



УДК 629.33:621.43

О влиянии топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей

А. Л. Пенкин¹, Е. А. Руппель¹, А. А. Воробьев², А. А. Соболев², И. Ю. Новосельский²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Пенкин А. Л., Руппель Е. А., Воробьев А. А., Соболев А. А., Новосельский И. Ю. О влиянии топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 1027–1033. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1027-1033

Аннотация

Цель: Комплексно рассмотреть влияние биоэтанола как добавки к бензину на эксплуатационные свойства транспортных двигателей с точки зрения различий в физико-химических свойствах и технологии получения, учитывая не только преимущества, но и недостатки. Более подробно оценить испаряемость бензино-этанольных смесей при различном содержании в них этанола и воды и ее влияние на пусковые свойства. **Методы:** Сопоставление имеющихся данных в нормативной и справочной литературе, а также в научных публикациях. Проведение эксперимента по предусмотренной стандартом для бензина методике по измерению давления насыщенных паров бензино-этанольных смесей различного состава. **Результаты:** Из собранных данных выделены имеющие существенное значение для эксплуатации транспортных двигателей параметры бензино-этанольных смесей. Выявлена необходимость детальной оценки влияния состава таких смесей на конструкционные материалы транспортных двигателей. Получены данные по испаряемости смесей в широком температурном диапазоне, имитирующем реальные условия эксплуатации. Они не выявили существенного ухудшения пусковых свойств. Отмечено видимое нарушение фазовой стабильности смесей, содержащих более 7,5 % воды. **Практическая значимость:** Проведенная оценка испаряемости и пусковых свойств бензино-этанольных смесей различного состава позволяет судить об их удовлетворительном уровне по сравнению с бензином для смесей с 5%-м содержанием этанола и относительно удовлетворительном для смесей с 85%-м содержанием этанола. Параметры предусмотренной стандартом методики впервые расширены относительно обычно контролируемой при измерении давления насыщенных паров температуры до возможно широких пределов, позволяющих получить более полную картину.

Ключевые слова: Топливный биоэтанол, бензин, испаряемость, давление насыщенных паров, пусковые свойства, транспортные двигатели.

Денатурированный топливный биоэтанол, или этиловый спирт, используется в качестве добавки к бензину. Бензино-этанольные смеси с содержанием этанола более 5 % рассматриваются уже как альтер-

нативное топливо. Основным преимуществом биоэтанола является повышенная по сравнению с бензином детонационная стойкость. Ввиду наличия в его составе кислорода его относят в ряд оксигенатов,

Таблица. 1. Некоторые физико-химические свойства бензина и этанола

Свойство	Ед. изм.	Бензин	Биоэтанол
Плотность при 20 °С	кг/м ³	720–780	790–820
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	44,0	26,7
Температура кипения	°С	33–205	78
Температура вспышки	°С	–27	13
Пределы воспламенения	% об.	1–6	4–17
Октановое число по исследоват. методу	Ед.	92–98	108–120
Давление насыщенных паров при 37,8 °С	кПа	45–100	17
Стехиометрический состав	—	1:14,7	1:9

присадок, повышающих октановое число бензина и улучшающих полноту сгорания топливоздуш- ной смеси. Тем самым повышаются очищающие свойства топлива по отношению к деталям цилин- дропоршневой группы, а также улучшается эколо- гичность за счет снижения на 10–20 % содержания контролируемых вредных веществ в отработавших газах двигателя [1]. Сравнение характеристик бен- зина и биоэтанола представлено в табл. 1.

Поскольку этанол производится из возобновля- емых ресурсов пищевого и непищевого происхож- дения, то он способствует экономии ископаемых нефтепродуктов, а по энергоэффективности пре- восходит их, так как выделяемый при его произ- водстве и сжигании в двигателе углекислый газ в равной, а возможно, и в большей мере погло- щается на этапе произрастания сырья, из кото- рого он изготавливается [2, 3]. Также его досто- инством является меньшая удельная стоимость производства по сравнению с топливом из невоз- обновляемых ресурсов, если не считать распро- страняющихся на него акцизов на алкогольную продукцию, что делает его конкурентоспособным энергоносителем [4].

