

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

В. А. Стенин, И. В. Ершова

*Северный (Арктический) федеральный университет
им. М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация*

В составе мероприятий по охране воздушного бассейна при работе судовых котлов и тепловых электрических станций крайне важно учитывать и применять способы снижения выбросов оксидов азота. Подавление оксидов азота возможно с помощью технологических (первичных, режимных) мероприятий. Рециркуляция дымовых газов (РДГ) является самым распространенным способом подавления образования оксидов азота в газомазутных котлах, средством снижения температурного уровня и концентрации оксидов азота в дымовых газах. Рециркуляция продуктов сгорания вместе с экологическим действием оказывает немаловажное влияние на технико-экономические показатели котла, понижая его коэффициент полезного действия (КПД), вследствие чего применение этого метода достаточно ограничено. Рассматривается вариант организации схемы РДГ в судовых вспомогательных котлах с целью использования РДГ для снижения выбросов оксидов азота и для повышения КПД топочного устройства. Предложено совместить паровую и углекислотную конверсию топлива продуктами рециркуляции с энергетическим горением и термохимической регенерацией теплоты. Приведено термодинамическое обоснование целесообразности рециркуляции продуктов сгорания в судовом вспомогательном котле. Проиллюстрирована возможность конвертирования топлива при совместном вводе его и газов рециркуляции в восстановительную зону горения топочной камеры на основе энергетического и стехиометрического анализов процессов горения условного жидкого топлива. Рассчитаны соотношение подачи кислорода воздуха в восстановительную и окислительную зоны горения, степень рециркуляции дымовых газов, изменение КПД топки при термохимической регенерации теплоты. Результаты исследования предложено использовать при нестехиометрическом и ступенчатом сжигании топлива.

Ключевые слова: судовой котел, рециркуляция дымовых газов, энергетический и стехиометрический анализ, конверсия топлива, термохимическая регенерация теплоты.

Для цитирования: Стенин В. А., Ершова И. В. Повышение энергоэффективности и экологической безопасности судовых паровых котлов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 40–46. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-40-46.

Введение

Известны стандарты, ограничивающие выхлоп главных дизелей, однако эти нормативные документы не имеют силы при оценке качества продуктов сгорания в котлах, установленных на судне. В то же время выхлоп котельных установок вносит значительный вклад в загрязнение атмосферного воздуха, т. к. масса сжигаемого в них топлива соизмерима с потреблением главной установки [1].

Вне акватории морского или речного порта главные двигатели являются самым основным источником загрязнения воздушного бассейна, а если рассмотреть территорию порта, то здесь уже наибольший экологический вред наносит котельная установка, т. к. она является основным потребителем топлива. Например, на судах типоразмера Suezmax потребление топлива вспомогательными котельными установками составляет в среднем до 180 тыс. т. Мощность таких вспомогательных котельных установок – около 38,8 МВт, а производительность пара достигает 55 т/ч, что практически соответствует характеристикам главных котельных установок [1].

Наиболее токсичными неорганическими веществами, образующимися при сжигании топлива, являются оксиды азота. При обследовании действующих корабельных паровых котлов было выявлено, что содержание оксидов азота превышает нормы в 3–5 раз при бездымном горении и незначительном (0,02–0,04 %) выделении CO [2].

Наиболее экологичный режим работы судового котла рекомендуется [2] осуществлять путем регулирования коэффициента избытка воздуха α в пределах 1,15–1,25; в работе [1] предлагается увеличить значение α до 1,9.

В настоящее время на основе различных подходов обсуждаются аналитические обоснования коэффициента полезного действия (КПД) судовых энергетических установок (СЭУ), но в литературе практически не проводится оценка энергетической эффективности СЭУ на основе коэффициента полезного действия.

Можно заметить, опираясь на практику, что удельный расход топлива на СЭУ в целом наиболее часто применяется в качестве показателя энергетической эффективности СЭУ. При работе на различных режимах в течение срока эксплуатации этот показатель рационально использовать для оценки сравнительной эффективности установки. Впрочем, удельный расход топлива однозначно связан с КПД СЭУ, и с КПД судового котла, поэтому вопросы о КПД и экологической безопасности судовых котлов остаются актуальными [3, 4].

