использование центробежных форсунок обеспечивает лучший распыл воды даже при малых расходах пара, характерных для периода запуска котла. Форсунки выполнены из нового высокопрочного материала, устойчивого к эрозии, что значительно увеличивает срок службы оборудования [12].

Анализ запросов на проектирование и поставку котлоагрегатов и котельно-

вспомогательного оборудования, поступивших на ПАО ТКЗ «Красный котельщик», за период с начала 2025 г. показывает следующую тенденцию.

Из 46 заявок на комплексную поставку котлоагрегатов с котлами различных типов:

- 58 % заявок приходит на пылеугольные котлы;
- 23 % газовые и газо-мазутные котлы различной производительности;
- 19 % парогазовые установки с котлами утилизаторами.

Из всех заявок на твердотопливные котлы различной паропроизводительности, 61% запросов, техническими требованиями на разработку котлоагрегатов повышенными требованиями по обеспечению экологических показателей, оговаривается размещение нового современного оборудования в существующие котельные ячейки, с заменой морально устаревших котлоагрегатов, как правило негерметичной конструкции.

Зачастую требуется сохранить привязки основных несущих колонн каркаса котлоагрегата к существующим фундаментам демонтируемого оборудования, что в условиях замены негерметичных экранов котлоагрегата на герметичные, трудновыполнимо т.к. появляется необходимость размещения на экранах поясов жесткости, что всегда приводит к увеличению площади поверхности, занимаемой каркасом котельного агрегата.

Повышенные требования по экологическим показателям часто приводят к необходимости увеличения объема топки и, соответственно, размеров котлоагрегатов.

Решением является применение сомкнутой компоновки поверхностей нагрева с замкнутым контуром аэродинамического выступа топки, для котлоагрегатов, работающих на твердых топливах [13].

Следует отметить, что котлоагрегаты сомкнутой компоновки достаточно широко применяются в энергоблоках ТЭС, работающих на газообразном и жидком топливе. В топках котлов таких котлоагрегатов не требуется организации аэродинамического выступа мембранных газоплотных экранов в верхней части топки со стороны конвективной шахты котла или опускающего газохода.

Необходимость формирования аэродинамического выступа экранов, направленного вглубь топки, при сжигании твердых топлив возникает для улучшения аэродинамики потока продуктов сгорания в верхней части топочной камеры и увеличения коэффициента использования пароперегревателей, расположенных на выходе из топки и в горизонтальном газоходе котла.

## Список литературы

1. ГОСТ Р 50831-95 «Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования».
2. Приказ № 248 от 25.04.2023 министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Об утверждении нормативного документа в области охраны окружающей среды «Технологические показатели наилучших доступных технологий сжигания топлива на крупных установках в целях производства энергии»».
3. Законопроект № 584587-5 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования нормирования в области охраны окружающей среды и введения мер экономического стимулирования хозяйствующих субъектов для внедрения наилучших технологий».

Предлагаемая конструкция с замкнутым аэродинамическим выступом позволяет применять сомкнутую компоновку поверхностей нагрева котлов, работающих на твердых топливах, снизить металлоемкости и стоимость котлоагрегатов, решает вопросы экологии и размещения оборудования в существующих зданиях котельных отделений электростанций.

## Заключение

В статье описаны технические решения и методы их внедрения, применяемые при проектировании паровых котлов с целью обеспечения требуемого уровня выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Сделаны выводы, что наибольшее влияние на снижение выбросов вредных веществ в атмосферу оказывает рециркуляция дымов газов (30-40%), а при одновременном применении нескольких мероприятий эффект может достигнуть 50%.

4. Федеральный закон Российской Федерации «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ от 10.01.2002 г.
5. Директива 2010/75/ЕС ЕС «О промышленных выбросах» (о комплексном предупреждении и контроле загрязнений).
6. Директива Европейского парламента и Совета ЕС 96/61/ЕС от 24 сентября 1996 г. «О комплексном предупреждении и контроле загрязнений» [Directive 96/61/EC of the European Parliament and of the Council of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control].
7. Директива Европейского парламента и Совета ЕС 2008/1/ЕС от 15 января 2008 г. «О комплексном предупреждении и контроле загрязнений» [Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control].
8. Инструктивно-методические указания по взиманию платы за загрязнение окружающей природной среды, 1993 г.



9. Европейские справочники по НДТ [BREFs, best available techniques REference document].
10. Федеральный закон Российской Федерации «Об охране атмосферного воздуха» № 96-ФЗ от 04.05.1999 г.
11. Приймак, А. Ю. Развитие конструкции центробежных форсунок впрыскивающих парохладителей / А. Ю. Приймак // Вестник науки. – 2023. – Т. 3, № 11(68). – С. 1168-1171.
12. Приймак, А. Ю. Выбор перспективных материалов центробежных форсунок впрыскивающих парохладителей / А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 240–247.
13. Маркелов, Д. А. Выбор компоновки котлоагрегатов тепловых электрических станций на начальном этапе проектирования и преимущества сомкнутой компоновки / Д. А. Маркелов, М. Ю. Сербиновский // Известия Тульского государственного университета. – 2024. – № 3. – С. 343–348.