По ГОСТ 33872—2016 топливный биоэтанол может быть абсолютным, содержащим не более 1,0 % масс. воды, или обводненным, содер- жащим не более 7,5 % масс. воды. По ГОСТ Р 51105—2020 допускается содержание в бензине этанола не более 5 % об. Существует также ГОСТ Р 54290—2010, предусматривающий топливную

смесь, содержащую от 75 % об. до 85 % об. топлив- ного этанола и от 15 % об. до 25 % об. бензина.

Технология производства топливного био- этанола практически идентична технологии производства собственно этанола, за исключе- нием добавления денатурирующих добавок, или денатурантов, делающих его непригодным для использования в качестве напитка, и абсолютиро- вания, или обезвоживания. Она включает приго- товление бражки из сырья и брагоректификацию в спирт. Технологическая блок-схема производ- ства биоэтанола представлена на рис. 1.

Для производства биоэтанола используется два вида сырья: крахмалистое и целлюлозное. Первое содержит достаточно крахмала, чтобы избежать затратного процесса предобработки и ферментативного гидролиза целлюлозы и прак- тически сразу перейти к брожению глюкозы. Это, как правило, сахарный тростник, используемый в Бразилии, и кукуруза, используемая в США. В России таким сырьем могут быть пшеница, све- клочичный жом, а также отходы, излишки и низ- шие сорта прочих пищевых культур. Так как этот вид сырья логистически доступен и требует наи- меньших затрат на единицу готовой продукции, он наиболее распространен. Однако поскольку это сырье является пищевым или силосным, то производство из него топливного биоэтанола соз- дает конкуренцию продуктам питания и корма и в результате ведет к повышению цен на продо- вольствие, что в текущих условиях нехватки еды

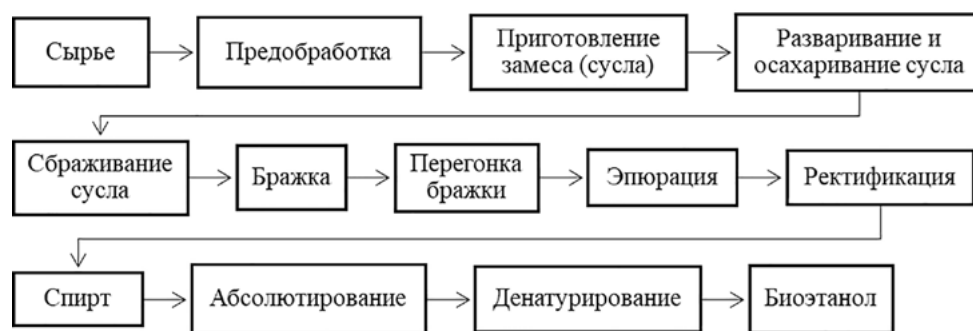


Рис. 1. Процессуальная блок-схема производства биоэтанола

Таблица. 2. Содержание воды в бензине и этаноле, % масс.

№ опыта	Чистый бензин	Этанол (1,0 % воды)	Этанол (6,8 % воды)	Этанол (14,8 % воды)
1	0,0152	0,9241	6,7312	14,9015
2	0,0164	0,9687	6,7773	14,8258
3	0,0190	0,9592	6,7397	14,7505
Среднее	0,0169	0,9507	6,7494	14,8259
СКО, %	11,28	2,47	0,36	0,51

в некоторых регионах мира вызывает морально-этическую критику.

С этой точки зрения наиболее перспективным сырьем для производства биоэтанола являются различные органические отходы не только агропромышленного, но и целлюлозно-бумажного комплекса, водоросли и прочая биомасса, на основе которой производится топливный этанол второго и третьего поколений. Это сырье обладает также лучшей энергоэффективностью [5].

Широкому производству и применению биоэтанола в России препятствует отсутствие достаточного рынка сбыта, необходимой государственной поддержки, а также технические сложности, связанные с неразвитой инфраструктурой и системой технической эксплуатации транспортных двигателей на топливных смесях с ним. Эти сложности обусловлены прежде всего наличием кислорода в составе биоэтанола, как имеющего собственную гидроксильную группу, так и содержащего растворенную воду. Этот фактор, наряду с повышенной гигроскопичностью и низкими смазывающими свойствами, вызывает коррозионный износ и приводит к сокращению ресурса элементов автозапра-

вочной инфраструктуры и конструкционных материалов транспортных двигателей [6].