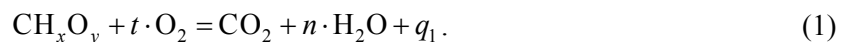
Методы исследования

Очень важными среди мероприятий по охране воздушного бассейна как на теплоэлектростанциях (стационарная энергетика), так и в транспортной (судовой) энергетике являются меры по снижению выбросов оксидов азота (NO_x). Их возможно подавить с помощью технологических (первичных, режимных) мероприятий. Самым распространенным среди таких мероприятий подавления образования оксидов азота в газомазутных котлах считается рециркуляция дымовых газов (РДГ) – элементарное средство снижения температурного уровня, а значит, и концентрации оксидов азота в дымовых газах (ДГ). Этот метод ограничен, поскольку одновременно с экологическим действием рециркуляция продуктов сгорания значительно влияет на технико-экономические показатели котла, понижая его КПД. Кроме этого, повышенный уровень РДГ может повлечь опасное возрастание концентрации бензапирена. Поэтому уменьшить концентрацию оксидов азота в продуктах сгорания наиболее рационально можно с помощью снижения избытка воздуха, который подается через горелки. Он эффективно реализуется при многоярусном размещении горелок нестехиометрическим либо ступенчатым сжиганием топлива, сжиганием с умеренным контролируемым химическим недожогом, которые успешно применяются на некоторых газомазутных и пылеугольных котлах [5].

Повысить эффективность системы РДГ можно путем утилизации теплоты продуктов сгорания с организацией соответствующих термических и химических реакций (ТХР) [6], которые уменьшают содержание NO_x в выхлопных газах, снижают коэффициент избытка воздуха α и увеличивают термодинамический КПД котла [5, 7].

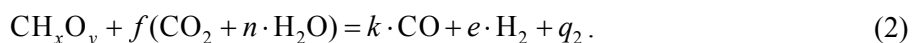
Рассмотрим термодинамические основы применения ТХР при сжигании жидкого топлива в судовых котлах. Применение первого начала термодинамики достаточно для проведения энергетического анализа (энергетических соотношений для химических реакций) [8, 9]. В качестве условного жидкого топлива судовых котлов в первом приближении можно принять условное котельное топливо (средний состав топлива) с содержанием углерода – 87 %, водорода – 12,6 % и кислорода – 0,4 % [10].

Термохимическое уравнение реакции, которое соответствует полному сгоранию 1 моля условного топлива в стехиометрическом количестве чистого кислорода, имеет вид [8, 9]:



При соответствующих условиях РДГ в котле способствует конверсии топлива. Окислительная конверсия условного топлива в синтез-газ (смесь CO и H_2) может быть воспроизведена тремя методами: паровой конверсией, парциальным окислением топлива кислородом и углекислотной конверсией топлива. Эффективность ТХР реализуется совмещением эндотермических и экзотермических реакций [11].

Следующее термохимическое уравнение реакции представляет процесс конверсии топлива газами рециркуляции (паровая и углекислотная конверсия) [11]:



Уравнение сгорания конвертированного топлива:

$$k \cdot \text{CO} + e \cdot \text{H}_2 + h \cdot \text{O}_2 = k \cdot \text{CO}_2 + u \cdot \text{H}_2\text{O} + q_3. \quad (3)$$

Энтальпия образования условного котельного топлива определяется в соответствии с уравнением

$$q_1 = Q_B M(\text{CH}_x\text{O}_y) / 1000. \quad (4)$$

Тепловой эффект реакции регенерации условного котельного топлива определяется по стандартным энтальпиям образования:

$$q_2 = -(k\Delta H_{\text{CO}} - \Delta H_{\text{CH}_x\text{O}_y} - f\Delta H_{\text{CO}_2} - fn\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (5)$$

Тепловой эффект реакции сгорания регенерированного топлива:

$$q_3 = -(-k\Delta H_{\text{CO}} + k\Delta H_{\text{CO}_2} + u\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (6)$$

Энтальпия образования условного котельного топлива определяется в соответствии с уравнением

$$\Delta H_{\text{CH}_x\text{O}_y} = -(q_1 + \Delta H_{\text{CO}_2} + n\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (7)$$

В уравнениях (1)–(7) приняты следующие обозначения: q_1, q_2, q_3 – тепловые эффекты реакций горения исходного топлива, регенерации топлива, горения регенерированного топлива; $\Delta H_{\text{CO}_2}, \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}, \Delta H_{\text{CO}}$ – стандартные энтальпии образования диоксида углерода, водяных паров, оксида углерода соответственно; $k, f, n, h, u, e, t, x, y$ – коэффициенты, которые определяются по стехиометрическим уравнениям химических реакций; Q_B – высшая теплотворная способность топлива; $M(\text{CH}_x\text{O}_y)$ – молярная масса условного жидкого топлива.