## References

1. GOST R 50831-95 Ustanovki kotel'nye. Toplomekhanicheskoe oborudovanie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [State Standard R 50831-95 "Boiler Units. Thermal Mechanical Equipment. General Technical Requirements."]
2. Prikaz № 248 ot 25.04.2023 ministerstva prirodnkh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii «Ob utverzhdenii normativnogo dokumenta v oblasti okhrany okruzhayushchei sredy «Tekhnologicheskie pokazateli nailuchshikh dostupnykh tekhnologii szhiganiya topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii» [Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation "On Approval of the Regulatory Document in the Field of Environmental Protection "Technological Indicators of the Best Available Fuel Combustion Technologies in Large Installations for Energy Production'."].
3. Zakonoproekt № 584587-5 «O vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii v chasti sovershenstvovaniya normirovaniya v oblasti okhrany okruzhayushchei sredy i vvedeniya mer ekonomicheskogo stimulirovaniya khozyaistvuyushchikh sub"ektov dlya vnedreniya nailuchshikh tekhnologii» [Bill N. 584587-5 "On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Terms of Improving Environmental Standards and Introducing Economic Incentives for Economic Entities to Implement Best Available Technologies"]
4. Federal'nyi zakon Rossiiskoi Federatsii «Ob okhrane okruzhayushchei sredy» [Federal Law of the Russian Federation "On Environmental Protection"], № 7-FZ ot 10.01.2002 g.
5. Direktiva 2010/75/ES ES «O promyshlennykh vybrosakh» (o kompleksnom preduprezhdenii i kontrole zagryaznenii) [Directive 2010/75/EU of the EU "On Industrial Emissions" (on integrated pollution prevention and control)]
6. Directive 96/61/ES of the European Parliament and of the Council of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control.
7. Directive 2008/1/ES of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control.
8. Instruktivno-metodicheskie ukazaniya po vzimaniyu platy za zagryaznenie okruzhayushchei prirodnoi sredy [Instructional and Methodological Guidelines for Charging Environmental Pollution Fees], 1993 g.
9. BREFs, best available techniques REference document.
10. Federal'nyi zakon Rossiiskoi Federatsii «Ob okhrane atmosfernogo vozdukha» [Federal Law of the Russian Federation "On Air Protection"], № 96-FZ ot 04.05.1999 g.

11. Priimak, A. Yu. Razvitie konstrukttsii tsentrobezhnykh forsunok vpryskivayushchikh parookhladitelei [Development of the design of centrifugal nozzles for injection steam coolers], Vestnik nauki. – 2023. – T. 3, № 11(68). – pp. 1168-1171.
12. Priimak, A. Yu., Vybor perspektivnykh materialov tsentrobezhnykh forsunok vpryskivayushchikh parookhladitelei [Selection of promising materials for centrifugal nozzles of injection steam coolers], Vestnik Rostovskogo

gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya. – 2024. – № 1. – pp. 240–247.

13. Markelov, D. A, Serbinovskii M. Yu. Vybor komponovki kotloagregatov teplovykh elektricheskikh stantsii na nachal'nom etape proektirovaniya i preimushchestva somknutoi komponovki [Selecting the layout of thermal power plant boiler units at the initial design stage and the advantages of a closed layout], Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. – 2024. – № 3. – pp. 343–348.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/ ABOUT THE AUTHORS

**Денис Александрович Маркелов**, начальник сектора подготовки технико-коммерческих предложений конструкторского бюро, ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 347910, г. Таганрог, ул. Ленина, д. 220, Markelov\_DA@tkz.su

**Антон Юрьевич Приймак**, главный инженер проекта конструкторского бюро, ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 347910, г. Таганрог, ул. Ленина, д. 220, Priymak\_AY@tkz.su

**Михаил Юрьевич Сербиновский**, доктор технических наук, главный специалист сектора прочностных расчетов отдела расчетов конструкторского бюро, ПАО ТКЗ «Красный котельщик», 347910, г. Таганрог, ул. Ленина, д. 220, serb-m@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5405-4632

**Denis Aleksandrovich Markelov**, Head of the Technical and Commercial Proposal Preparation Sector, Design Bureau, PAO TKZ Krasny Kotelshchik, 220 Lenin Street, Russia, Taganrog, 347910

**Anton Yuryevich Priymak**, Chief Project Engineer, Design Bureau, PAO TKZ Krasny Kotelshchik, 220 Lenin Street, Russia, Taganrog, 347910

**Mikhail Yuryevich Serbinovsky**, Doctor of Engineering Sciences, Chief Specialist, Strength Calculations Sector, Calculations Department, Design Bureau, PAO TKZ Krasny Kotelshchik, 220 Lenin Street, Russia, Taganrog, 347910