Анализ научной литературы по данному вопросу показал, что имеются лабораторные исследования, которые демонстрируют изменение размеров и массы, а также предела прочности и твердости (по Шору) изделий в результате продолжительного воздействия бензино-этанольных смесей. Показано, что наиболее подверженными изменению размеров и массы являются детали из эластомеров, далее пластиков и менее всего — из металлов. Детали из металлов подвержены, помимо этого, различным видам коррозии, особенно в местах контакта друг с другом [7, 8]. Однако нет данных о совместимости бензино-этанольных смесей с конструкционными материалами транспортных двигателей в реальных условиях эксплуатации, для чего необходимы не только лабораторные, но и стендовые и дорожные ресурсные испытания.

Помимо влияния на материалы, наличие биоэтанола в смеси с бензином негативно влияет на испаряемость топливовоздушной смеси, ухудшая пусковые свойства, что обусловлено низкой собственной испаряемостью этанола, зависящей

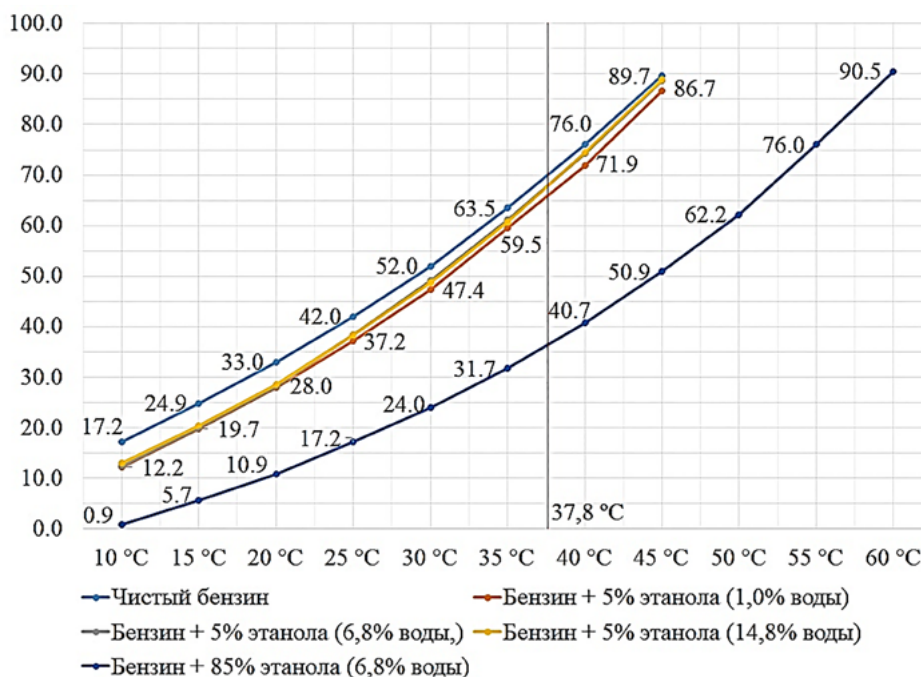


Рис. 2. Скорректированное на температуру окружающего воздуха и атмосферное давление ДНП смесей бензина с этанолом, кПа

также от содержания воды в нем [9]. Чтобы оценить это влияние, была проведена серия опытов с измерением давления насыщенных паров (ДНП) по методу Рейда для бензинов по ГОСТ 31874—2012. Были взяты смеси бензина АИ-95-К5 с фактическим паспортным значением ДНП 69,5 кПа (класс испаряемости А, В) и этанола технического. Вариация состава смесей составила три вида условного Е5 (бензин с содержанием 5 % об. этанола), различающихся по содержанию воды в этаноле: в среднем 1, 6,8 и 14,8 % соответственно. Этанол с содержанием воды 1 % был получен абсолютированием 96%-го спирта адсорбцией влаги на свежeproкаленных молекулярных ситах 3Å, с иным содержанием — разбавлением спирта дистиллированной водой в нужных пропорциях. Кроме того, была приготовлена условная смесь Е85 с содержанием воды в спирте 6,8 %. В каждом варианте смеси было проведено по три опыта в разных бомбах Рейда, и взято среднее значение. Среднее квадратичное отклонение (СКО) всей серии опытов составило 2,46 %. Приготовление условных смесей Е5 и Е85 производилось по ГОСТ 33132—

