

М. С. Игнатов, О. Ю. Елагина

ТРИБОДИАГНОСТИКА ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния различных загрязнений и термоокислительного старения на диэлектрическую проницаемость и трибологические свойства турбинного масла ТП-22с. Экспериментально установлено, что введение в масло таких загрязнений, как порошок стали 40Х, кварцевый песок и вода, а также процесс его старения приводят к статистически значимому росту диэлектрической проницаемости и ухудшению антифрикционных характеристик – увеличению коэффициента трения и диаметра пятна износа. Выявлена сильная положительная корреляция между ростом диэлектрической проницаемости и увеличением коэффициента трения, что подтверждает возможность использования измерения диэлектрической проницаемости в качестве косвенного метода для оперативной диагностики состояния масла и прогнозирования износа узлов трения без проведения сложных трибологических испытаний.

Ключевые слова: трибодиагностика, турбинное масло, диэлектрическая проницаемость, коэффициент трения, пятно износа, загрязнения, старение масла, мониторинг состояния.

Для цитирования: Игнатов, М. С. Трибодиагностика турбинного масла ТП-22С / М. С. Игнатов, О. Ю. Елагина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 26–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_26.

Введение

Оценка текущего состояния подшипниковых узлов в процессе эксплуатации является одной из составных частей обеспечения надежной и безопасной работы любых машин и механизмов. Как правило мониторинг состояния тяжелонагруженных подшипников проводится с применением методов вибродиагностики. Вибродиагностика позволяет выявить нарушения в работе подшипников, но не дает информации о причинах их возникновения. Такую информацию, позволяющую выявлять нарушения на ранних стадиях их развития, обеспечивают методы трибодиагностики, базирующиеся на анализе текущего состояния смазочных сред [14]. Они позволяют оценить изменение физико-химических свойств смазочной среды в процессе эксплуатации. Внедрению методов трибодиагностики в общепромышленную практику препятствует отсутствие данных по взаимосвязи параметров физико-химических свойств смазочной среды и изменения триботехнических параметров, отвечающих за работу узлов трения. Как отмечено в работах [14, 15], контроль состояния масла позволяет не только диагностировать текущее состояние узлов трения, но и прогнозировать их остаточный ресурс. В данном исследовании рассмотрено применение методов трибодиагностики для прогнозирования изменения антифрикционных свойств турбинного масла ТП-22С. Турбинное масло ТП-22С широко применяется в нефтегазовой отрасли для смазки подшипников газоперекачивающих агрегатов. При надлежащем использовании и обслуживании, ТП-22С обеспечивает снижение трения, защиту оборудования от износа и коррозии, а также помогает поддерживать высокую эффективность работы подшипников ГПА. Однако в процессе эксплуатации под воздействием температуры, механических нагрузок и загрязнений (таких как продукты износа, пыль, влага и продукты окисления) происходит постепенная деградация масла, что приводит к ухудшению его эксплуатационных характеристик и сказывается на работоспособности узлов трения. Целью работы являлось исследование влияния загрязнений разной природы на диэлектрическую проницаемость и трибологические свойства турбинного масла ТП-22с.

Основная часть

Для проведения исследования взято свежее масло ТП-22С производства ООО «Газпромнефть-СМ», площадка производства – Омский завод смазочных материалов, номер партии – 79044, дата изготовления – 13.02.2025 г. Технические характеристики турбинного масла ТП-22С приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-химические и технические свойства турбинного масла ТП-22С
из ПК №25001701-ОЗСМ**

Наименование показателя	Метод испытаний	Фактическое значение
Вязкость кинематическая мм ² /с, при температуре 40 °С, в пределах	ГОСТ 33	32,6
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	19,85
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	5,35
Индекс вязкости, не менее	ГОСТ 25371	95
Кислотное число, мг КОН/г, в пределах	ГОСТ 11362	0,05
Антикоррозионные свойства	ГОСТ 19199	Отсутствие коррозии
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	ГОСТ 4333	224
Температура застывания, °С, не выше	ГОСТ 20287	–17
Массовая доля серы, %, не более	ASTM D 6481	0,28
Массовая доля механических примесей, %, не более	ГОСТ 6370	0,005
Массовая доля воды, %, не более	ГОСТ 2477	Отсутствие
Плотность при 15 °С, кг/м ³ , не более	ГОСТ Р 51069	873,2

Для проведения лабораторных исследований в пробу свежего масла ТП-22С вводились загрязняющие примеси в фиксированном количестве и проводилось старение смазочной среды.

