

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-115-121

WAYS TO REDUCE THE AMOUNT OF PARTICULATE MATTER IN THE EXHAUST GASES OF MARINE DIESEL ENGINES IN SHIP POWER PLANTS

N. N. Gorlova, G. V. Medvedev, O. G. Kuzmina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

Burning the liquid fuel in a marine internal combustion engine, which is part of a marine power plant, entails the formation of particulate matter of carbon origin (soot). Particulate matter emitted into the environment cause a significant negative impact on all components of the environment and harm to human health. The use of catalytic purification of exhaust gases using porous permeable catalytic materials can reduce the amount of emitted particles and reduce the burden on the environment. The use of self-propagating high-temperature synthesis in the preparation of porous permeable catalytic materials allows the formation of material properties that provide an acceptable degree of purification of exhaust gases of marine diesel engines from solid particles. The decrease in the concentration of solid particles as a result of the use of catalytic treatment is carried out as a result of the fact that solid particles in the polluted gas passing through the porous structure of used material are retained in the pores and burn out at high temperature. Ensuring high-quality purification of exhaust gas from solid particles depends on a certain pore size, porosity, tortuosity and other properties of the catalytic material. In order to determine the qualitative and quantitative composition of the porous permeable catalytic material used in the purification system, the studies on ilmenite ore-based samples are conducted. Such material, due to the use of ilmenite grinding ore as the basis of the charge, allows us to reduce the cost of catalytic material in comparison with materials that use refined components. The effect of changes in pore diameter, porosity of the catalytic material and the amount of ilmenite ore grinding in the composition of the mixture on the degree of purification of exhaust gases from solid particles is studied. The results are obtained for the first time and described by the least squares method. The results of the study allowed us to determine an acceptable amount of ilmenite ore in the composition of the catalytic material, which permit to reduce the concentration of solid particles in the exhaust gases of marine diesel engines.

Keywords: catalysts, catalytic neutralization, quality of treatment, neutralization, ilmenite ore, vessel, particulate matter, power plant.

For citation:

Gorlova, Nina N., Gennady V. Medvedev, and Olga G. Kuzmina. "Ways to reduce the amount of particulate matter in the exhaust gases of marine diesel engines in ship power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 115–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-115-121.

УДК 629.5.03:502.1

ПУТИ СНИЖЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ В СОСТАВЕ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Н. Н. Горлова, Г. В. Медведев, О. Г. Кузьмина

Алтайский государственный технический университет им И. И. Ползунова,
Барнаул, Российская Федерация

Отмечается, что сжигание жидкого топлива в судовом двигателе внутреннего сгорания, входящего в состав судовой энергетической установки, влечет за собой образование твердых частиц углеродного происхождения (сажа). Выбрасываемые твердые частицы в окружающую среду наносят существенное негативное влияние на все составляющие окружающей среды и вред здоровью человека. Рассмотрено использование каталитической очистки отработавших газов с применением пористых проницаемых каталитических материалов, позволяющее сократить количество выбрасываемых твердых частиц и снизить

нагрузку на окружающую среду. Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при получении пористых проницаемых каталитических материалов позволяет формировать такие свойства материала, которые обеспечивают приемлемую степень очистки отработавших газов судовых дизелей от твердых частиц. Снижение концентрации твердых частиц в результате использования каталитической очистки осуществляется в результате того, что твердые частицы в загрязненном газе, проходя через пористую структуру используемого материала, задерживаются в порах и сгорают при высокой температуре. Обеспечение качественной очистки отработавшего газа от твердых частиц зависит от определенного размера пор, пористости, извилистости и других свойств каталитического материала. С целью определения качественного и количественного состава используемого в системе очистки пористого проницаемого каталитического материала проведены исследования на образцах на основе руды ильменит. Такой материал за счет использования в основе шихты размола руды ильменит позволяет сократить затраты на каталитический материал по сравнению с материалами, в составе которых используются очищенные компоненты. Изучено влияние изменения диаметра пор, пористости каталитического материала и количества размола руды ильменит в составе шихты на степень очистки отработавших газов от твердых частиц. Полученные результаты были получены впервые и описаны методом наименьших квадратов. Результаты исследования позволили определить приемлемое количество руды ильменит в составе каталитического материала, позволяющее снизить концентрацию твердых частиц в отработавших газах судовых дизелей.