Величины q_1, q_2, q_3 , определяющие тепловые эффекты реакций горения, рассчитаны в соответствии с зависимостями (4)–(6). Так, величина q_1 составила 640 кДж/моль. Тепловые эффекты реакций горения согласно уравнению Кирхгофа зависят от температуры, но из-за незначительного изменения теплового эффекта от температуры ее влиянием можно пренебречь. К примеру, по данным [8] уменьшение величины q_1 при изменении температуры от 300 до 1 000 К составило 0,2 %. Знаки в величинах q соответствуют эндотермическим или экзотермическим реакциям.

Подвод существенного количества теплоты для процесса конверсии топлива проще всего реализовать в топке котла с помощью частичного сжигания основного топлива. Доля m от 1 кг CH_xO_y , которая необходима для поддержания термодимической реакции конверсии, в первом приближении: $m = q_2 / q_3 = 0,223$. Остальная часть топлива подвергается конверсии. Таким образом, для конвертирования 0,777 кг CH_xO_y необходимо сжечь в топочном объеме 0,223 кг CH_xO_y , при сгорании которого выделяется теплота $q_T = 143$ кДж/моль. При сгорании конвертированных 0,777 кг CH_xO_y выделится $q_T^K = 640$ кДж/моль.

Значения КПД определяются по уравнениям

$$\eta_T^K = \frac{q_T + q_T^K + q_P - q_{\Pi}}{q_T + q_T^K + q_P}; \quad (8)$$

$$\eta_T = \frac{q_1 - q_{\Pi}}{q_1}, \quad (9)$$

где q_P – теплота, которая возвращается в топку рециркуляцией ДГ; q_{Π} – потери теплоты с уходящими ДГ; η_T^K – КПД топки при комбинированном горении; η_T – КПД топки при стандартном горении.

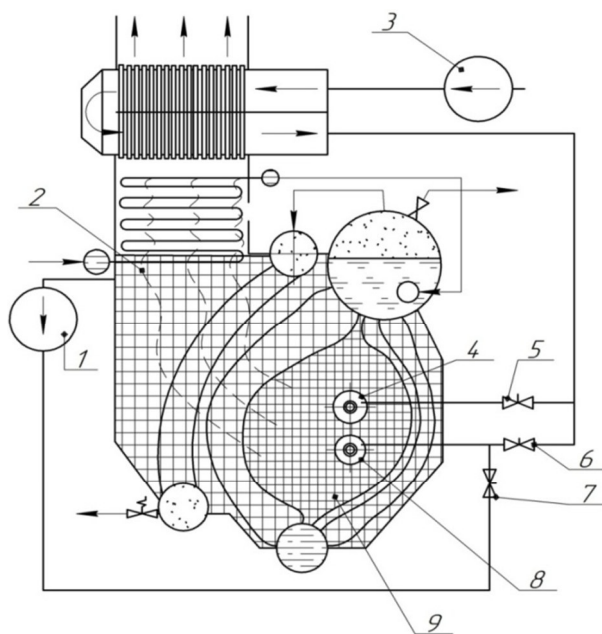
Результаты исследования

На стехиометрических законах реакций основываются все количественные соотношения при расчете химических процессов [8, 9, 12]. Стехиометрический анализ, который был проведен в соответствии с уравнениями (1)–(3), проиллюстрировал, что одинаковое количество кислорода O_2 требуется для обычного и комбинированного сжигания 1 кг CH_xO_y . Однако комбинированное сжигание 1 кг CH_xO_y связано с повышением массы ДГ, полностью возвращающихся на основании уравнения (2) в цикл путем рециркуляции и расходующихся на реализацию конверсии котельного топлива.

Выполним проверочный расчет ТХР для условного котельного топлива с процентным содержанием: $C = 87$; $H = 12,6$; $O = 0,4$ %. Процессы сгорания котельного топлива, конвертирования и сгорания конвертированного топлива химической регенерации уходящих газов углеводородным топливом описываются уравнениями (1)–(3), где $x = 12H / C = 1,74$; $y = 12O / 16C = 0,003$; $n = 0,87$; $f = 0,53$; $k = 1,53$; $e = 1,33$; $t = 1,43$.

