

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-193-200

RESEARCH OF OXYGEN GENERATION OF OZONE FOR MARINE ENGINES EXHAUST GAS CLEANING

A. V. Turkin

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossisk, Russian Federation

Increasing requirements of national and international standards for environmental safety of air emissions from ships requires reducing the concentration of toxic components in the marine engines exhaust gases. The most dangerous components of the exhaust gases are nitrogen and sulphur oxides, carbon monoxide and unburned hydrocarbons. Thus the greatest technical difficulty is the removal of nitrogen oxides. A method of cleaning the exhaust gases from acidic oxides and particulate matter by using the mechanism of adsorption solid is considered. For these purposes, integrated device for ship engine exhaust gas cleaning is designed and manufactured. Cleaning device is based on the oxidation of nitrogen oxides NO in the presence of ozone until dioxide NO₂ to further their adsorption on the surface and within the granules of adsorbent - slag pumice. Advantages of the method are the lack of structure in the device of expensive catalysts and reactants consumed as well as the possibility of on-site ozone consumption.

Improving the efficiency of purification is possible by increasing the amount of ozone supplied to the purification plant. A method of improving the performance of an ozone generator through the use of oxygen as the starting gas in place of air. The experimental verification of integrated device for cleaning exhaust gases of marine engine while working ozone generator on oxygen. It is established that during operation of the ozone generator in an installation for purification of exhaust gas using oxygen as the feed gas for the ozone provides significant advantages compared with air. The degree of purification when the oxygen ozone generation on average 4 - 5 times higher than the same cleaning device, but in the preparation of ozone from air.

Keywords: ecological safety, exhaust gas cleaning, nitrogen oxides, adsorption, ozone, slag pumice, oxygen.

For citation:

Turkin, Aleksandr V., and Vladimir A. Turkin. "Research of oxygen generation of ozone for marine engines exhaust gas cleaning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 193–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-193-200.

УДК 504.3.054; 621.43.068.4

ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОРОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. В. Туркин

ФГОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация

Повышение требований национальных стандартов и международных норм к экологической безопасности выбросов в атмосферу с судов требует снижения концентрации токсичных компонентов в отработавших газах судовых двигательных установок. Наиболее опасными компонентами отработавших газов являются оксиды азота, серы, окись углерода и несгоревшие углеводороды. При этом наибольшую техническую сложность представляет удаление оксидов азота. Предлагается способ очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием механизма их адсорбции твердым веществом. Для этого разработано и изготовлено комплексное устройство очистки отработавших газов судового двигателя. Работа устройства очистки основана на окислении в присутствии озона оксидов азота NO до диоксидов NO₂ с дальнейшей их адсорбцией на поверхности и внутри гранул адсорбента — шлаковой пемзы. Достоинствами метода являются отсутствие в конструкции устройства дорогостоящих катализаторов и расходуемых реагентов, а также возможность получения озона непосредственно на месте его потребления.

Повышение эффективности очистки возможно путем увеличения количества озона, подаваемого в установку очистки. Рассмотрен метод повышения производительности озонатора путем использования в качестве исходного газа кислорода вместо воздуха. Проведена экспериментальная проверка комплексного

устройства для очистки отработавших газов судового двигателя при работе озонатора на кислороде. Установлено, что при работе озонатора в составе установки для очистки отработавших газов использование кислорода в качестве исходного газа для получения озона обеспечивает значительные преимущества по сравнению с воздухом. Степень очистки при кислородной генерации озона в среднем в четыре-пять раз выше, чем у того же устройства очистки, но при получении озона из воздуха.

Ключевые слова: экологическая безопасность, очистка отработавших газов, оксиды азота, адсорбция, озон, шлаковая пемза, кислород.

Для цитирования:

Туркин А. В. Исследование кислородной генерации озона для очистки отработавших газов судового двигателя / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 193–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-193-200.