Ключевые слова: катализаторы, каталитическая нейтрализация, качество очистки, нейтрализация, руда ильменит, судно, твердые частицы, энергетическая установка.

Для цитирования:

Горлова Н. Н. Пути снижения количества образующихся твердых частиц в отработавших газах судовых дизелей в составе судовых энергетических установок / Н. Н. Горлова, Г. В. Медведев, О. Г. Кузьмина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 115–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-115-121.

Введение (Introduction)

Течение преобразования энергии топлива в работу в цилиндре дизеля сопутствует образованию отработавших газов, которые представляют собой смесь ингредиентов в газовой, паровой и твердой фазах. Всего в отработавших газах судовых энергетических установок (СЭУ) с помощью всевозможных приборов и методов анализа обнаружено около 1000 компонентов [1], [2]. К токсичным веществам, образующимся в результате сжигания жидкого топлива, относятся: оксид азота (NO_x), образующийся при температуре более 1500 °С, становится при этом активным с точки зрения химии газом; оксиды серы, являющиеся продуктами окисления меркаптановой серы жидкого топлива; оксиды углерода, являющиеся продуктами сгорания углеводородного топлива; углеводороды и твердые частицы, являющиеся продуктами неполного сгорания жидкого топлива.

Особую опасность представляют твердые частицы в составе отработавших газов судовых дизелей. Высокий уровень содержания твердых частиц может привести к развитию рака легких. Так, твердые частицы размером менее 10 мкм (PM₁₀) в 7 раз тоньше человеческого волоса при вдыхании обходят естественную защиту органов дыхания, проникая в легкие.

Выбрасываемые в большом количестве отработавшие газы оказывают серьезное отрицательное влияние не только на человека, но и на все составляющие окружающей среды [3]–[5]. Одной из важных проблем представляется определение способов и материалов, позволяющих снизить выбросы продуктов сгорания жидкого топлива (твердых частиц) до допустимого предела.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Наиболее результативным методом сокращения концентрации выбрасываемых твердых частиц является каталитическая очистка с применением пористых проницаемых СВС — каталитических материалов [6], [7]. В трудах В. Н. Красова, В. В. Евстигнеева, О. А. Лебедевой, Г. Ю. Филиппова, В. И. Пролубникова, А. Л. Новоселова описано использование каталитических материалов на основе окалина стали, полученных с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Достаточно подробно изучен каталитический материал на основе отходов металлообработки — окалины легированной стали. Недостатком такого каталитического материала представляется содержание весомого количества (21,07...21,39 %) масс дорогих ингредиентов (хрома, алюминия, никеля, иридия и родия), которые вносятся в очищенном виде для осуществления СВС [8]. Это, в свою очередь, является фактором повышения стоимости получаемых изделий и, как следствие, высокой стоимости очистки отработавших газов от вредных веществ. Решить проблему исключением хрома, алюминия, никеля из состава шихты невозможно вследствие специфики прохождения СВС, что приведет к неустойчивому горению и ухудшению свойств получаемого каталитического материала. В связи с этим изучена возможность использования такого состава шихты, который позволит гарантировать необходимые качества получаемого каталитического материала в результате эффективного протекания СВС [9].

В работе [10] рассмотрена возможность получения пористого проницаемого СВС — каталитического материала с замещением дорогих ингредиентов в шихте размолом руд, содержащих необходимые элементы для обеспечения СВ-синтеза и обеспечивающих получение материала с необходимыми свойствами и характеристиками каталитического материала.