В качестве загрязняющих примесей в смазочной среде использовались материалы, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Используемые загрязнительные материалы и их свойства

Параметры	Состав	Размер	Форма
Порошок из стали 40Х	С – 0,36–0,44 %, Cr – 0,80–1,10 %, Mn – 0,17–0,30 %, Si – 0,17–0,37 %, Ni ≤ 0,30 %, Cu ≤ 0,30 %	< 100 мкм	Сферическая
Кварцевый песок	SiO ₂ ≥ 98 %, Al ₂ O ₃ < 0,5 %, Fe ₂ O ₃ < 0,1 %, TiO ₂ < 0,1 %, CaO, MgO < 0,1–0,2 %, Na ₂ O, K ₂ O < 0,1–0,2 %	0,1–0,3 мм Допустимое отклонение ≤ 3–5 %	Твердость: ~7 по Моосу Остроугольная, неправильная, изометричная
Вода по ГОСТ 6709-72	–	–	–

На основе указанных загрязнителей для проведения лабораторных исследований проводилась подготовка модельных составов. Требуемое количество загрязнителей, добавленное в фиксированный объем смазочной среды, рассчитывалось по формуле:

$$m_{\text{загр}} = \frac{(C \cdot \rho_{\text{масла}} \cdot V_{\text{масла}})}{1000000}, \quad (1)$$

где $m_{\text{загр}}$ – масса загрязнителя, г;

C – требуемая концентрация загрязнителя, ppm;

$\rho_{\text{масла}}$ – плотность масла, г/мл;

$V_{\text{масла}}$ – объем пробы масла, мл.

Приготовление модельных составов осуществлялось путем взвешивания навески загрязнителя с точностью $\pm 0,1$ мг на электронных аналитических весах Sartorius Secura 225-1S и введения в пробу смазочной среды небольшими порциями, равными необходимому для проведения замера, и тщательно диспергировалось по объёму проб с помощью лабораторной высокоскоростной мешалки «LAB-5-250» в течение 30 минут. Для предотвращения расслоения и осаждения загрязнителей интервал времени между приготовлением модельного состава и его использованием для проведения испытаний ограничивался периодом не более 15 минут.

Для оценки влияния степени старения смазочной основы на изменение триботехнических свойств смазочной среды было выполнено окисление проб масла до разной степени окисления. Подготовка проб осуществлялась путем нагрева пробы смазочной среды в присутствии металлического катализатора (медные пластины) при температуре 120 °С в термошкафу BINDER FP 400 со свободной циркуляцией воздуха. Посуда с пробами выдерживалась при постоянной температуре в течение различных промежутков времени, после чего путём титрования определялось общее кислотное число (TAN, ГОСТ 5985-79 / ASTM D974/D664). Контроль степени старения определялся на основе замеров кислотного числа по ГОСТ 11362 и ASTM D664.

В качестве контрольных характеристик проб ТП-22с использовались следующие показатели:

- диэлектрическая проницаемость (ϵ), определяемая с применением опытного масляного пластинчатого конденсатора с емкостью в вакууме 0,12 нФ и мультиметра DT 9208A;

- коэффициент трения (f) и диаметр пятна износа (D), определяемые при испытаниях на четырехшариковой машине трения Plint в условиях контактного взаимодействия по схеме три шара – один шар по ГОСТ 9490. В качестве эталонного значения критической нагрузки ($R_{кр}$) для масла Тп-22С в исходном состоянии (без наработки) было принято значение 56 кгс (≈ 549 Н), обеспечивающее формирование пятна износа диаметром 0,5 мм, что соответствует нормативным требованиям для данного типа смазочного материала.

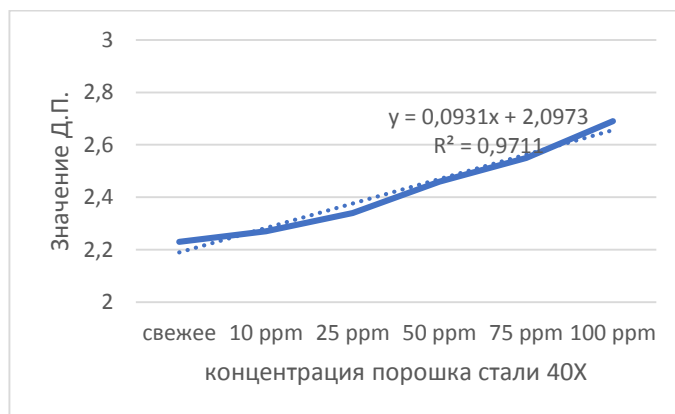
Все представленные в работе данные являются средними значениями не менее чем из трёх параллельных измерений. Погрешность измерений не превышала 5 % для диэлектрической проницаемости и трибологических параметров.

