

Научная статья

УДК 629.017

DOI 10.46845/1997-3071-2025-76-91-109

### **Исследование изменения физико-химических характеристик судовых моторных масел в процессе отработки**

**Оксана Владимировна Сынашенко<sup>1</sup>, Николай Яковлевич Синявский<sup>2</sup>, Наталья Анатольевна Кострикова<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

<sup>1</sup>oksanasynashenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

<sup>2</sup>nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

<sup>3</sup>natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

**Аннотация.** При эксплуатации судового моторного масла происходят процессы, связанные с его окислительной высокотемпературной деградацией, загрязнением сажей, металлами износа, топливом, водой и охлаждающей жидкостью. Качество отработанного судового моторного масла является индикатором для диагностики неисправности судовых дизелей, поэтому анализ свойств отработанных моторных масел имеет важное значение в вопросах определения надежности судовых дизелей, а также обеспечения оптимальных сроков их использования. Судовые моторные масла – диэлектрики, что позволяет рассматривать различные электрические характеристики в задачах диагностирования. В данной работе приводятся результаты исследования основных физико-химических характеристик свежих и отработанных моторных масел: относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, удельной проводимости, процентного содержания воды, напряжения электрического пробоя, щелочного числа и вязкости. Авторами использован многопараметрический подход для анализа свойств свежих и отработанных моторных масел. Исследованы температурные зависимости основных физико-химических характеристик следующих моторных масел: Mobil 5W30, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Shell Rimula 15W40, Total DISOLA, Navigo TPEO 12/40. Указанные характеристики измерялись в зависимости от температуры в диапазоне 20–55 °С (с шагом 1 °С) как для свежих масел, так и для отработанных. Показана возможность установления корреляции между этими характеристиками, в том числе при их изменении в отработанных моторных маслах, что позволяет использовать это в задачах диагностирования судовых дизелей.

**Ключевые слова:** судовые моторные масла, щелочное число, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, напряжение электрического пробоя, вязкость.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках госзадания Федерального агентства по рыболовству, рег. № 122030900056-4.

**Для цитирования:** Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Исследование изменения физико-химических характеристик судовых моторных масел в процессе отработки // Известия КГТУ. 2025. № 76. С. 91–109. DOI 10.46845/1997-3071-2025-76-91-109.

Original article

### Study of changes in physical and chemical characteristics of marine engine oils in the process of optimization

Oksana V. Synashenko<sup>1</sup>, Nikolay Ya. Sinyavskiy<sup>2</sup>, Natal'ya A. Kostrikova<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

<sup>1</sup> oksanasynashenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

<sup>2</sup> nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

<sup>3</sup> natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

**Abstract.** During exploitation of marine motor oil, the processes related to the oxidative high-temperature degradation, contamination with soot, wear metals, fuel, water and coolant occur. The quality of used marine motor oil is an indicator for diagnosing the malfunction of marine diesel, so the analysis of the properties of used motor oils is important in determining the reliability of marine diesel engines, as well as ensuring the optimal time of their use. Marine motor oils are dielectrics, which allows considering various electrical characteristics in diagnostic tasks. This paper presents the results of a study of the main physical and chemical characteristics of fresh and used motor oils: relative permittivity, dielectric loss tangent, specific conductivity, water percentage, electrical breakdown voltage, total base number, and viscosity. The authors use a multiparameter approach to analyze the properties of fresh and used motor oils. The temperature dependences of the main physical and chemical characteristics of the following motor oils have been studied: Mobil 5W30, Mobil 5W40, Mobil 10W40, Shell Rimula 15W40, Total DISOLA, Navigo TPEO 12/40. The specified characteristics have been measured depending on the temperature in the range of 20–55 °C (in 1 °C increments), both for fresh and used oils. The paper shows the possibility of establishing a correlation between these characteristics, including when they change in used motor oils. The presence of a correlation between these parameters allows this to be used in the tasks of diagnosing marine diesel engines.

**Keywords:** marine engine oils, total base number, relative permittivity, dielectric loss angle tangent, electrical breakdown voltage, viscosity.

**Funding:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Fisheries Agency, reg. N 122030900056-4.

**For citation:** Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of changes in physical and chemical characteristics of marine engine oils in the process of used. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(76):91–109. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-76-91-109.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции ресурсосбережения, в частности экономии топливно-энергетических ресурсов, обуславливают необходимость текущего контроля состояния моторного масла в картере двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в процессе его эксплуатации. С этой целью, а также с целью обеспечить надежность работы ДВС и долговечность деталей двигателей, необходимо знать оптимальный срок замены моторного масла [1, 2]. Старение масла в процессе его эксплуатации и ухудшение его физико-химических характеристик может вызвать преждевременный износ деталей и последующий отказ двигателя.

Анализируя пробы масла, технические специалисты могут обнаружить предельно допустимые или аварийные (браковочные) показатели его состояния. Это позволяет им предпринимать корректирующие действия, такие как замена масла, фильтров или выявление основных проблем, прежде чем они перерастут в катастрофические неисправности. Кроме того, анализ масла помогает оптимизировать срок службы смазочных материалов, сокращая частоту замены масла и минимизируя затраты на техническое обслуживание.

Анализ отработанного масла быстро и легко показывает состояние двигателя. Взяв образец отработанного масла, можно определить ранние признаки загрязнения, окисления и степень износа, наличие металлов, разбавление масла топливом и другими загрязняющими веществами. Анализ отработанного масла позволяет обнаружить частицы и загрязняющие вещества размером менее 10 мкм.

Поскольку моторное масло движется по всему двигателю, собирая по пути частицы и загрязняющие вещества, анализ этого масла может указать на потенциальные проблемные места, предотвратить отказ подшипника, обнаружив его преждевременный износ, подсчитав миллионные доли материалов подшипников (меди, олова и свинца) в отработанном масле.

Анализ масла может показать наличие воды в масле, которая появилась из крошечной трещины в одном из впускных каналов. Помимо обнаружения утечки охлаждающей жидкости, анализ отработанного масла обнаруживает начальные стадии задира цилиндров, когда ни один другой тест не выявляет эту проблему. Если вовремя обнаружить задиры, их можно устранить до того, как двигатель выйдет из строя. Увеличение содержания железа, алюминия и хрома в отработанном масле указывает на ненормальный износ поршня и гильзы.