В качестве компонента, заменяющего дорогие ингредиенты в составе шихты пористого проницаемого СВС-каталитического материала, предложено применение руды *ильменита* [11], представляющей собой титанистый железняк, имеющий в своем составе FeTiO_3 , SiO_2 , Al и другие элементы, на основе которых возможно формирование скелетной структуры пористого проницаемого каталитического материала.

Результаты (Results)

Определено, что увеличение количества в шихте размола руды ильменита 1–5-го состава способствует изменению характеристик и качества полученного каталитического материала, приведенных в таблице, где представлены данные по основным составам шихты, без указания технологических допусков. Вычисление узловых точек полигона распределения показателей характеристик каталитического материала осуществлялось *методом экстраполяции*.

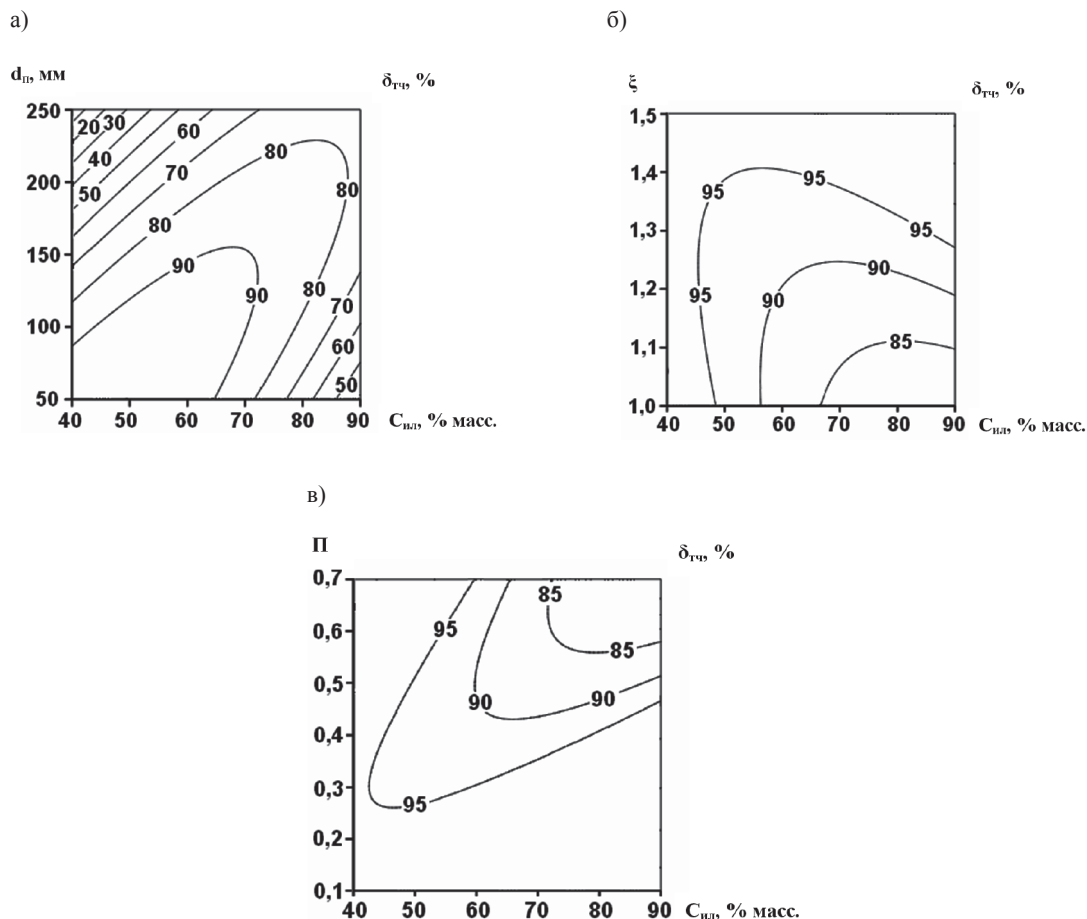
Очистка отработавших газов от твердых частиц с использованием каталитической нейтрализации реализуется во многом за счет прохождения отработавших газов сквозь пористую проницаемую текстуру каталитического материала, а также в результате догорания. Поэтому применяемые при каталитической очистке материалы должны иметь подходящие физические характеристики: средний приведенный диаметр пор, извилистость и пористость [12]. В связи с этим проведены опытные исследования по изучению связи степени очистки от твердых частиц ($\delta_{\text{тч}}$) отработавших газов СЭУ от диаметра пор ($d_{\text{п}}$), извилистости (ξ), пористости (Π) и содержания ключевого компонента — руды ильменит ($C_{\text{ил}}$). Оценка содержания твердых частиц в отработавших газах (дымности) проводилась фильтрационным способом по ГОСТу Р 51250–99 с последующим вычислением степени очистки отработавших газов от твердых частиц.