Введение

В настоящее время происходит последовательное ужесточение требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами судовых двигателей. При этом наибольшую сложность представляют ограничения на выбросы оксидов азота. Выбросы в воздушную среду с судов регламентируются Прил. VI «Правил предотвращения загрязнения атмосферы» Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 [1]. Приложение вступило в действие в 2005 г. и ограничило выбросы NO_x на уровне ИМО Tier 1, что для судовых малооборотных двигателей составляет 17 г/кВт·ч. С 1 января 2011 г. произошло ужесточение норм до величины 14,4 г/кВт·ч — уровень ИМО Tier 2, а с 1 января 2016 г. для двигателей новых судов норма составляет 3,4 г/кВт·ч в районах контроля выбросов оксидов азота (районы NECA — NO_x emission control areas) — уровень ИМО Tier 3. К существующим районам NECA относятся Североамериканское побережье и Карибское море. На 2021 г. запланировано создание новых районов NECA — Балтийского и Северного морей.

Действующие с 2016 г. нормы Tier 3 ужесточены на 80 % по сравнению с уровнем Tier 1, и возможности выполнения указанных требований только за счет влияния на рабочие процессы судовых двигателей внутреннего сгорания практически исчерпаны. В большинстве случаев этих мер достаточно только для достижения уровня Tier 2. Для достижения уровня ИМО Tier 3 требуются дополнительные (вторичные) природоохранные мероприятия, обеспечивающие большее снижение концентраций оксидов азота в отработавших газах. Для достижения этих норм наиболее часто предлагается метод, основанный на селективном каталитическом восстановлении (СКВ) оксидов азота до молекулярного азота [2]. Основными недостатками метода являются высокая стоимость катализаторов, изготовленных из драгоценных металлов, и необходимость наличия в портах захода реагента для СКВ-процесса (мочевины).

Очистка отработавших газов адсорбцией в присутствии озона

Перспективным способом улучшения экологических показателей является применение озонаторов для обработки воздуха или отработавших газов двигателей внутреннего сгорания [3] — [5]. Данная технология на современном этапе является недостаточно изученной и поэтому требует дополнительных научных исследований. В работе [6] автором рассматривается метод очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием их адсорбции твердым адсорбентом. Для этих целей разработано комплексное устройство очистки отработавших газов судового двигателя [7]. Принцип работы предлагаемого устройства основан на окислении в присутствии озона оксидов азота NO до диоксидов NO_2 с дальнейшей их адсорбцией на поверхности и внутри гранул адсорбента — шлаковой пемзы. Достоинствами метода являются отсутствие в конструкции устройства дорогостоящих катализаторов и расходуемых реагентов, а также возможность получения озона непосредственно на месте его потребления.

Для исследования эффективности рассматриваемого способа очистки изготовлена экспериментальная установка — комплексное устройство для очистки отработавших газов судового двигателя в односекционном исполнении. Получение озона осуществлялось наиболее доступ-

ным способом — с помощью барьерного разряда в потоке воздуха. Для этого установка очистки оборудована внешним генератором озона SOZ-YB-32G максимальной производительностью 32 г озона в час. Экспериментально подтверждена возможность практического внедрения способа очистки отработавших газов судового двигателя адсорбцией твердым адсорбентом в присутствии озона [7]. Установлено, что при исследуемых режимах работы установки эффективность очистки от NO_x составляет 6 – 37 % в зависимости от концентрации NO_x в газах и частоты вращения двигателя.

Повышение степени очистки возможно путем увеличения количества озона, подаваемого в установку очистки. Наиболее простой способ — увеличение количества озонаторов или применение озонаторов большей мощности. Недостаток такого экстенсивного подхода обусловлен тем, что при наиболее простом способе получения озона — синтезе его из воздуха — наряду с озоном из атмосферного молекулярного азота образуются оксиды азота, суммарное количество которых может достигать 10 % объема производимого озона [8]. Эти оксиды создают дополнительную нагрузку на установку очистки, снижая ее эффективность. Поэтому степень очистки увеличивается не пропорционально производительности или количеству озонаторов, а с некоторым отставанием. Так, при работе двигателя на высоких оборотах увеличение суммарной производительности озонаторов в три раза повышает степень очистки только в 1,8 раза [9].