Известно, что моторные масла являются жидкими диэлектриками, и такие параметры, как относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ , удельная проводимость  $\sigma$ , напряжение пробоя  $U_{пр}$ , можно применить в качестве показателей, характеризующих их диэлектрические свойства.

Электропроводность жидкой среды – это мера способности жидкости проводить электрический ток, обычно она выражается в пикосименсах на метр (пСм/м). Кроме типа жидкости, проводимость зависит от концентрации подвижных носителей заряда. Смазочные материалы могут работать как изоляторы в трансформаторах или переключателях по причине того, что они характеризуются слабой проводимостью. Проводимость масел зависит от нескольких факторов, включая тип базового масла, состав присадок и полярность. Чем большую поляр-

ность имеет смазка, тем она менее очищена и более проводящая. Повреждение компонентов смазочных материалов может быть вызвано электростатическими разрядами. Проводимость смазочного материала является важным фактором в накоплении заряда, а проводимость зависит от типа используемого базового масла.

Исследования Григорова А. Б. и др. [2, 3] показали, что одним из браковочных параметров масла может быть его диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . На примере масел 10W-40 и 15W-40 наблюдался рост величины  $\epsilon$  пропорционально времени эксплуатации моторных масел, что свидетельствует об утрате ими свойств диэлектрика [3]. В работе [4] исследования диэлектрических характеристик автомобильных моторных масел в частотном диапазоне 100 Гц – 3 МГц выявили максимум на частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  отработанного масла, что, по всей видимости, вызвано окислением углеводородов, входящих в состав масла. Авторами [4] предлагается использовать частотную зависимость  $\operatorname{tg}\delta$  в качестве браковочного показателя.

Исследованные в нашей работе [5] температурные зависимости проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  для свежего и отработанного масла Shell Rimula15W40 позволили рассчитать энергию активации образцов по каждому из параметров, а также установить связь удельной проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и ее зависимость от частоты тока.

Определение качества моторного масла обычно требует сложного лабораторного оборудования для измерения вязкости, показателя преломления, плотности, щелочного числа, кислотного числа, содержания воды, металлов (присадок и металлов износа), цвета и температуры вспышки.

Каждый браковочный параметр моторного масла имеет максимально допустимые пределы, в которых он может изменяться в ходе работы масла: вязкость  $\pm 20\%$ , содержание воды – до 0,3 %, щелочное число – до 50 % от значения TBN свежего масла. Исходя из этого, при анализе масла необходим комплексный подход, учитывающий одновременно несколько параметров. В работе [3] наряду с исследованиями изменения относительной диэлектрической проницаемости была проанализирована динамика уменьшения величины TBN и температуры вспышки.

Остриков В. В. и др. [6] в подобном комплексном исследовании изменения свойств моторных масел в ДВС зерноуборочных комбайнов в сезон работ и в период вынужденного простоя заметили корреляцию между уменьшением вязкости масла и спадом температуры вспышки. Уменьшение щелочного числа TBN с 8 до 6 мг КОН/г во время интенсивной работы машин находилось в пределах нормы. В период же простоя отмечается незаметное уменьшение TBN с 6 до 5,7 мг КОН/г (за счет осаждения присадок вместе с загрязнениями), в то время как кислотное число выросло заметно – в 1,5 раза, что является следствием процесса окисления.

Малютин А. И. и др. [7] предложили диагностику состояния моторного масла по степени его загрязненности нерастворимыми механическими примесями – частицами железа и кремния. Методы электронной рентгеноспектральной микроскопии и лазерной дифракции позволили оценить размер частиц и их распределение в зависимости от режима работы ДВС.

Дыров П. А. и Малышко А. А. в работе [8] помимо отслеживания динамики изменения щелочного числа акцентируют внимание на изучении степени окисления и количества химических элементов в составе отработанного масла. В част-

ности, важным элементом, входящим в состав диспергирующих и противоизносных присадок, является бор. Оценка количественного содержания бора проводилась с помощью эмиссионного спектрометра ICP-OES, для определения степени окисления использовалась ИК-спектроскопия на ИК-Фурье спектрометре. Для образцов масла 10W-30 с разным временем отработки определены предельные значения параметров, превышение которых будет приводить к снижению надежности ДВС: содержание бора – 200 мг/кг, что соответствует полной выработке присадки, степень окисления – 25 А/см.

При изучении процессов деградации пяти моторных масел 5W30, относящихся к одному классу вязкости SAE, но выпускаемых разными производителями, А. Волаком были проанализированы характер и интенсивность изменения щелочного числа [9]. Уменьшение величины TBN в процессе отработки масел объясняется снижением содержания в маслах противозадирных и противоизносных присадок. Большой объем статистических данных об изменении щелочного числа моторных масел в зависимости от часов наработки двигателя позволил автору работы [9] создать статистическую модель на основе линейной функции, которая помогла бы прогнозировать поведение моторного масла в процессе использования.

В работах Лаушкина А. В. и др. [10, 11, 12], а также Острикова В. В. [13] установлено, что изменение свойств моторных масел в том числе связано с качеством используемого дизельного топлива. По оценке авторов [10], топливо, имеющее отклонения от требований стандартов, снижает срок службы масла до замены более чем на 20 %. Об этом свидетельствовало содержание загрязнений в масле и его щелочное число, которые имели значения, близкие к браковочным.

Еще одной важной характеристикой диэлектрических свойств моторного масла является напряжение пробоя  $U_{пр}$ . Как показывают исследования, для технически чистых жидких диэлектриков, в частности для трансформаторного масла, зависимость напряжения пробоя от температуры незначительная. На пробой жидких диэлектриков заметное влияние оказывают факторы, которые могут как повышать  $U_{пр}$  (очистка, давление), так и понижать его: загрязнение и увлажнение (ничтожное количество влаги ( $< 0,03\%$ ) резко снижает  $U_{пр}$ ), вязкость, температура (с увеличением температуры  $U_{пр}$  уменьшается) [14].

В работе [15] авторы предлагают повышать напряжение пробоя трансформаторного масла, легируя его наночастицами  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ . Это приводит к искажению электрического поля внутри масла в результате накопления заряда на поверхности наночастиц. Исследование влияния концентрации нанонаполнителя на значение  $U_{пр}$  показали, что оптимальным значением концентрации является 0,2 г/л, при этом максимальное процентное увеличение напряжения пробоя составляет 170 % в случае добавления  $\text{TiO}_2$ , 136 % и 62% при добавлении в трансформаторное масло наночастиц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  соответственно.