Допустим, что $\Delta t = 130$ К, а $\Delta t_p = 400$ К, тогда величина $q_{II} = M_{дг} \mu_{дг} c_p \Delta t = 72$ кДж/моль, а $q_p = \Delta M \mu_{дг} c_p \Delta t_p = 53,5$ кДж/моль. В уравнениях приняты следующие обозначения: $M_{дг} = 18,4$ – расчетная масса ДГ при обычном горении, кг/кг; $M_{дг}^p = 19,9$ – расчетная масса ДГ при комбинированном горении, кг/кг; $\Delta M = m M_{дг}^p$ – масса ДГ, возвращаемая в топку рециркуляцией; $\mu_{дг} = 27,9$ – молярная масса ДГ, кг/кмоль; $c_p = 1,08$ – средняя удельная массовая теплоемкость ДГ, кДж/(кг·К); Δt – разность температур окружающей среды и выхлопных газов; Δt_p – разность температур окружающей среды и газов рециркуляции [13]. В этом случае величина КПД топочного устройства, определяемая по уравнениям (8) и (9), составит $\eta_T = 0,89$ и $\eta_T^k = 0,91$ соответственно.

Технология совмещения эндотермических реакций конверсии котельного топлива с термическим горением и термохимической регенерацией теплоты в судовом вспомогательном паровом котле представлена на схеме (рис.).



Схемное решение реализации РДГ в судовом котле:

- 1 – дымоход; 2 – газоход; 3 – дутьевой вентилятор; 4, 8 – топливные горелки;
- 5, 6 – регулирующая арматура подачи воздуха; 7 – регулирующая арматура подачи ДГ; 9 – топка

Вентилятор 3 необходим для подачи воздуха, нагретого в воздухоподогревателе, в систему топливоснабжения (горелки 4 и 8, топочная камера 9, регулирующие заслонки 5 и 6). Дымоход 1 подает продукты сгорания из газохода 2 в горелки 8 через регулирующую заслонку 7.

В топливные горелки 8 подаются газы рециркуляции и воздух, который необходим для конверсии первичного топлива. В данной зоне горения теплота газов рециркуляции и теплота сгорания части первичного топлива используются для конверсии остальной части первичного топлива. В форсунки 4 поступает воздух с коэффициентом избытка $\alpha = 1,05$.

В стационарной тепловой энергетике применяются элементы представленной технологии по снижению выбросов оксидов азота. Например, на ряде энергетических котлов апробирован нестехиометрический метод сжигания топлива, который включает в себя организацию в топочной камере отдельных зон горения [14]. В восстановительной зоне протекают эндотермические реакции конверсии котельного топлива продуктами горения при недостатке кислорода, что снижает образование термических и топливных оксидов азота. Образование термических NO_x в окислительной зоне ТХР нивелирует путем организации эндотермических процессов и снижения температуры экзотермических реакций. Одним из примеров метода ступенчатого сжигания является котел, горелки которого расположены фронтально. Над горелками устанавливаются форсунки для подачи свежего заряда, а под горелками ставятся устройства для введения газов рециркуляции [7].

Заключение

Котельные установки, в том числе и судовые котлы, которые сжигают органическое топливо, относятся к одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха оксидами азота. На снижение выбросов оксидов азота в настоящее время направлено и успешно внедрено значительное количество самых разных природоохранных технологий. Технологии имеют различия в стоимости их внедрения и эксплуатации, а также в эффективности.

С позиций материальных и временных затрат для российской судовой теплоэнергетики самыми интересными являются малозатратные технологии, которые позволяют снизить выбросы в 1,5–2 раза без особого влияния на технико-экономические показатели работы оборудования.