С целью исключения влияния вторичных оксидов азота на эффективность очистки рассмотрен метод повышения производительности озонатора путем использования в качестве исходного газа кислорода вместо воздуха.

Влияние исходного газа на процесс синтеза озона

Промышленное получение озона [10] в основном осуществляется с помощью барьерного разряда, поддерживаемого высоким напряжением в потоке воздуха или кислорода (рис. 1). Синтез озона происходит в два этапа: на первом происходит диссоциация молекулярного кислорода, на втором — образование озона из атомарного кислорода. При этом не вся мощность, подаваемая в барьерный разряд, расходуется на получение озона. Большая её часть тратится на тепловые потери, которые отводятся воздушной или водяной системой охлаждения разрядного промежутка.

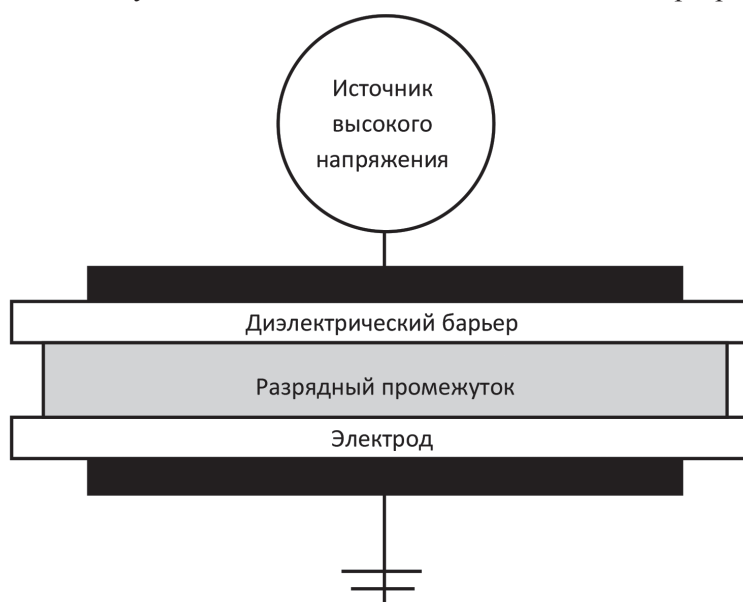


Рис. 1. Принципиальная схема синтеза озона в барьерном разряде

Доля полезной мощности, а также концентрация полученного озона в смеси существенно зависят от состава исходного газа. Значения этих величин для современных озонаторов представлены в табл. 1.

Влияние исходного газа на характеристики синтеза озона в барьерном разряде

Исходный газ	Воздух	Кислород
Доля мощности, затрачиваемой на получение озона, %	< 8	12 – 14
Концентрация озона в смеси, вес. %	1,5 – 2,5	6 – 8
Удельные энергозатраты, кВт·ч/кг O ₃	13 – 16	8 – 10*

* без учета энергозатрат на получение кислорода.

В случае работы озонатора на кислороде требуется его получение на месте использования. Для этого могут применяться установки разделения воздуха (концентраторы кислорода), основанные на свойстве избирательной адсорбции различных компонентов воздуха определенными сорбирующими материалами. Также возможно использование баллонного кислорода под давлением или испарение доставляемого на место использования жидкого кислорода, произведенного криогенным методом. Газообразный кислород в баллонах или полученный испарением содержит очень мало примесей, его чистота составляет более 99 % объема. Чистота кислорода, получаемого адсорбционным способом из воздуха, обычно не превышает 95 %, при этом основной примесью является атмосферный азот. Энергозатраты адсорбционного метода получения кислорода для синтеза 1 кг озона составляют около 5 кВт·ч.