2014, по объему, с перемешиванием с помощью магнитной мешалки. Контроль содержания воды производился по методу Карла Фишера по ГОСТ Р 54281—2022 с использованием Титратора Эксперт-007М. Результаты измерения содержания воды в исходном бензине и подготовленных марках этанола представлены в табл. 2.

Ввиду повышенного внимания к фазовой стабильности (склонности к расслаиваемости) бензино-этанольных смесей, фактически являющихся эмульсиями условно нерастворимых фаз вода — спирт и спирт — бензин, стоит отметить, что этанол с содержанием воды 1 и 6,8 % растворялся в бензине полностью, без видимого разделения фаз, в смеси же содержанием воды 14,8 % наблюдалось выделение фазы этанол — вода на дне стакана [10].

Анализ результатов опытов, представленных на рис. 2, показывает, что при содержании этанола в смеси с бензином 85 % об. полученная ДНП при температуре 37,8 °С удовлетворяет требованиям ГОСТ 32513—2013, согласно которым минимальное ДНП для всех классов испаряемости бензина определяется равным 35 кПа. И не удовлетворяет

требованиям ГОСТ Р 51105—2020, согласно которым минимальное ДНП для классов А, В составляет 45 кПа. Испаряемость смеси Е85 в диапазоне температур от 10 до 45 °С снизилась в среднем на 60 % относительно чистого бензина. Условные смеси Е5 удовлетворяют требованиям обоих стандартов, отмечается относительное снижение испаряемости с среднем на 10,2 % в том же диапазоне температур.

Выводы

1. Влияние топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей различно. С улучшением детонационной стойкости и сокращением удельных выбросов диоксида углерода и вредных примесей с отработавшими газами двигателя одновременно отмечается агрессивное действие на конструкционные материалы и ухудшение пусковых свойств.

2. Ухудшение пусковых свойств, определяемое по изменению давления насыщенных паров бензино-этанольных смесей Е5 с различным содержанием воды, составило в среднем 4,1 % при контролируемой температуре 37,8 °С. Это позволяет сделать вывод об их удовлетворительном уровне по сравнению с чистым бензином.

3. Негативное воздействие бензино-этанольных смесей на конструкционные материалы транспортных двигателей требует более тщательной оценки в условиях лабораторных и дорожных испытаний.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Абрамов А. А. Улучшение энергетических и экологических характеристик поршневых ДВС при переходе на бензоэтанольное топливо / А. А. Абрамов, А. В. Апельинский, К. С. Руновский и др. // Известия МГТУ МАМИ. — 2013. — Т. 1. — № 2(16). — С. 101–106.
2. Коновалов Д. С. Спирт как перспективное топливо / Д. С. Коновалов, Д. В. Цыганков // Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности: сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции 30 апреля 2019 г. — С. 116–119.
3. Руппель Е. А. Аспекты повышения энергоэффективности автомобильного транспорта за счет применения альтернативных видов топлива / Е. А. Руппель, А. Л. Пенкин // Магистратура — автотранспортной отрасли: материалы VI Всероссийской межвузовской конференции, Санкт-Петербург, 21–22 октября 2021 года. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. — С. 124–130.
4. Кожевникова Ю. В. Производство биоэтанола — ключ к получению экологически чистых высокооктановых бензинов / Ю. В. Кожевникова, Е. Ю. Сердюкова, В. Е. Моисеенко // Химия. Экология. Урбанистика. — 2020. — № 4. — С. 88–92.
5. Сусану И. А. Регулирование рынка жидкого биотоплива в России и мире / И. А. Сусану // Торговая политика. — 2019. — № 1(17). — С. 60–88.
6. Адизов Б. З. Использование этанола в качестве октаноповышающей добавки (присадки) к автомобильным бензинам / Б. З. Адизов, М. Ж. Махмудов, А. А. Салойдинов // Universum: технические науки. — 2023. — № 5-5(110). — С. 46–52.
7. Бганцев В. Н. Исследование коррозионной активности бензоэтанолов различного состава, полученных с использованием новых технологий / В. Н. Бганцев, В. Н. Киреева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2013. — № 60. — С. 118–122.
8. Durbin T. D. Material compatibility evaluation for elastomers, plastics, and metals exposed to ethanol and butanol blends / T. D. Durbin, G. Karavalakis, J. M. Norbeck et al. // Fuel. — 2016. — Iss.163. — Pp. 248–259.
9. Тимергазин А. Р. Улучшение пусковых свойств двигателей с искровым зажиганием, работающих на смесях бензина с этанолом / А. Р. Тимергазин, Н. П. Нешатаев, Д. В. Мальцев // Химия. Экология. Урбанистика. — 2021. — Т. 3. — С. 252–256.