Свойства и характеристики каталитического материала на основе руды ильменит

Показатели	Варианты состава шихты				
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5
Ильменит (руда), %, по массе	71,69	66,86	64,35	61,40	55,42
Приведенный диаметр пор (средний), мкм	164	158	149	139	125
Извилистость пор	1,19	1,21	1,24	1,28	1,32
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	137	126	116	108	100
Пористость	0,48	0,475	0,43	0,38	0,34
Прочность при сжатии, МПа	13,0	11,3	10,1	8,3	7,1
Прочность при изгибе, МПа	3,3	3,0	2,9	2,8	2,6
Потеря массы в смеси кислот, %	11,0	11,1	11,9	12,6	13,0

Обсуждение (Discussion)

Результаты изучения связи степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ (ЗД6 (6Ч 15/18) на номинальном режиме) от среднего приведенного диаметра пор и доли руды ильменит в шихте для получения каталитического СВС-материала представлены на рисунке *a*.



Зависимость степени очистки от твердых частиц ($\delta_{т.ч}$) отработавших газов СЭУ:

- a* — от среднего приведенного диаметра пор $d_{п}$ и доли руды ильменит $C_{ил}$ в шихте для получения пористого каталитического материала;
- б* — от извилистости пор ξ и доли руды ильменит $C_{ил}$ для получения СВС-материала;
- в* — от пористости (Π) и доли руды ильменит ($C_{ил}$) для получения пористого каталитического материала

Поскольку ранее в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от твердых частиц отработавших газов дизеля СЭУ от среднего приведенного диаметра пор и доли руды ильменит в составе каталитического материала, они представляются принципиально новыми. Выявленные зависимости степени очистки $\delta_{т.ч}$, %, были описаны методом наименьших квадратов следующим выражением со степенью достоверности аппроксимации 0,98:

$$\delta_{т.ч} = 55,522 + 2,550C_{ил} - 0,553d_{п} - 0,033963C_{ил}^2 - \\ - 0,001519d_{п}^2 + 0,013309C_{ил}d_{п}.$$

О наличии контакта отработавших газов с поверхностью каталитического материала косвенно свидетельствует извилистость пор. Проведенные в работе исследования (см. рисунок *б*) позволили выявить степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ от извилистости пор и доли руды ильменит для получения пористого СВС-материала.

Поскольку ранее в научно-технической литературе не были приведены зависимости степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ от извилистости пор и доли руды ильменит

в шихте каталитического материала, они представляются принципиально новыми. Выявленные зависимости степени очистки $\delta_{т.ч}$, %, были описаны методом наименьших квадратов следующим выражением со степенью достоверности аппроксимации 0,96:

$$\delta_{т.ч} = 269,092 - 2,918C_{ил} - 158,426\xi + 0,008469C_{ил}^2 + \\ + 38,330770\xi^2 + 1,393368C_{ил}\xi.$$

Свойства и характеристики каталитического материала во многом зависят от его пористости. В ходе проведенных опытных исследований определено влияние доли руды ильменит в шихте на пористость каталитического материала и обеспечение наилучшей степени очистки отработавших газов СЭУ от твердых частиц (см. рисунок в).