Конструктивное исполнение генератора озона и источника высокого напряжения для его питания не зависят от используемого газа. При одинаковых расходах исходного газа и равной потребляемой мощности производительность одного и того же озонатора при использовании кислорода в 2 – 2,5 раза больше, чем при использовании воздуха. Таким образом, использование кислорода в качестве исходного газа обеспечивает значительные преимущества по сравнению с воздухом. Особенно, если озонатор используется в составе устройства для очистки отработавших газов двигательных установок.

Натурный эксперимент и его результаты

Для количественной оценки влияния исходного газа на эффективность очистки проведена экспериментальная проверка комплексного устройства для очистки отработавших газов судового двигателя при работе озонатора на кислороде.

Принципиальная схема лабораторной установки для проведения эксперимента по очистке отработавших газов представлена на рис. 2. Установка очистки состоит из корпуса, оснащенного входным и выпускным газовыми патрубками, штуцерами подачи озона, промывочной воды и дренажа загрязненной воды, внутри которого снизу-вверх расположены смесительная камера и камера очистки. В камере очистки расположены перфорированные контейнеры с гранулами пемзы. Смесь отработавших газов и озона, многократно попадая на поверхность и внутрь гранул, очищается от оксидов азота, которые адсорбируются на поверхности и внутри гранул. Подробное описание предлагаемого способа очистки, конструкции установки и ее исследование при работе озонатора на воздухе рассмотрено в работах [6], [8] и [9].

Подача кислорода на озонатор SOZ-YB-32G (производительность — до 32 г/ч) в составе устройства очистки производилась от кислородного баллона под давлением через редуктор и регулирующий вентиль.

В качестве опытного объекта для проведения натурального эксперимента, так же, как и в процессе исследования установки при работе генератора озона на воздухе, использовался рядный четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания ЗМЗ-409 мощностью 105 кВт. Отбор и анализ параметров отработавших газов осуществлялся с использованием переносного прибора газового анализа — газоанализатора TESTO 350. Прибор внесен в Государственный реестр средств измерений РФ, № 49192-12 и имеет допуск к применению в Российской Федерации. Частота вращения коленчатого вала двигателя, расход топлива и массовый расход воздуха контролировались с помощью штатной электронной системы управления двигателем.