Рециркуляция ДГ относится к элементарным средствам снижения температурного уровня, а значит, и концентрации оксидов азота в ДГ. Так как рециркуляция продуктов сгорания вместе с экологическим действием оказывает немаловажное влияние на технико-экономические показатели котла, понижая его КПД, то применение этого метода достаточно ограничено. Рассмотренный вариант организации схемы РДГ в судовых вспомогательных котлах предполагает использование РДГ как для снижения выбросов оксидов азота, так и для повышения КПД топочного устройства. Для этого предложено совместить паровую и углекислотную конверсию топлива продуктами рециркуляции с энергетическим горением и термохимической регенерацией теплоты. Представлено термодинамическое обоснование целесообразности рециркуляции продуктов сгорания в судовом вспомогательном котле. На основе энергетического и стехиометрического анализов процессов горения условного жидкого топлива приведена возможность конвертирования топлива при совместном вводе его и газов рециркуляции в восстановительную зону горения топочной камеры. Расчетом установлены соотношения подачи кислорода воздуха в восстановительную и окислительную зоны горения, степень РДГ, изменение КПД топки при термохимической регенерации теплоты. Практическое использование предлагаемого решения возможно в рамках реализации известных способов нестехиометрического и ступенчатого сжигания топлива, успешно применяемых на некоторых стационарных газомазутных и пылеугольных котлах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панамарев В. Е. Влияние коэффициента избытка воздуха вспомогательной котельной установки на состав отработанных газов // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2013. № 2 (21). С. 44–52. DOI: 10.21821/2309-5180-2013-5-2-44-52.
2. Колтаков С. П. Повышение экологической безопасности судовых паровых котлов путем уменьшения эмиссии оксидов азота // Судостроение. 2002. № 5. С. 29–30.
3. Ле Куок Туен. Исследование методов оценки эффективности судовых энергетических установок с целью обеспечения безопасности в эксплуатации // Наука, техника и образование. 2017. № 8. С. 28–33.
4. Adamkiewicz A., Bartoszewski M., Kendra M. Analysis of consequences of using gas fuels for running auxiliary ship boilers in the light of contemporary environmental protection requirements // Management Systems in Production Engineering. 2016. Vol. 23. Iss. 3. P. 183–190. DOI: 10.12914/MSPE-07-03-2016.
5. Росляков П. В., Ионкин И. Л. Снижение выбросов оксидов азота на котле ТГМЕ-464 электростанции IRU (Эстония) // Теплоэнергетика. 2015. № 1. С. 45–52.

6. *Попов С. К.* Методика оценки эффективности применения термохимической регенерации тепловых отходов // Пром. энергетика. 2014. № 8. С. 36–40.
7. *Котлер В. Р.* Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергия, 1987. 144 с.
8. *Гамбург Ю. Д.* Химическая термодинамика. М.: Лаборатория знаний, 2016. 237 с.
9. *Хейвуд Р. У.* Термодинамика равновесных процессов. М.: Мир, 1983. 492 с.
10. *Возницкий И. В., Пунда А. С.* Судовые двигатели внутреннего сгорания. М.: Моркнига, 2008. Т. 2. 470 с.
11. *Арутюнов В. С., Крылов О. В.* Органическая химия: окислительные превращения метана. М.: Юрайт, 2017. 371 с.
12. *Краткий справочник физико-химических величин* / под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. СПб.: Иван Федоров, 2003. 240 с.
13. *Безгрешнов А. Н., Липов Ю. М., Шлейфер Б. М.* Расчет паровых котлов в примерах и задачах. М.: Энергоатомиздат, 1991. 241 с.
14. *Таймаров М. А., Кувшинов Н. Е., Ахметова Р. В., Сунгатуллин Р. Г., Чикляев Д. Е.* Исследование химических процессов образования оксидов азота при сжигании газа и мазута // Вестн. Казан. технологич. ун-та. 2016. Т. 19. № 20. С. 80–83.

Статья поступила в редакцию 05.05.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стенин Валерий Александрович – Россия, 163002, Архангельск; Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова; д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры океанотехники и энергетических установок; stenin61@yandex.ru.

Ершова Ирина Валерьевна – Россия, 163002, Архангельск; Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова; старший преподаватель кафедры математики и информационных технологий; аспирант кафедры океанотехники и энергетических установок; Irina-124@yandex.ru.



IMPROVEMENT OF POWER EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF SHIP BOILERS

V. A. Stenin, I. V. Ershova

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

Abstract. The article focuses on the methods of reducing nitrogen oxide emissions that are important to consider and apply in operation of ship boilers and thermal power plants, along with other activities aimed to protect the environment. Nitrogen oxide emissions can be restrained by using the technological (primary, in-process) operations. Flue gas recirculation is the most popular method of restraining nitrogen oxide emissions in oil-gas boilers, reducing the temperature and nitrogen oxide concentration in flue gases. Besides affecting the environment, the combustion products recirculation greatly lowers the technical and economic performance of the boiler by decreasing its performance that is why using the method remains limited. There has been described the scheme of flue gas recirculation in the ship auxiliary boilers that ensures reduction of nitrogen oxide emissions and increase in efficiency of boiler furnace. It has been proposed to combine steam and carbon dioxide fuel conversion with power combustion and thermochemical heat regeneration. Thermodynamic feasibility of combustion product recirculation in ship auxiliary boiler has been given. Using the power and stoichiometric analyses of reference liquid fuel combustion, the possibility of fuel conversion has been illustrated for the case when both fuel and recirculation gases are supplied into reburning zone of the furnace. The calculations determine air oxygen ratio for reburning and oxidative zones, flue gas recirculation factor and furnace efficiency change at thermochemical heat regeneration. The study results are proposed to use in non-stoichiometric and staged fuel combustion.