Ввиду того, что в научно-технической литературе не были описаны зависимости степени очистки от твердых частиц отработавших газов СЭУ от пористости и доли руды ильменит в составе для получения пористого проницаемого СВС-каталитического материала, они являются принципиально новыми. Выявленные зависимости степени очистки $\delta_{т.ч}$, %, были описаны методом наименьших квадратов следующим выражением со степенью достоверности аппроксимации 0,96:

$$\delta_{т.ч} = 101,487 - 0,452C_{ил} + 44,586П + 0,011458C_{ил}^2 + \\ + 103,218410П^2 - 2,459753C_{ил}П.$$

Заключение (Conclusion)

Из приведенных зависимостей на рисунках а–в видно, что изменение доли руды ильменит в составе шихты в интервале 71,69...55,42 % по массе приводит к уменьшению среднего приведенного диаметра пор каталитического материала 164–125 мкм, увеличению извилистости от 1,19 до 1,32 и сокращению пористости в интервале 0,48–0,34 и обеспечивает степень очистки от твердых частиц в интервале 88,5...91,5%. Наиболее приемлемым является состав шихты с долей руды ильменит на уровне 66,86 % по массе, гарантирующий $\delta_{т.ч} = 89,5$ % при $d_{п} = 158$ мкм, $\xi = 1,21$, $П = 0,475$.

Приемлемая доля руды ильменит в составе шихты для синтеза пористого проницаемого СВС-каталитического материала ($C_{ил} = 66,86$ % по массе) обеспечивает приемлемые свойства и характеристики используемого материала, что позволят использовать пористый проницаемый материал в качестве каталитического в системах очистки отработавших газов СЭУ от других вредных веществ.

В результате проведенных опытных изысканий была выявлена зависимость степени очистки отработавших газов СЭУ от твердых частиц с использованием каталитического материала на основе руды ильменит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормирование вредных выбросов судовыми двигателями. Состояние и перспективы. (материалы конгресса СИМАС–2016) // Двигателестроение. — 2018. — № 4 (274). — С. 40–56.
2. Живлюк Г. Е. Анализ возможностей снижения выбросов вредных веществ, эксплуатируемых СДЭУ / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2015. — № 1 (259). — С. 30–34.
3. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — Кн. III, пересмотр. изд. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — 336 с.
4. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
5. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

6. Панчишный В. И. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей / В. И. Панчишный // Двигателестроение. — 2005. — № 2 (220). — С. 35–42.
7. Медведев Г. В. Металлокерамические фильтры очистки токсичных газов: водный транспорт: монография / Г. В. Медведев; под ред. В. П. Горелова. — М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. — 247 с. DOI: 10.23681/459342.
8. Новоселов А. Л. Материалы, используемые для очистки отработавших газов дизелей с целью снижения нагрузки на окружающую среду / А. Л. Новоселов, Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова, Д. С. Печеникова, Н. Н. Горлова // 7-е Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. — М.: МАДИ, 2015. — С. 147–148.
9. Новосёлова Т. В. Получение пористых металлокерамических материалов с использованием руд полиметаллов / Т. В. Новосёлова, Н. П. Тубалов, А. В. Маецкий // 21 век: фундаментальная наука и технологии: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. — Create Space, 2017. — С. 150–152.
10. Горлова Н. Н. Зависимость степени очистки отработавших газов судовых дизелей от физических характеристик и коррозионных свойств пористых проницаемых каталитических материалов / Н. Н. Горлова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2018. — № 2. — С. 94–97.
11. Пат. 2615672 Российская Федерация, МПК В22F 3/23, С22С 1/05, С22С 29/12, С04В 38/00. Шихта с рудой ильменита для получения пористого проницаемого каталитического материала / А. Е. Бакланов, Н. Н. Горлова, Г. В. Медведев, А. А. Ситников; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). — № 2015150641; заявл. 25.11.2015; опубл. 06.04.2017.
12. Камышов Ю. Н. Система очистки отработавших газов дизелей судовых энергетических установок на основе пористых проницаемых коррозионностойких материалов / Ю. Н. Камышов, Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S2. — С. 187–197. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-187-197.