Сводные данные средних значений диэлектрической проницаемости (ϵ (Y1) модельных проб смазочной среды, содержащих загрязнители при различных концентрациях, с построением линий тренда, представлены на рис. 1.

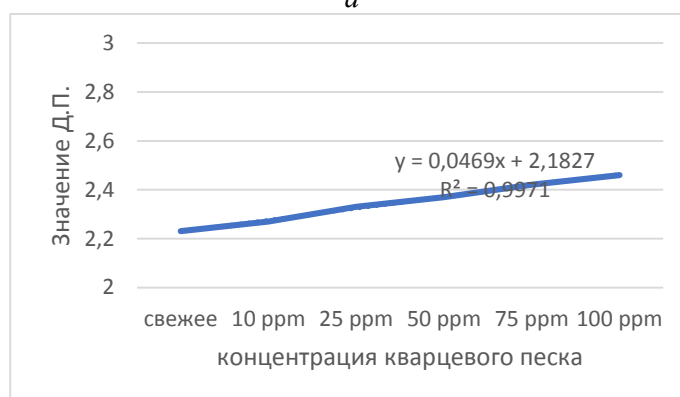
Анализ влияния загрязнителей на величину диэлектрической проницаемости показывает рост этого показателя при увеличении содержания загрязнителей. Наличие воды оказывает наиболее существенное влияние на величину диэлектрической проницаемости. При одинаковом содержании твердых частиц и аналогичном содержании вода в количестве 50 ppm прирост диэлектрической проницаемости составил 4–5 % и 8 % соответственно. При увеличении содержания загрязнителей до 100 ppm увеличение этого показателя составило 9 % для минеральных загрязнителей, 14 % для железного порошка и 19 % для воды.

Вклад старения масла ТП-22с в прирост диэлектрической проницаемости является существенным и прогрессирующим. Он заключается в накоплении полярных продуктов окисления, которые, являясь диполями, усиливают поляризацию масляной среды в электрическом поле, что и фиксируется прибором как рост диэлектрической проницаемости. Этот рост имеет четкую зависимость от степени окисления масла, характеризуемой кислотным числом. Увеличение кислотного числа с 0,05 до 0,2 мг КОН/г привело к росту диэлектрической проницаемости на 15–18 %, что сопоставимо с влиянием твердых загрязнителей при концентрации 75–100 ppm.

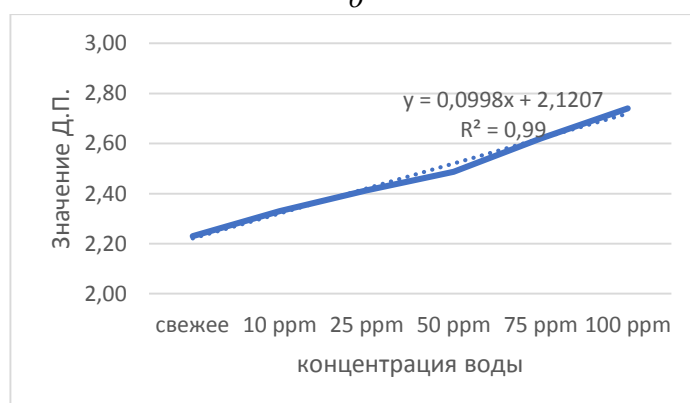
Изменение трибологических показателей смазочной среды в зависимости от наличия загрязнителей представлено в табл. 3.



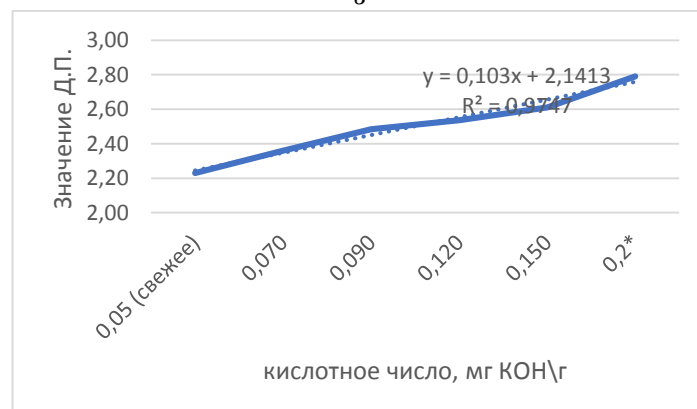
а



б



в



г

Рис. 1. Графические зависимости изменения диэлектрической проницаемости модельных составов смазки ТП-22с в зависимости от содержания загрязнителей:

а – порошок стали 40Х, б – кварцевый песок, в – вода по ГОСТ 6709-72, г – старение

Таблица 3

Зависимость трибологических показателей от загрязнений

Загрязнитель	Параметр	Замер	0 ppm	25 ppm	50 ppm	75 ppm	100 ppm
Порошок стали 40X CFe	f	Среднее	0,079	0,080	0,090	0,102	0,113
	D	Среднее	636	650	701	715	771
Минеральные загрязнители CSiO ₂	f	Среднее	0,079	0,086	0,090	0,098	0,109
	D	Среднее	636	707	732	754	795
Содержание воды CH ₂ O	f	Среднее	0,079	0,079	0,089	0,101	0,111
	D	Среднее	636	643	650	688	711
Старение			0,05 КОН/г	0,09 КОН/г	0,12 КОН/г	0,15 КОН/г	0,2 КОН/г
	f	Среднее	0,079	0,091	0,104	0,115	0,120
	D	Среднее	636	663	702	725	756

Сравнение представленных данных показывает, что влияние загрязнителей (Fe, SiO₂, H₂O) примерно одинаково увеличивает коэффициент трения при содержании 50 ppm на 13–14 % и при 100 ppm – на 38–43 %. Разница в приросте коэффициента трения у разных загрязнителей начинает проявляться более существенно при максимальной концентрации в 100 ppm. Минимальное значение коэффициента трения 0,109 при этой концентрации получено при загрязнении SiO₂, а максимальное – 0,113 при загрязнении порошком стали 40X. Влияние старения смазочной среды привело к наиболее интенсивному росту коэффициента трения в 1,52 раза по сравнению с исходным уровнем.

Изменение диаметра пятна износа оказалось наиболее чувствительно к составу загрязнителей. Наличие воды дало минимальный прирост данного показателя, составившего при 100 ppm 12 %. Твердые частицы SiO₂ и порошок стали 40X существенно увеличили диаметр пятна износа при максимальной концентрации в 100 ppm на 25 и 21 % соответственно. Старение смазочной среды в меньшей степени отразилось на росте диаметра пятна износа. Прирост этого показателя при достижении максимальной степени старения составил 18 %.

Для оценки возможности контроля трибологических параметров смазочной среды при наличии загрязнителей по показаниям диэлектрической проницаемости было выполнено обобщение полученных данных по коэффициенту трения и диаметру пятна износа с результатами замеров диэлектрической проницаемости. На рис. 2а приведен сводный график изменения коэффициента трения по значениям диэлектрической проницаемости при наличии в составе смазочной среды твердых частиц (Fe, SiO₂) и воды, а на рис. 2, б приведена зависимость коэффициента трения от диэлектрической проницаемости для проб масла, подвергшихся термоокислительному старению. Как в случае с загрязнителями, так и при росте степени окисления наблюдается четкая положительная линейная корреляция увеличения коэффициента с ростом диэлектрической проницаемости. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность применения метода измерения диэлектрической проницаемости для косвенной оценки ухудшения трибологических свойств смазочной среды как из-за наличия загрязнений разной природы, так и из-за химической деградации масла.