Анализ литературы свидетельствует об актуальности вышеперечисленных исследований как для определения качества моторных масел, так и для диагностики двигателя по отработанному маслу. Целью данной работы явилось исследование старения судовых моторных масел путем регистрации основных физико-химических характеристик и установление корреляции между этими характеристиками.



## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ физико-химических характеристик моторных масел проводился с использованием анализатора качества нефтепродуктов SHATOX SX-300 [16], в состав которого входят два датчика, позволяющих в различных режимах измерять такие характеристики, как относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$ , удельная проводимость  $\sigma$ , процентное содержание воды  $K_w$ , напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$ , и щелочное число TBN. На рис. 1 представлен внешний вид анализатора.

Указанные выше параметры масел измерялись в зависимости от температуры в диапазоне 20–55 °С (с шагом 1 °С) как для свежих масел, так и для отработанных.

Температуру вспышки определяли с помощью судовой комплексной лаборатории «СКЛАМТ-1» в специальном приборе закрытого типа методом визуального наблюдения воспламенения паров масла от нагретой спирали воспламенителя.

Всего было исследовано 6 всесезонных моторных масел, различных по своим характеристикам, согласно классификации масел по SAE: 5W30, 5W40, 10W40, 15W40, а также ТПЕО 12/40 и судовое масло Total DISOLA M4015.



Рис. 1. Анализатор качества нефтепродуктов SHATOX SX-300 [16]

Fig. 1. Petroleum product quality analyzer SHATOX SX-300 [16]

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Температура вспышки масла  $t_{всп}$  – это самая низкая температура, при которой образец масла в определенных условиях выделяет достаточно паров для того, чтобы паровоздушная смесь над образцом воспламенилась в первый раз и не продолжила гореть впоследствии. Температуру вспышки определяют при нагревании моторного масла в открытом или закрытом тигле.

Измеренная температура вспышки в закрытом тигле для свежих и отработанных моторных масел приведена в табл. 1. Для сравнения указана температура вспышки, заявленная производителями масел, полученная методом открытого тигля Кливленда. Известно, что в открытом приборе температура вспышки минеральных масел на 20–25 °С выше, чем в закрытом [17], что подтверждается нашими исследованиями.

Таблица 1. Температура вспышки  $t_{всп}$  в закрытом тигле для свежих и отработанных моторных масел

Table. 1. Flash point in a closed cup for fresh and used motor oils

Масло			$t_{всп}$ , °С (в закрытом тигле)	$t_{всп}$ , °С (в открытом тигле Кливленда)
1	Mobil 5W30	свежее	212	234 [18]
		отработанное 170 ч	152	–
2	Mobil 5W40	свежее	218	236 [19]
		отработанное 160 ч	140	–
3	Mobil 10W40	свежее	210	230 [20]
		отработанное 300 ч	174	–
4	Shell Rimula 15W40	свежее	202	230 [21]
		отработанное 250 ч	192	–
		отработанное 500 ч	178	–
5	ТПЕО 12/40	свежее	235	230 [22]
		отработанное 300 ч	220	–
6	Total DISOLA M4015	свежее	221	230 [23]
		отработанное 300 ч	205	–

Поскольку температура вспышки является важной константой для смазочных материалов всех видов, каждое масло испытывается на предмет температуры вспышки, которая вносит значительный вклад в область применения смазочного материала. Это показатель наличия в масле легкокипящих фракций, что определяет способность состава образовывать нагар и сгорать при соприкосновении с горячими деталями двигателя. У качественного масла значение  $t_{всп}$  должно быть как можно выше. У современных моторных масел температура вспышки превышает +200 °C, обычно она равна +210–230 °C.

Каждое масло имеет свою температуру вспышки. В зависимости от области применения может также потребоваться определенная температура вспышки. В принципе, температура вспышки парафиновых масел с плотностью от 860 до 890 кг/м<sup>3</sup> составляет от 200 до 280 °C. Для нефтяных масел с плотностью от 890 до 960 кг/м<sup>3</sup> достигаются температуры вспышки 235 °C и ниже.

Температура вспышки масел может снижаться в процессе использования. В частности, в двигателях внутреннего сгорания масло способно смешиваться с топливом после длительных периодов использования, что приводит к разбавлению масла, ухудшению его смазочных и антинагарных свойств. Попадание посторонних веществ, топлива или воды также является причиной того, что температура вспышки других масел может упасть. Если температура вспышки образца масла падает ниже 150 °C, масло следует заменить, чтобы снизить риск возгорания.

Зависимости щелочного числа TBN от температуры для свежих и отработанных моторных масел Mobil 5W40, Mobil 10W40 и Shell Rimula 15W40 показаны на рис. 2.

Общее щелочное число, или Total Base Number (TBN), характеризует способность масла нейтрализовывать вредные кислоты, попадающие в него в процессе работы ДВС. Щелочное число указывает на количество щелочных присадок, присутствующих в моторном масле. В этом контексте специалисты также говорят о щелочном резерве моторного масла. Щелочной резерв описывает, сколько кислоты может быть нейтрализовано. Смазочное масло не должно увеличивать в процессе работы кислотность, т. е. значение pH, чтобы оставаться функциональным в течение длительного времени. Если масло становится слишком кислым из-за попадания посторонних веществ, старение масла и разложение смазки ускоряются. В этом случае моторное масло требует замены.

Добавляя присадки, можно обеспечить маслу щелочной резерв. Это нейтрализует кислоты в масле, и оно дольше остается пригодным к использованию. Таким образом, нейтрализуются кислотные продукты сгорания в моторном масле. Щелочное число дает важную информацию об оставшемся сроке службы масла, оно определяется титрованием и выражается в мг КОН/г, то есть указывает на количество гидроксидов калия в одном грамме моторного масла. Свежие моторные масла для бензиновых двигателей имеют TBN = 6–13 мг КОН/г. Щелочное число является важным параметром для моторных масел, поскольку они подвергаются особенно сильному воздействию кислот из-за остатков продуктов сгорания, содержащихся в топливе соединений серы [10].