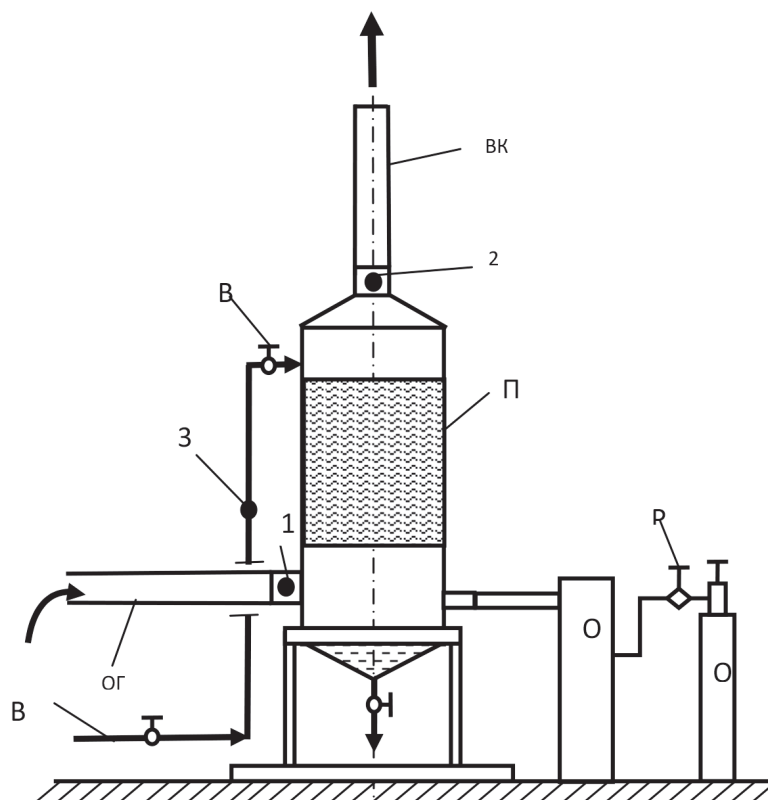


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема установки для проведения эксперимента по очистке дымовых газов: ПУ — пилотная установка; О₂ — озонатор; ОГ — отводной газопровод; ВП — водопровод; В — вентиль; ВК — выпускной коллектор; О₂ — кислородный баллон; Р — редуктор; 1 – 3 — аналитические точки

Отработавшие газы из выпускного трубопровода двигателя под избыточным давлением направляются в установку очистки через входной газовый патрубок и после очистки удаляются через выпускной коллектор в атмосферу. Точки отбора анализов показаны на рис. 2. Результаты эксперимента при кислородной работе озонатора в составе комплексного устройства для очистки отработавших газов судового двигателя приведены в табл. 2 и на рис. 3. В сравнении также представлены результаты эксперимента [7], проведенного при тех же условиях, но при работе озонатора на воздухе.

Таблица 2

Результаты эксперимента по оценке влияния исходного газа озонатора на показатели установки очистки отработавших газов судового двигателя

Номер испытания		1	2	3	4	5
Частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин		2000	2500	3000	3500	4000
Расход топлива, кг/ч		2,1	2,8	3,5	4,8	6,3
Расход воздуха, кг/ч		36,6	46,9	58,2	79	101,5
Концентрация NO _x в отработавших газах, ppm		167	248	430	808	1635
Температура отработавших газов, °С		102	127	156	189	224
Температура очищенных газов, °С		54	63	68	72	81
Исходный газ — воздух	Концентрация NO _x в очищенных газах, ppm	105	187	338	754	1535
	Степень очистки газов от NO _x , %	37,4	24,6	21,4	6,7	6,1
Исходный газ — кислород	Концентрация NO _x в очищенных газах, ppm	3	10	44	303	1147
	Степень очистки газов от NO _x , %	98,2	96,0	89,8	62,5	29,8