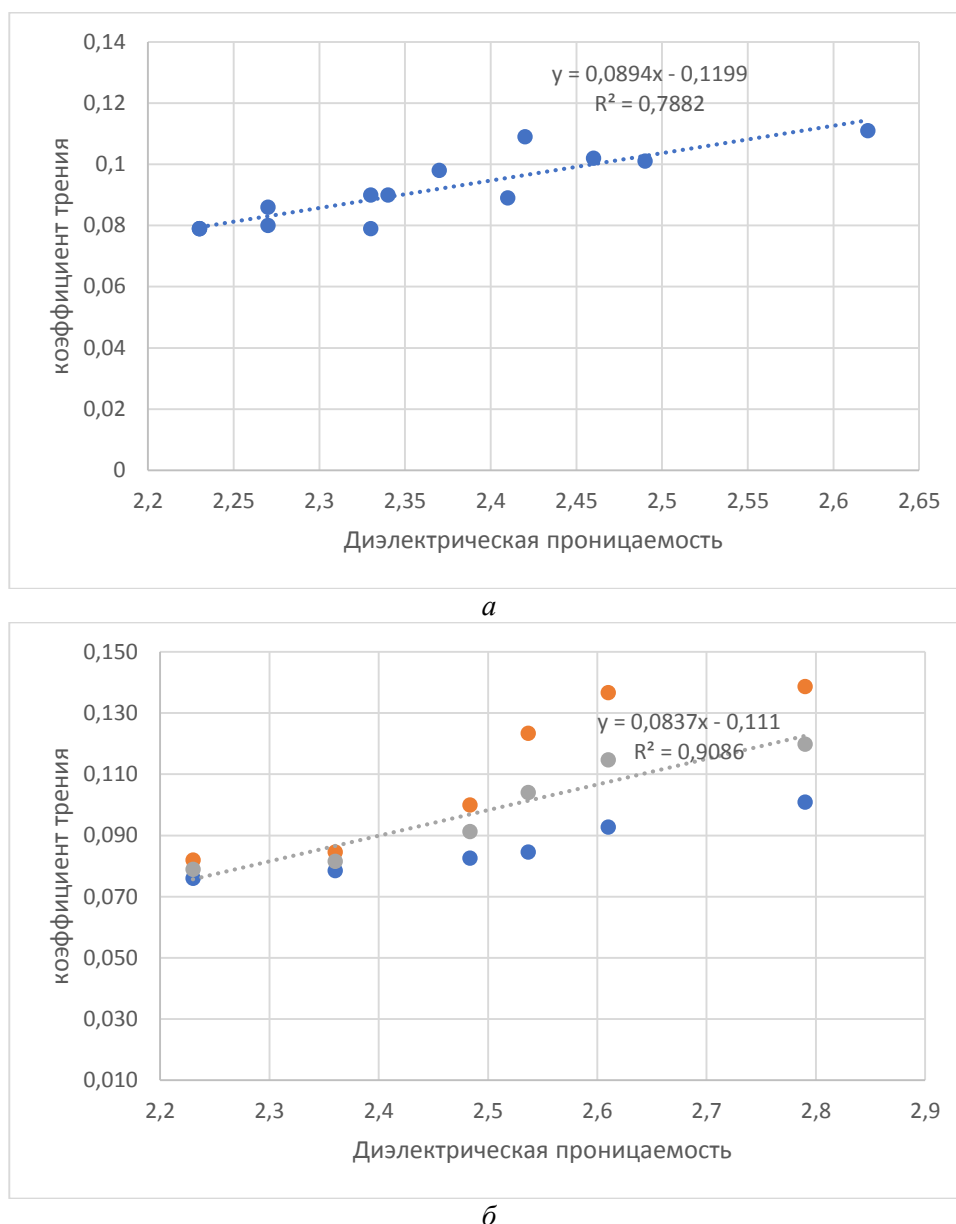


Рис. 2. Графические зависимости изменения коэффициента трения модельных составов турбинного масла ТП-22с в зависимости от величины диэлектрической проницаемости:
а – с загрязнителями, б – после старения

Анализ полученной графической зависимости показывает, что рост коэффициента трения связан с увеличением диэлектрической проницаемости и может быть косвенно определен на основе замеров данного показателя без проведения трибологических испытаний. При использовании линейной зависимости коэффициент трения может быть определен по значению диэлектрической проницаемости с коэффициентом регрессии не хуже 0,79, что указывает на наличие функциональной зависимости между исследованными факторами.

Анализ графика на рис. 3, а показывает, что обобщение разных видов загрязнений не обеспечивает наличие четкой корреляционной связи между диаметром пятна износа и диэлектрической проницаемостью смазочной среды. Влияние загрязнений на величину износа зависит не только от трибологических свойств смазки, но и от механических свойств частиц загрязнителей. Так наибольший вклад в величину износа при одинаковом значении диэлектрической проницаемости дает SiO₂, менее значительно на диаметр пятна износа влияет рост значений диэлектрической проницаемости порошка стали 40Х. Влияние воды и старения смазки на изменение пятна износа при росте диэлектрической проницаемости наименее выражено и отличается несущественно (рис. 3, б).