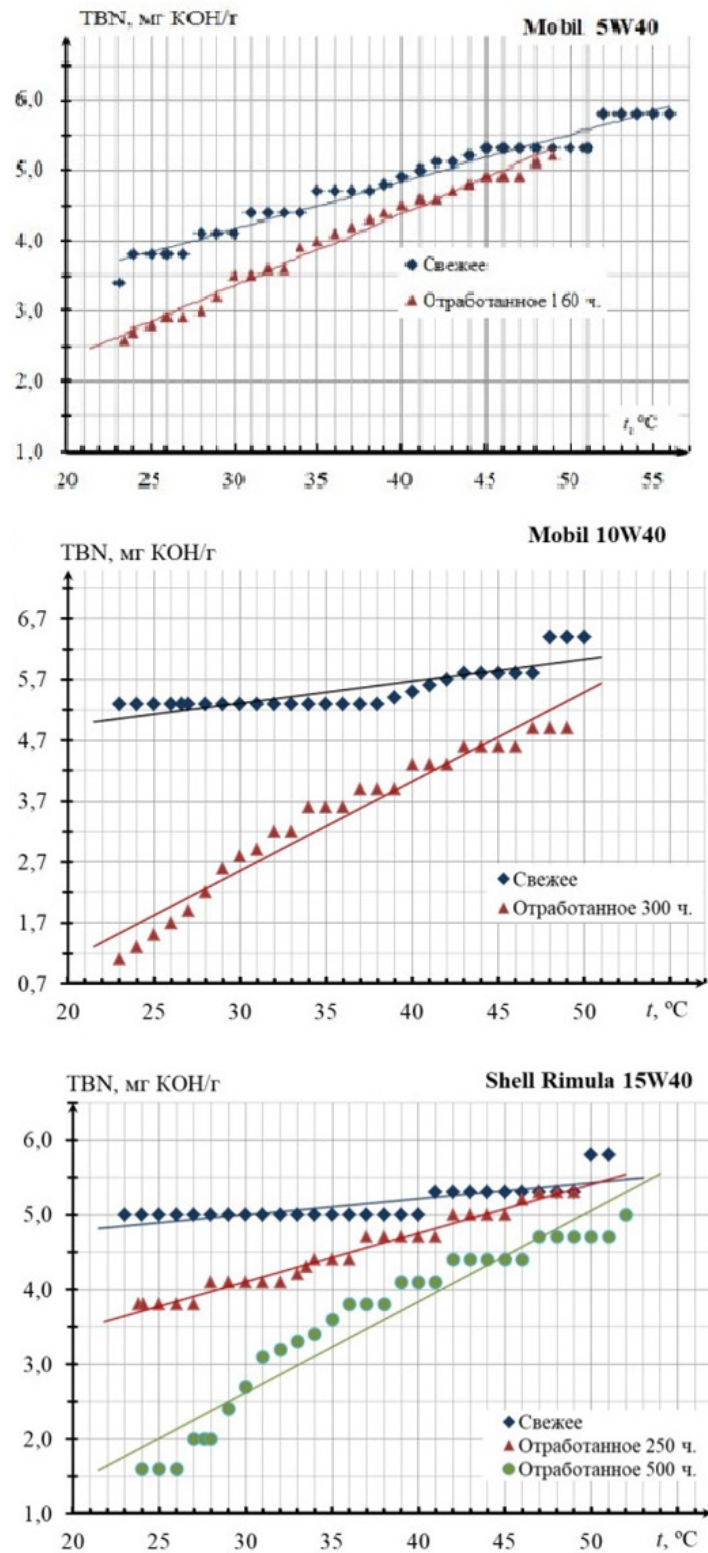


Рис. 2. Температурные зависимости щелочного числа TBN для свежих и отработанных моторных масел Mobil 5W40, Mobil 10W40 и Shell Rimula 15W40

Fig. 2. Temperature dependences of the TBN for fresh and used engine oils Mobil 5W40, Mobil 10W40 and Shell Rimula 15W40

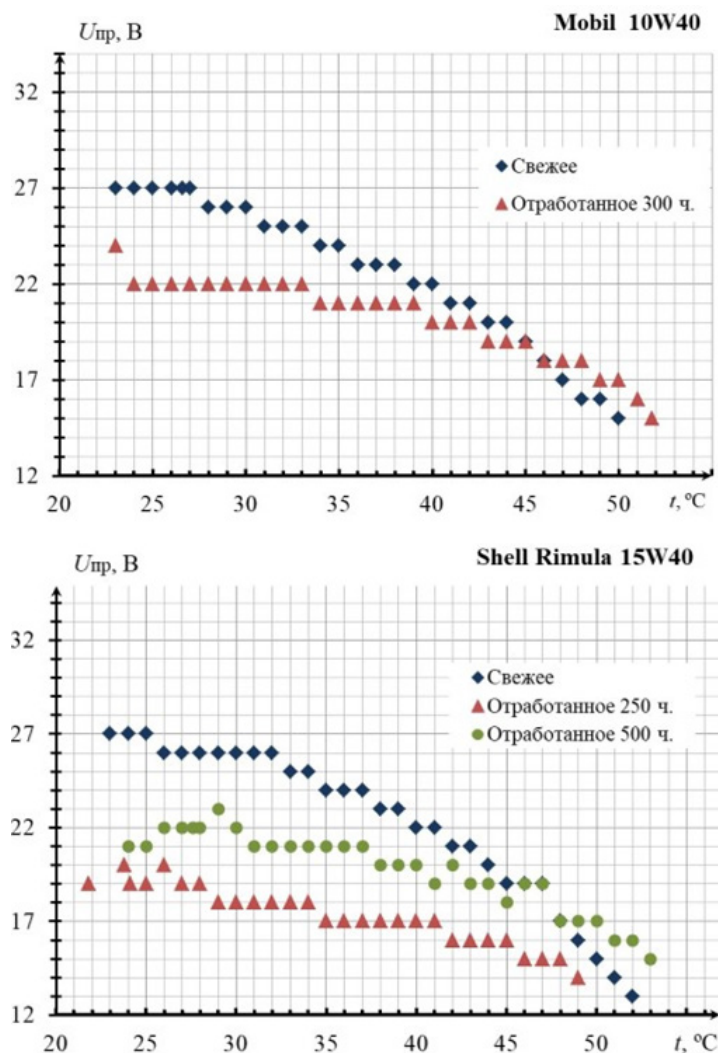


Рис. 3. Температурные зависимости напряжения пробоя  $U_{пр}$  для свежих и отработанных моторных масел Mobil 10W40 и Shell Rimula 15W40

Fig. 3. Temperature dependences of the breakdown voltage  $U_{пр}$  for fresh and used Mobil 10W40 and Shell Rimula 15W40 engine oils

Отличительной особенностью температурной зависимости щелочного числа для масла Mobil 10W40 является резкое уменьшение (в 4,8 раза) величины TBN при комнатной температуре в масле, отработанном в течение 300 ч.