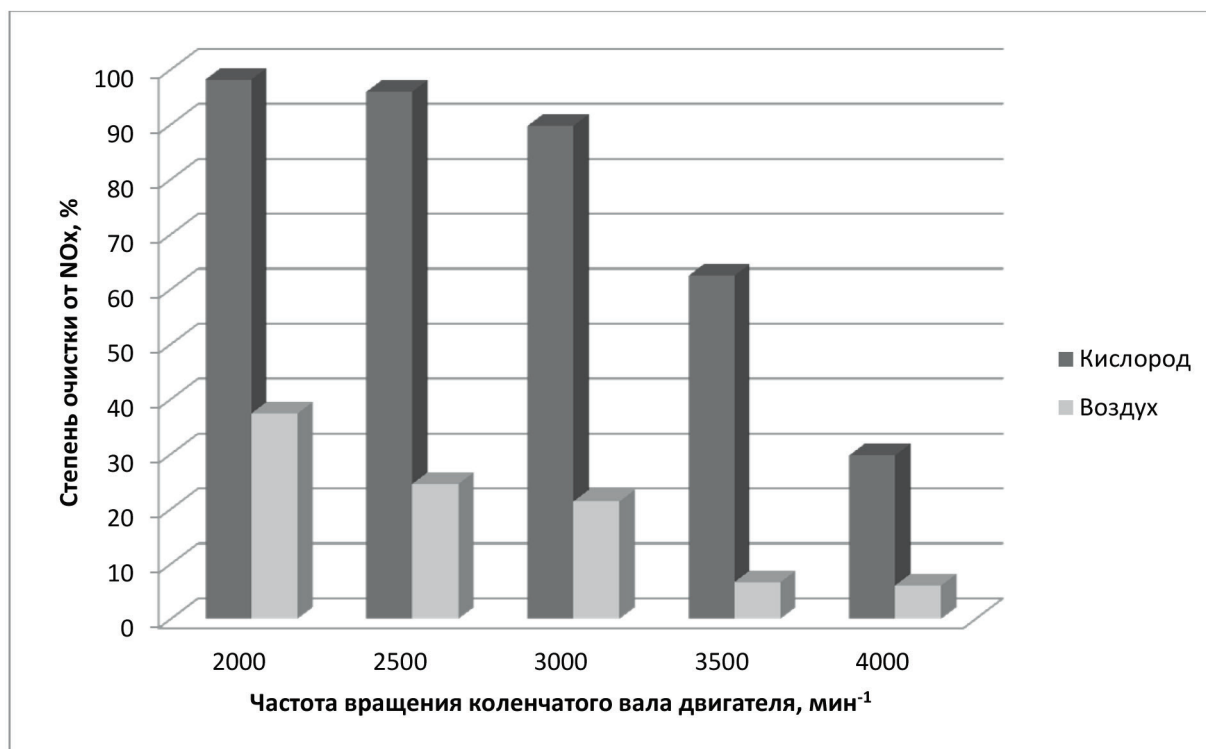


Рис. 3. Влияние исходного газа на степень очистки от NO_x

Степень очистки отработавших газов от NO_x определялась из выражения

$$e = \frac{y_n - y_k}{y_n} \cdot 100 \%,$$

где y_n — начальная концентрация NO_x в отработавших газах, ppm; y_k — конечная концентрация NO_x в отработавших газах, ppm.

Заключение

По результатам эксперимента установлено, что при работе озонатора в составе установки для очистки отработавших газов использование кислорода в качестве исходного газа для получения озона обеспечивает значительные преимущества по сравнению с воздухом. Степень очистки при кислородной генерации озона в среднем в четыре-пять раз выше, чем у того же устройства очистки, но при получении озона из воздуха.

Для получения кислорода на месте использования могут использоваться адсорбционные установки разделения воздуха — концентраторы кислорода. Некоторые производители озонаторного оборудования комплектуют озонаторы встроенными концентраторами кислорода, что обеспечивает технологическую простоту кислородной генерации озона. При этом суммарные затраты электроэнергии для производства 1 кг озона из кислорода меньше, чем при получении озона из воздуха.

При синтезе озона из воздуха, наряду с озоном, образуются оксиды азота (до 10 об %). В озоне, синтезированном из кислорода, оксиды азота отсутствуют, что позволяет при необходимости полностью удалить NO_x из отработавших газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — Кн. III, пересм. изд. — 336 с.