REFERENCES

1. “Normirovanie vrednykh vybrosov sudovymi dvigatelyami. Sostoyanie i perspektivy. (materialy kongressa CIMAC-2016).” *Dvigatelistroyeniye* 4(274) (2018): 40–56.
2. Jivlyuk, G. E., and A. P. Petrov. “Reserves of Improvement in Emission Performance of Marine Diesel Engines.” *Dvigatelistroyeniye* 1(259) (2015): 30–34.
3. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)*. SPb.: ZAO «TsNI-IMF», 2012.
4. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
5. Ivanchenko, A. A., A.P. Petrov, and G.E. Zhivlyuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112
6. Panchishnyi, V. I. “Neutralisation of Nitrogen Oxides in Engine Exhaust Gases.” *Dvigatelistroyeniye* 2(220) (2005): 35–42.
7. Medvedev, G. V. *Metallokeramicheskie fil'try ochistki toksichnykh gazov: vodnyi transport: monografiya*. Edited by V.P. Gorelov. M.; Berlin: Direkt-Media, 2017. DOI: 10.23681/459342
8. Novoselov A. L., G. V. Medvedev, N.N. Gorlova, D.S. Pechennikova, and N.N. Gorlova. “Materials used for cleaning exhaust gases of diesel engines in order to reduce the load on the environment.” *7-e Lukaninskie chteniya. Reshenie energo-ekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse: tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchn.-tekhnich. konf.* M.: MADI, 2015. 147–148.
9. Novoselova, T. V., N. P. Tubalov, and A. V. Maetskii. “Poluchenie poristyykh metallokeramicheskikh materialov s ispol'zovaniem rud polimetallrov.” *21 vek: fundamental'naya nauka i tekhnologii: materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. CreateSpace, 2017. 150–152.
10. Gorlova, Nina N. “Dependence of the marine diesels’ exhaust gases purification efficiency from physical characteristics and corrosion properties of porous permeable catalytic materials.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 2 (2018): 94–97.
11. Baklanov, A. E., N. N. Gorlova, G. V. Medvedev, and A. A. Sitnikov. RU 2615672, IPC B 22F 3/23, C 22C

1/05, С 22С 29/12, С 04В 38/00. Shixta s rudoj il'menita dlya polucheniya poristogo proniczaemogo kataliticheskogo materiala. Russian Federation, assignee. Publ. 6 April 2017.

12. Kamyshov, Yury N., Gennady V. Medvedev, and Nina N. Gorlova. "Purification of marine diesel exhaust gases by means of porous permeable corrosion-resistant materials." *Transactions of the Krylov State Research Centre* S2 (2019): 187–197. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-187-197.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горлова Нина Николаевна —

кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, г. Барнаул,
пр. Ленина, 46
e-mail: Gnn.09@mail.ru

Медведев Геннадий Валериевич —

кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, г. Барнаул,
пр. Ленина, 46
e-mail: Genatswaly@mail.ru

Кузьмина Ольга Григорьевна —

кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, г. Барнаул,
пр. Ленина, 46
e-mail: Kuzmina_leya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorlova, Nina N. —

PhD, associate professor
Polzunov Altai State
Technical University
46 Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Gnn.09@mail.ru

Medvedev, Gennady V. —

PhD, associate professor
Polzunov Altai State
Technical University
46 Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Genatswaly@mail.ru

Kuzmina, Olga G. —

PhD, associate professor
Polzunov Altai State
Technical University
46 Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Kuzmina_leya@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2019 г.

Received: December 29, 2019.