Для всех исследуемых образцов свежих масел наблюдается слабое изменение значения щелочного числа с ростом температуры и заметен резкий рост величины TBN для всех образцов отработанных масел. Это можно объяснить тем, что рост кислот больше не нейтрализуется, т. к. щелочной потенциал масла израсходован.

Моторные масла являются диэлектриками, представляющими собой базовое масло и многокомпонентную дисперсную систему присадок для улучшения эксплуатационных характеристик масла. Молекулы базовых масел состоят их связанных атомов с равномерным распределением зарядов и являются неполярными.

Как видно из температурных зависимостей удельной проводимости  $\sigma$  для свежих и отработанных моторных масел, базовое масло, не содержащее пакета присадок, не имеет диполей, которые могли бы релаксировать. Диполи, вызывающие поляризацию и последующую релаксацию, в основном, молекулы присадок, которые в процессе работы двигателя срабатываются. Это иллюстрируют и зависимости тангенса угла потерь для этих масел, показанные на рис. 5.

Вышесказанное означает, что проводимость масла снижается, а риск статического заряда увеличивается. Проводимость смазочного материала зависит не только от базового масла и пакета присадок, но и от температуры: чем выше температура, тем выше проводимость масла. К сожалению, линейной корреляции между этими двумя параметрами нет, поскольку каждый тип масла имеет свою собственную зависимость проводимости от температуры. Кроме того, при постоянной температуре проводимость все равно изменяется в процессе эксплуатации из-за реакций присадок, износа металлов, реакций с металлическими поверхностями, водой и образования продуктов старения и окисления.

Как следует из эксперимента и литературных данных, при использовании моторного масла величина его диэлектрической проницаемости увеличивается. Это вызвано окислением масла и появлением в нем частиц износа металлов и иных загрязнений, имеющих большую электропроводность.

Все характеристики исследованных свежих и отработанных моторных масел сведены в табл. 2, что позволяет наблюдать корреляцию между ними.

Одним из браковочных показателей является процентное содержание воды в масле, источники которой – нарушение правил транспортировки и хранения масла, повышенная влажность воздуха, течь из системы охлаждения дизеля, конденсация паров при остановке и охлаждении дизеля. Обводнение масла сопровождается следующими явлениями: усиливается коррозионный эффект благодаря действию содержащихся в масле кислот и солей; понижается щелочное число, присадки теряют диспергирующие свойства; ухудшаются смазывающие свойства масла; появляется пенообразование в картере двигателя. Во многих случаях во время использования большинство смазочных материалов образуют коррозионные вещества, которые вредно взаимодействуют с металлическими деталями двигателя. Необходимо учитывать деградацию масел, особенно в результате процессов окисления [24, 25]. Коррозионный износ может быть уменьшен или предотвращен щелочными добавками, которые способны нейтрализовать кислоты. Антикоррозионные добавки, адсорбируясь на металлических поверхностях, препятствуют доступу воды и оксидов.

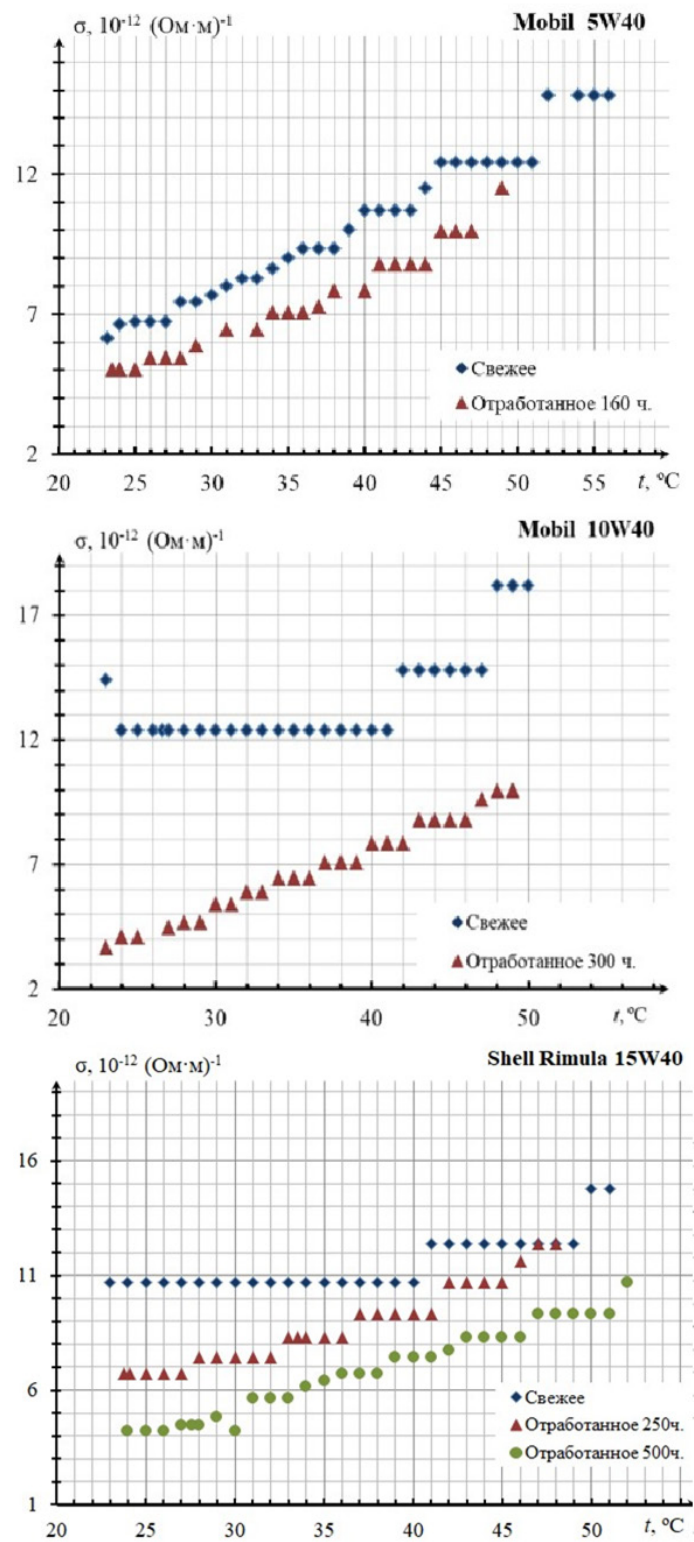


Рис. 4. Температурные зависимости удельной проводимости  $\sigma$  для свежих и отработанных моторных масел Mobil 5W40, Mobil 10W40 и Shell Rimula 15W40  
 Fig. 4. Temperature dependences of specific conductivity  $\sigma$  for fresh and used engine oils Mobil 5W40, Mobil 10W40 and Shell Rimula 15W40