2. *Иванченко А. А.* Техника и технология нейтрализации в отработавших газах СЭУ: учеб. пособие / А. А. Иванченко. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2012. — 111 с.
3. *Кличханов Ф. А.* Исследование озонатора воздуха на двигателе ВАЗ 2123 14 / Ф. А. Кличханов, В. В. Ермилов, А. В. Торба // Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы технических наук». — Уфа: АЭТЕРНА, 2015. — С. 26–28.
4. *Алексеев В. А.* Развитие областей применения озонаторов в промышленности и транспорте / В. А. Алексеев, В. С. Артемьев, В. Г. Григорьев // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. тр. 4-й междунар. науч.-практ. конф. (30 июня 2014 г.). — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. — С. 13–16.
5. *Кормилицын В. И.* Исследование очистки дымовых газов котлов от оксидов азота при сжигании природного газа / В. И. Кормилицын, В. С. Ежов // Теплоэнергетика. — 2013. — № 2. — С. 71. DOI: 10.1134/S0040363612080073.
6. *Туркин А. В.* Очистка выхлопных газов судового двигателя адсорбцией твердым веществом в присутствии озона / А. В. Туркин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 129–130.
7. *Туркин А. В.* Экспериментальное исследование эффективности очистки выхлопных газов судового двигателя адсорбцией твердым веществом в присутствии озона / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Транспортное дело России. — 2014. — № 4. — С. 187–190.
8. *Самойлович В. Г.* Аргументы «за» и «против» использования воздуха или кислорода для промышленного производства озона / В. Г. Самойлович, Л. Ю. Абрамович // Первая всероссийская конференция «Озон и другие экологически чистые окислители»: материалы конф. — М., 2005. — С. 144–154.
9. *Туркин А. В.* Экспериментальное исследование эффективности многосекционного комплексного устройства очистки выхлопных газов судового двигателя / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 4. — С. 79–85.
10. *Лунин В. В.* Способы получения озона и современные конструкции озонаторов / В. В. Лунин, Н. В. Карягин, С. Н. Ткаченко, В. Г. Самойлович. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 216 с.

REFERENCES

1. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL–73/78)*. SPb.: ZAO “TsNI-IMF”, 2012. Book III, revised edition.
2. *Ivanchenko, A. A.* *Tekhnika i tekhnologiya neutralizatsii v otrabotavshikh gazakh SEU: uchebnoe posobie*. SPb.: SPGUVK, 2012.
3. *Klichkhanov, F. A., V. V. Ermilov, and A. V. Torba.* “Issledovanie ozonatora vozdukha na dvigatele VAZ 2123 14.” *Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy tekhnicheskikh nauk»*. Ufa: AETERNA, 2015: 26–28.
4. *Alekseev, V. A., V. S. Artem'ev, and V. G. Grigor'ev.* “Razvitie oblastei primeneniya ozonatorov v promyshlennosti i transporte.” *Tekhnika i tekhnologii: Puti innova-tсионного razvitiya: sbornik nauchnykh trudov 4-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (30 iyunya 2014 g.)*. Kursk: ZAO “Universitetskaya kniga”, 2014: 13–16.
5. *Kormilitsyn, V. I., and V. S. Ezhov.* “Studying the removal of nitrogen oxides from boiler flue gases in firing natural gas.” *Thermal Engineering* 60.2 (2013): 147–152. DOI: 10.1134/S0040601512080071.
6. *Turkin, A.* “The exhaust gas purifying marine engines adsorption of solids in the presence of ozone.” *Transport business of Russia* 6 (2013): 129–130.
7. *Turkin, A., and V. Turkin.* “Experimental research of marine engines exhaust gas cleaning by solids adsorption in the presence of ozone effectiveness.” *Transport business of Russia* 4 (2014): 187–190.
8. *Samoilovich, V. G., and L. Yu. Abramovich.* “Argumenty «za» i «protiv» ispol'zovaniya vozdukha ili kisloroda dlya promyshlennogo proizvodstva ozona.” *Pervaya vserossiiskaya konferentsiya «Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli»: materialy konferentsii*. M., 2005: 144–154.
9. *Turkin, A. V., and V. A. Turkin.* “Experimental study of efficiency of multisection integrated device for purification of marine engine exhaust gases.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2015): 79–85.
10. *Lunin, V. V., N. V. Karyagin, S. N. Tkachenko, and V. G. Samoilovich.* *Sposoby polucheniya ozona i sovremennye konstruksii ozonatorov*. M.: MAKS Press, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Туркин Александр Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация, Новороссийск,
пр-т Ленина 93
e-mail: alekstur@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Turkin, Aleksandr V. —
PhD, associate professor
Admiral Ushakov Maritime
State University
93 Lenin's Avenue, Novorossisk, 353918,
Russian Federation
e-mail: alekstur@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 26 декабря 2016 г.
Received: December 26, 2016.*