Key words: ship boiler, flue gas recirculation, power and stoichiometric analysis, fuel conversion, thermochemical heat regeneration.

For citation: Stenin V. A., Ershova I. V. Improvement of power efficiency and environmental safety of ship boilers. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;3:40-46. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-40-46.

REFERENCES

1. Panamarev V. E. Vliianie koeffitsienta izbytkha vozdukhha vspomogatel'noi kotel'noi ustanovki na sostav otrabotannykh gazov [Influence of air excess coefficient of auxiliary boiler on composition of exhaust gases]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2013, no. 2 (21), pp. 44-52. DOI: 10.21821/2309-5180-2013-5-2-44-52.
2. Kolpakov S. P. Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti sudovykh parovykh kotlov putem umen'sheniia emissii oksidov azota [Improving environmental safety of ship steam boilers by reducing nitrogen oxide emissions]. *Sudostroenie*, 2002, no. 5, pp. 29-30.
3. Le Kuok Tien. Issledovanie metodov otsenki effektivnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok s tseliu obespecheniia bezopasnosti v ekspluatatsii [Study of methods for assessing effectiveness of ship power plants in order to ensure operational safety]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2017, no. 8, pp. 28-33.
4. Adamkiewicz A., Bartoszewski M., Kendra M. Analysis of consequences of using gas fuels for running auxiliary ship boilers in the light of contemporary environmental protection requirements. *Management Systems in Production Engineering*, 2016, vol. 23, iss. 3, pp. 183-190. DOI: 10.12914/MSPE-07-03-2016.
5. Rosliakov P. V., Ionkin I. L. Snizhenie vybrosov oksidov azota na kotle TGME-464 elektrostantsii IRU (Estoniia) [Reducing nitrogen oxide emissions in boiler TGME-464 of IRU power plant (Estonia)]. *Teploenergetika*, 2015, no. 1, pp. 45-52.
6. Popov S. K. Metodika otsenki effektivnosti primeneniia termokhimicheskoi regeneratsii teplovykh otkhodov [Methodology for assessing effectiveness of using thermochemical recovery of thermal waste]. *Promyshlennaia energetika*, 2014, no. 8, pp. 36-40.
7. Kotler V. R. *Oksidy azota v dymovykh gazakh kotlov* [Nitrogen oxides in boiler flue gases]. Moscow, Energiia Publ., 1987. 144 p.
8. Gamburg Iu. D. *Khimicheskaia termodinamika* [Chemical thermodynamics]. Moscow, Laboratoriia znaniia Publ., 2016. 237 p.
9. Kheivud R. U. *Termodinamika ravnovesnykh protsessov* [Thermodynamics of equilibrium processes]. Moscow, Mir Publ., 1983. 492 p.
10. Voznitskii I. V., Punda A. S. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Marine internal combustion engines]. Moscow, Morkniga Publ., 2008. Vol. 2. 470 p.
11. Arutiunov V. S., Krylov O. V. *Organicheskaia khimiia: okslitol'nye prevrashcheniia metana* [Organic chemistry: oxidative transformations of methane]. Moscow, Iurait Publ., 2017. 371 p.
12. *Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Quick reference book of physico-chemical quantities]. Pod redaktsiei A. A. Ravdelia i A. M. Ponomarevoi. Saint-Petersburg, Ivan Fedorov Publ., 2003. 240 p.
13. Bezgreshnov A. N., Lipov Iu. M., Shleifer B. M. *Raschet parovykh kotlov v primerakh i zadachakh* [Analysis of steam boilers in examples and problems]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 241 p.
14. Taimarov M. A., Kuvshinov N. E., Akhmetova R. V., Sungatullin R. G., Chikliaev D. E. Issledovanie khimicheskikh protsessov obrazovaniia oksidov azota pri szhiganiia gaza i mazuta [Study of chemical processes of forming nitrogen oxides under gas and fuel oil combustion]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 20, pp. 80-83.

The article submitted to the editors 05.05.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stenin Valery Aleksandrovich – Russia, 163002, Arkhangelsk; Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Ocean Engineering and Power Plants; stenin61@yandex.ru.

Ershova Irina Valer'yevna – Russia, 163002, Arkhangelsk; Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov; Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Information Technologies; Postgraduate Student of the Department of Ocean Engineering and Power Plants; Irina-124@yandex.ru.