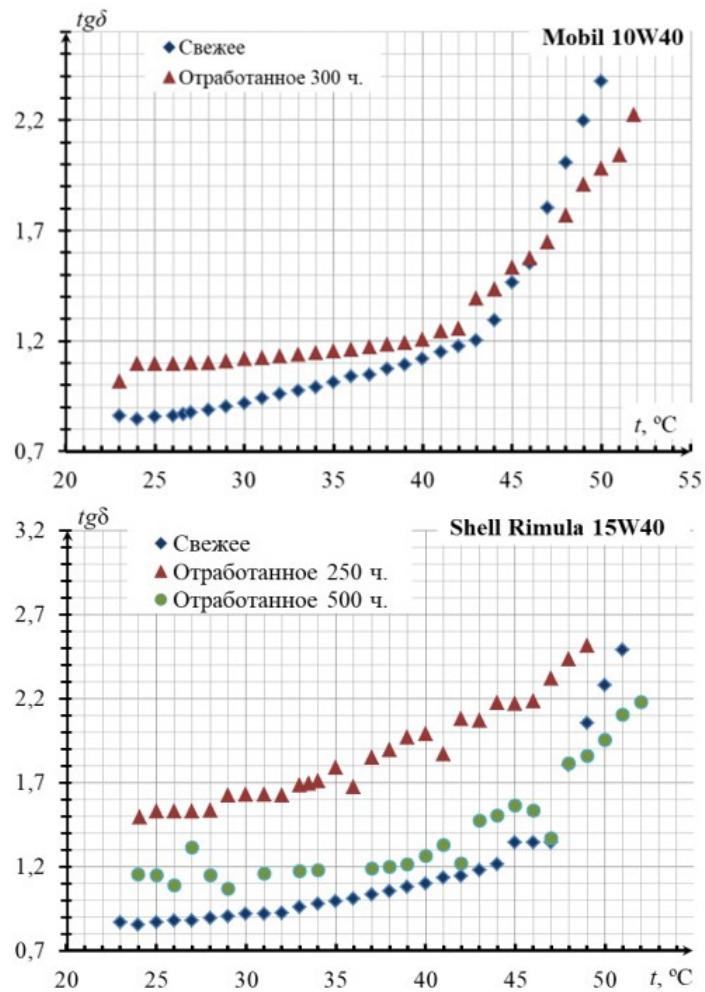


Рис. 5. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  для свежих и отработанных моторных масел Mobil 10W40 и Shell Rimula 15W40  
 Fig. 5. Temperature dependences of the dielectric loss tangent  $\text{tg}\delta$  for fresh and used engine oils Mobil 10W40 and Shell Rimula 15W40

Таблица 2. Изменение физико-химических характеристик моторных масел в процессе отработки: щелочного числа TBN, содержания воды  $K_w$ , кинематической вязкости  $\nu$ , температуры вспышки  $t_{всп}$ , удельной проводимости  $\sigma$ , напряжения пробоя  $U_{пр}$ , относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ .

Table 2. Changes in the physical and chemical characteristics of engine oils during processing: Total Base Number TBN, water content  $K_w$ , kinematic viscosity  $\nu$ , flash point  $t_{всп}$ , specific conductivity  $\sigma$ , breakdown voltage  $U_{пр}$ , relative dielectric constant  $\epsilon$ , dielectric tangent losses  $tg\delta$

Масло	Характеристика масла при $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее изменение с отработкой							
	$TBN$ , мг KOH/г	$K_w$ , %	$\nu$ , мм <sup>2</sup> /с	$t_{всп}$ , °C	$\sigma$ , $10^{-12}$ (Ом·м) <sup>-1</sup>	$U_{пр}$ , кВ	$\epsilon$	$tg\delta$
<b>Mobil 5W40</b> свеж.	3,6	0,050	171,8	218	6,13	63	2,1786	0,1073
отраб. 160 ч.	2,6	0,337	140,2	140	5,0	–	2,4754	–
	↓ 1,0 (28 %)	↑ 0,287 (в 6,7 раз)	↓ 31,6 (18 %)	↓ 78 (36 %)	↓ 1,13 (18 %)	–	↑ 0,2968 (14 %)	–
<b>Mobil 10W40</b> свеж.	5,3	0,129	318,8	210	14,4	27	2,3306	0,8451
отраб. 300 ч.	1,1	0,166	270,2	174	3,65	23	2,3528	1,0961
	↓ 4,2 (в 4,8 раз)	↑ 0,037 (29 %)	↓ 48,6 (15 %)	↓ 36 (17 %)	↓ 10,75 (в 3,9 раз)	↓ 4 (15 %)	↑ 0,0222 (1,0 %)	↑ 0,251 (30%)
<b>Shell Rimula 15W40</b> свеж.	5,0	0,138	285,9	202	10,7	27	2,3317	0,8571
отраб. 250 ч.	3,8	0,191	109,2	192	6,73	20	2,3721	1,4948
	↓ 1,2 (24 %)	↑ 0,053 (38 %)	↓ 176,7 (62 %)	↓ 10 (5 %)	↓ 3,97 (37 %)	↓ 7 (26 %)	↑ 0,0404 (1,7 %)	↑ 0,6377 (74 %)
отраб. 500 ч.	1,6	0,174	253,3	178	4,19	23	2,3604	1,1556
	↓ 3,4 (в 3 раза)	↑ 0,036 (26 %)	↓ 32,6 (11 %)	↓ 24 (12 %)	↓ 6,51 (в 2,6 раз)	↓ 4 (15 %)	↑ 0,0287 (1,2 %)	↑ 0,2985 (35%)



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследована деградация моторных масел путем регистрации основных физико-химических характеристик. Изучены температурные зависимости восьми параметров, что позволяет установить корреляции между ними. При исследовании выполнен большой объем экспериментальных измерений, результаты которых представлены в виде таблиц и графиков. Итоги работы могут использоваться специалистами для обнаружения предельно допустимого или аварийного состояния моторного масла, для диагностики двигателя по отработанному маслу.