10. Гареев Т. Р. Методы получения и исследования бензино-этанольной эмульсии / Т. Р. Гареев, А. Т. Гильмутдинов, И. Г. Лапшин // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. — 2019. — № 1. — С. 234–246.

Дата поступления: 12.10.2023

Решение о публикации: 19.11.2023

Контактная информация:

ПЕНКИН Алексей Леонидович — канд. техн. наук,

доц.; apenkin2008@rambler.ru

РУППЕЛЬ Евгений Александрович — аспирант;
italian@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук,
доц.; 79219751198@yandex.ru

СОБОЛЕВ Александр Альбертович — канд. техн. наук;
a89213194387@yandex.ru

НОВОСЕЛЬСКИЙ Игорь Юрьевич — канд. техн. наук;
inovoselskiy@internet.ru

On the Influence of Fuel Bioethanol on the Operational Properties of Transport Engines

A. L. Penkin¹, Ye. A. Ruppel¹, A. A. Vorob'yov², A. A. Sobolev², I. Yu. Novoselsky²

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Penkin A. L., Ruppel Ye. A., Vorob'yov A. A., Sobolev A. A., Novoselsky I. Yu. On the Influence of Fuel Bioethanol on the Operational Properties of Transport Engines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 1027–1033. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1027-1033

Summary

Purpose: To comprehensively consider the effect of bioethanol as an additive to gasoline on the operational properties of transport engines from the point of view of their differences in physical and chemical properties and technologies, taking into account not only advantages, but also disadvantages. To more profoundly evaluate the volatility of gasoline-ethanol mixtures at different ethanol and water contents, and its effect on startability. **Methods:** Comparison of available data in normative and reference literature, also in scientific publications. Conducting an experiment using the standard method for gasoline to measure the saturated vapor pressure of gasoline-ethanol mixture of various composition. **Results:** From the collected data, parameters of the gasoline-ethanol mixture that are important for operation of transport engines have been identified. The need for a detailed assessment of the influence of the composition of such mixtures on the structural materials of transport engines has been identified. Data have been obtained on the volatility of mixtures in a wide temperature range, simulating real operating conditions. No significant deterioration in startability has been revealed. A visible violation of the phase stability of mixtures containing more than 7.5% water has been noted. **Practical significance:** The measured degree of volatility and startability of gasoline-ethanol mixtures of the various composition allows us to conclude that their level in comparison with gasoline, for mixtures with a 5% ethanol content is satisfactory, and for mixtures with 85% ethanol, is relatively satisfactory. For the first time, the parameters of the provided standard procedure are expanded, relative to the usual temperature recommended when measuring the vapor pressure, to possibly wider limits, allowing a more complete picture to be obtained.

Keywords: Fuel bioethanol, gasoline, volatility, saturated vapor pressure, startability, transport engines.