## Список источников

1. Верещагин В. И., Рунда М. М., Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н. Методы контроля и результаты исследования состояния моторных масел двигателей внутреннего сгорания в условиях длительного хранения и эксплуатации: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 188 с.
2. Григоров А. Б., Наглюк И. С. Рациональное использование моторных масел: монография. Харьков: Точка, 2013. 178 с.
3. Григоров А. Б., Карножицкий П. В., Наглюк И. С. Изменение диэлектрической проницаемости дизельных моторных масел в эксплуатации // Автомобильный транспорт. 2007. № 20. 3 с.
4. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement / Yuan Zhou, Miao Hao, George Chen, Gordon Wilson, Paul Jarman // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 124105.
5. Correlation of dielectric constant and conductivity of marine motor oils / O. V. Synashenko, E. V. Rabenok, M. V. Gapanovich, N. Ya. Sinyavsky // Journal of ETA Maritime Science. 2024. N 12 (3). P. 287–294.
6. Анализ изменения свойств моторных масел в период уборочных работ и вынужденного простоя зерноуборочных комбайнов / В. В. Остриков, Д. Н. Жерновников, В. С. Вязинкин, А. В. Кошелев, В. К. Нагдаев, А. В. Забродская, В. В. Сафонов // Материалы XXXV Междунар. науч.-техн. конф. им. В. В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники». Саратов, 2022. Вып. 35. С. 186–192.
7. Мониторинг качества моторного масла по накоплению нерастворимых механических примесей / А. И. Малютин, Е. А. Татаренков, С. Ю. Панов, З. С. Гасанов // Наука в Центральной России. 2023. Т. 63. № 3. С. 153–163.
8. Дыров П. А., Малышко А. А. Изменение содержания бора, степени окисления и щелочного числа в моторном масле при эксплуатации в ДВС // Материалы VIII Всеросс. (национ.) науч. конф. с международным участием «Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий». Новосибирск, 2023. С. 280–285.
9. Wolak A. TBN performance study on a test fleet in real-world driving conditions using present-day engine oils // Measurement. 2017. V. 114. P. 322–331.
10. Лаушкин А. В., Хазиев А. А. Теоретические аспекты изменения щелочного числа моторного масла при работе силовой установки // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014. Т. 1. С. 140–144.

11. Хазиев А. А. Требования к автомобильному топливу и его влияние на отказы современных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. № 6 (36). С. 27–32.
12. Хазиев А. А. Лаушкин А. В., Горина Е. Б. Причины изменения свойств моторного масла // Грузовик. 2013. Вып. 6. С. 15–16.
13. Оценка влияния качества дизельного топлива и характеристик моторного масла на изменение его свойств в ДВС и срок службы / В. В. Остриков, В. К. Нагдаев, А. В. Забродская, А. В. Кошелев // Наука в центральной России. 2020. № 2 (44). С. 99–104.
14. Вазов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений: курс лекций. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 150 с.
15. On electric field distortion for breakdown mechanism of nanofilled transformer oil / A. M. Samya, M. E. Ibrahim, A. M. Abd-Elhadyb, M. A. Izzularab // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. V. 117. P. 105632.
16. Анализатор качества нефтепродуктов SHATOX SX-300. Руководство по эксплуатации. URL: <https://shatox.ru/upload/files/Oktanometr-SX-300.pdf> (дата обращения: 31.08.2024).
17. Шагин В. В., Кузькин В. Г. Смазочные масла для судовых дизелей. Калининград: Калининградское книжное издательство, 1967. 127 с.
18. Mobil 1™ ESP 5W-30. URL: <https://www.mobil.com/en/ru-ua/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-esp-5w-30> (дата обращения: 31.08.2024).
19. Mobil Super™ 3000 X1 5W-40. URL: <https://www.mobil.com/en/ru-mda/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-super-3000-x1-5w-40> (дата обращения: 31.08.2024).
20. Mobil Ultra™ 10W-40. URL: <https://www.mobil.com/ru-ru/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-ultra-10w40> (дата обращения: 31.08.2024).
21. Моторное масло Shell вязкостью 15W-40. URL: [https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity\\_15w-40](https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity_15w-40) (дата обращения: 31.08.2024).
22. Масла серии «Лукойл НАВИГО ТПЕО». URL: <https://blackgoldoil.ru/catalog/lukoil-navigo-tpeo-1240-1540-2040-3040-4040-5040-5540/> (дата обращения: 31.08.2024).
23. TOTAL DISOLA M 4015. URL: <https://interoil-spb.ru/product/motornoe-maslo-total-disola-m-4015/> (дата обращения: 31.08.2024).
24. Wilson R. W., Lyon S. B. Corrosion in Lubricants/Fuels // Materials Science and Materials Engineering. 2010. V. 2. P. 1299–1307.
25. Jan C. J. Bart, Gucciardi E., Cavallaro S. Biolubricant product groups and technological applications // Biolubricants. Science and Technology. 2013. P. 565–711.

## References

1. Vereshchagin V. I., Runda M. M., Koval'skiy B. I., Bezborodov Yu. N. *Metody kontrolya i rezul'taty issledovaniya sostoyaniya motornykh masel dvigateley vnutrennego sgoraniya v usloviyakh dlitel'nogo khraneniya i ekspluatatsii: monografiya* [Methods of control and results of studying the condition of motor oils of internal combustion engines under conditions of long-term storage and operation: monography]. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t, 2016. 188 p.

2. Grigorov A. B., Naglyuk I. S. *Ratsional'noe ispol'zovanie motornykh masel: monografiya* [Rational use of motor oils: monography]. Khar'kov, Tochka, 2013. 178 p.
3. Grigorov A. B., Karnozhitskiy P. V., Naglyuk I. S. Izmenenie dielektricheskoy pronitsaemosti dizel'nykh motornykh masel v ekspluatatsii [Change of dielectric permittivity of diesel engine oils in operation]. *Avtomobil'nyy transport*. 2007, no. 20, p. 3.
4. Yuan Zhou, Miao Hao, George Chen, Gordon Wilson, Paul Jarman. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement. *J. Appl. Phys.* 2014, vol. 115, p. 124105.
5. Synashenko O. V., Rabenok E. V., Gapanovich M. V., Sinyavskyy N. Ya. Correlation of dielectric constant and conductivity of marine motor oils. *Journal of ETA Maritime Science*. 2024. N 12 (3). P. 287–294.
6. Ostrikov V. V., Zhernovnikov D. N., Vyazinkin V. S., Koshelev A. V., Nagdaev V. K., Zabrodskaya A. V., Safonov V. V. Analiz izmeneniya svoystv motornykh masel v period uborochnykh rabot i vynuzhdenного prostoya zernouborochnykh kombaynov [Analysis of changes in the properties of motor oils during harvesting and forced downtime of grain harvesters]. *Materialy XXXV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. im. V. V. Mikhaylova "Problemy ekonomichnosti i ekspluatatsii avtotraktornoy tekhniki"* [Materials of the XXXV Intern. scient. and tech. conf. named after V. V. Mikhailov "Problems of efficiency and operation of automotive and tractor equipment"]. Saratov. 2022, is. 35, pp. 186–192.
7. Malyutin A. I., Tatarenkov E. A., Panov S. Yu., Gasanov Z. S. Monitoring kachestva motornogo masla po nakopleniyu nerastvorimyykh mekhanicheskikh primesey [Monitoring the quality of motor oil based on the accumulation of insoluble mechanical impurities]. *Nauka v Tsentral'noy Rossii*. 2023, vol. 63, no. 3, pp. 153–163.
8. Dyrov P. A., Malyshko A. A. Izmeneniye soderzhaniya bora, stepeni okisleniya i shchelochного chisla v motornom masle pri ekspluatatsii v DVS [Changes in boron content, oxidation state and base number in motor oil during operation in internal combustion engines]. *Materialy VIII Vseross. (natsion.) nauch. konf. s mezhdunarodnym uchastiem "Rol' agrarnoy nauki v ustoychivom razvitii sel'skikh territoriy"* [Proceedings of the VIII All-Russian (nation.) scient. conf. with international participation "The role of agricultural science in the sustainable development of rural areas"]. Novosibirsk. 2023, pp. 280–285.
9. Wolak A. TBN performance study on a test fleet in real-world driving conditions using present-day engine oils. *Measurement*. 2017. V. 114. P. 322–331.
10. Laushkin A. V., Khaziev A. A. Teoreticheskie aspekty izmeneniya shchelochного chisla motornogo masla pri rabote silovoy ustanovki [Theoretical aspects of changing the alkaline number of motor oil during operation of the power plant]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. 2014, vol. 1, pp. 140–144.
11. Khaziev A. A. Trebovaniya k avtomobil'nomu toplivu i ego vliyanie na otkazy sovremennykh dvigateley [Requirements for automobile fuel and its impact on

failures of modern engines]. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2013, no. 6 (36), pp. 27–32.

12. Khaziev A. A., Laushkin A. V., Gorina E. B. Prichiny izmeneniya svoystv motornogo masla [Reasons for changes in the properties of motor oil]. *Gruzovik*. 2013, is. 6, pp. 15–16.

13. Ostrikov V. V., Nagdaev V. K., Zabrodsкая A. V., Koshelev A. V. Otsenka vliyaniya kachestva dizel'nogo topliva i kharakteristik motornogo masla na izmeneniye ego svoystv v DVS i srok sluzhby [Assessing the influence of the quality of diesel fuel and the characteristics of motor oil on the change in its properties in the internal combustion engine and service life]. *Nauka v Tsentralnoy Rossii*. 2020, no. 2 (44), pp. 99–104.

14. Vazhov V. F., Lavrinovich V. A. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: kurs lekt-siy* [High voltage technology: a course of lectures]. Tomsk. TPU Publ., 2008, 150 p.

15. Samya A. M., Ibrahimb M. E., Abd-Elhadyb A. M., Izzularab M. A. On electric field distortion for breakdown mechanism of nanofilled transformer oil. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. V. 117. P.105632.

16. Oil product quality analyzer SHATOX SX-300. Operation manual. Available at: <https://shatox.ru/upload/files/Oktanometr-SX-300.pdf> (accessed 31 August 2024).

17. Shchagin V. V., Kuz'kin V. G. *Smazochnyye masla dlya sudovykh dizeley* [Lubricating oils for marine diesel engines]. Kaliningrad, Kaliningrad Publishing House, 1967. 127 p.

18. Mobil 1™ ESP 5W-30. Available at: <https://www.mobil.com/en/ru-ua/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-1-esp-5w-30> (accessed 31 August 2024).

19. Mobil Super™ 3000 X1 5W-40. Available at: <https://www.mobil.com/en/ru-mda/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-super-3000-x1-5w-40> (accessed 31 August 2024).

20. Mobil Ultra™ 10W-40. Available at: <https://www.mobil.com/ru-ru/passenger-vehicle-lube/pds/eu-xx-mobil-ultra-10w40> (accessed 31 August 2024).

21. Motornoe maslo Shell vyazkost'yu 15W-40. Available at: [https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity\\_15w-40](https://www.shell-moscow.ru/catalog/viscosity_15w-40) (accessed 31 August 2024).

22. Masla serii "Lukoil NAVIGO TPEO". Available at: <https://blackgoldoil.ru/catalog/lukoil-navigo-tpeo-1240-1540-2040-3040-4040-5040-5540/> (accessed 31 August 2024).

23. TOTAL DISOLA M 4015. Available at: <https://interoil-spb.ru/product/motornoe-maslo-total-disola-m-4015/> (accessed 31 August 2024).

24. Wilson R. W., Lyon S. B. Corrosion in Lubricants/Fuels. *Materials Science and Materials Engineering*. 2010. V. 2. P. 1299–1307.

25. Jan C. J. Bart, Gucciardi E., Cavallaro S. Biolubricant product groups and technological applications. *Biolubricants. Science and Technology*. 2013. P. 565–711.

### Информация об авторах

**О. В. Сынашенко** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

**Н. Я. Синявский** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики

**Н. А. Кострикова** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе

### Information about the author

**O. V. Synashenko** – PhD in Physics and Mathematics, associate professor of the Department of physics

**N. Ya. Sinyavsky** – DSc in Physics and Mathematics, professor, head of the Department of physics

**N. A. Kostrikova** – PhD in Physics and Mathematics, associate professor, vice-rector for research

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 25.11.2024.

The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 25.11.2024.