References

1. Abramov A. A., Apelinskiy A. V., Runovskiy K. S. et al. Uluchshenie energeticheskikh i ekologicheskikh kharakteristik porshnevnykh DVS pri perekhode na benzoetanol'noe toplivo [Improving the energy and environmental characteristics of piston internal combustion engines when switching to benzo-ethanol fuel]. *Izvestiya MGTU MAMI* [Proceedings of MSTU MAMI]. 2013, vol. 1, Iss. 2(16), pp. 101–106. (In Russian)
2. Konovalov D. S., Tsygankov D. V. Spirt kak perspektivnoe toplivo [Alcohol as a promising fuel]. *Sintez nauki i obshchestva v reshenii global'nykh problem sovremennosti: sbornik statey po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 30 aprelya 2019 g.* [Synthesis of science and society in solving global problems of our time: a collection of articles based on the results of the All-Russian scientific and practical conference on April 30, 2019]. pp. 116–119. (In Russian)
3. Ruppel' E. A., Penkin A. L. Aspekty povysheniya energoeffektivnosti avtomobil'nogo transporta za schet primeneniya al'ternativnykh vidov topliva [Aspects of increasing the energy efficiency of road transport through the use of alternative fuels]. *Magistratura — avtotransportnoy otrasli: materialy VI Vserossiyskoy mezhvuzovskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–22 oktyabrya 2021 goda* [Master's degree in the motor transport industry: materials of the VI All-Russian Interuniversity Conference, St. Petersburg, 21–22 October 2021]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet Publ., 2022, pp. 124–130. (In Russian)
4. Kozhevnikova Yu. V., Serdyukova E. Yu., Moiseenko V. E. Proizvodstvo bioetanol — klyuch k polucheniyu ekologicheskhi chistykh vysokooktanovykh benzinov [Production of bioethanol is the key to obtaining environmentally friendly high-octane gasoline]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urbanism]. 2020, Iss. 4, pp. 88–92. (In Russian)
5. Susanu I. A. Regulirovaniye rynka zhidkogo biotopliva v Rossii i mire [Regulation of the liquid biofuel market in Russia and the world]. *Torgovaya politika* [Trade Policy]. 2019, Iss. 1(17), pp. 60–88. (In Russian)
6. Adizov B. Z., Makhmudov M. Zh., Saloydinov A. A. Ispol'zovaniye etanola v kachestve oktanopovyshayushchey dobavki (prisadki) k avtomobil'nym benzinam [The use of ethanol as an octane-increasing additive (additive) to motor gasoline]. *Universum: tekhnicheskije nauki* [Universum: technical sciences]. 2023, Iss. 5-5(110), pp. 46–52. (In Russian)
7. Bgantsev V. N., Kireeva V. N. Issledovaniye korrozionnoy aktivnosti benzoetanolov razlichnogo sostava, poluchennykh s ispol'zovaniem novykh tekhnologiy [Study of the corrosion activity of benzoethanols of various compositions obtained using new technologies]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkov National Automobile and Road University]. 2013, Iss. 60, pp. 118–122. (In Russian)
8. Durbin T. D., Karavalakis G., Norbeck J. M. et al. Material compatibility evaluation for elastomers, plastics, and metals exposed to ethanol and butanol blends. *Fuel*, 2016, Iss. 163, pp. 248–259
9. Timergazin A. R., Neshataev N. P., Mal'tsev D. V. Uluchsheniye puskovykh svoystv dvigateley s iskrovym zazhiganiem, rabotayushchikh na smesyakh benzina s etanolom [Improving the starting properties of spark-ignition engines operating on mixtures of gasoline with ethanol]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urbanism]. 2021, vol. 3, pp. 252–256. (In Russian)
10. Gareev T. R., Gil'mutdinov A. T., Lapshin I. G. Metody polucheniya i issledovaniya benzino-etanol'noy emul'sii [Methods for obtaining and studying gasoline-ethanol emulsion]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo* [Electronic scientific journal Oil and Gas Business]. 2019, Iss. 1, pp. 234–246. (In Russian)

Received: October 12, 2023

Accepted: November 19, 2023

Author's information:

Alexey L. PENKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; apenkin2008@rambler.ru

Yevgeny A. RUPPEL — Postgraduate Student; italian@yandex.ru

Aleksandr A. VOROB'YOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Aleksandr A. SOBOLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; a89213194387@yandex.ru

после этого автора добавить соавтора:

Igor Yu. NOVOSELSKY — PhD in Engineering; inovoselskiy@internet.ru