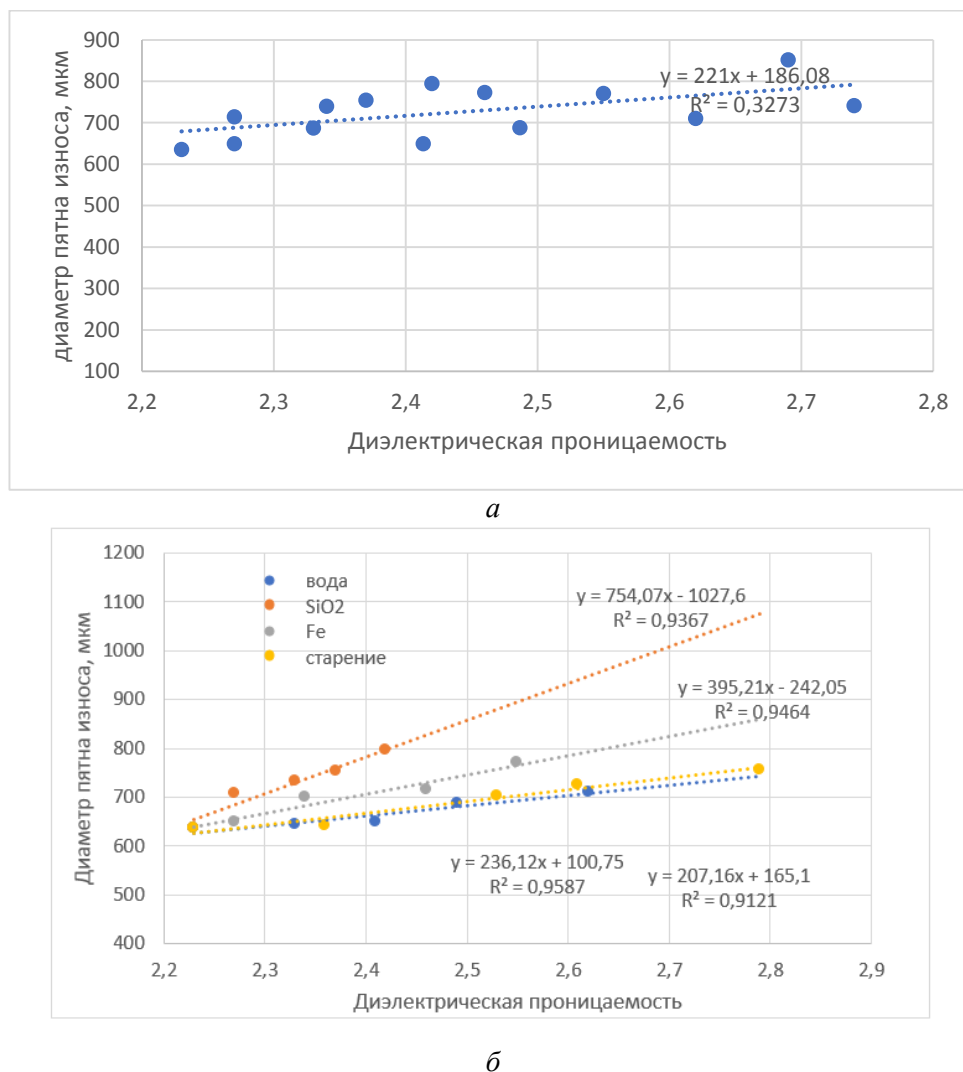


Рис. 3. Графические зависимости изменения среднего диаметра пятна износа (D) модельных составов турбинного масла ТП-22с в зависимости от величины диэлектрической проницаемости (ε):

а – сводный по всем загрязнителям и старению, *б* – по каждому загрязнителю и старению отдельно

В действующей нормативно-технической документации, регламентирующей ограничения по сроку эксплуатации смазочных материалов, отсутствуют требования к максимально допустимому коэффициенту трения. Данный параметр не включён в перечень обязательных критериев оценки работоспособности смазочных сред. Вместе с тем при лабораторных испытаниях смазочных материалов в качестве одного из ключевых показателей их триботехнических свойств используется критическое значение диаметра пятна износа (ПИ). Используя графики на рис. 3, б, можно определить предельное значение диэлектрической проницаемости, при которой величина пятна износа выходит за критическое значение. Использование данного подхода позволит контролировать изменение триботехнических характеристик узла трения и тенденцию к росту величины износа по результатам определения диэлектрической проницаемости и загрязнённости смазочной среды.

Выводы

1 Установлено, что диэлектрическая проницаемость (ε) турбинного масла ТП-22С является чувствительным параметром, демонстрирующим линейную зависимость роста при увеличении концентрации всех исследуемых загрязнителей (порошок стали 40Х, кварцевый песок, вода), а также при термоокислительном старении. Наибольшее влияние на рост ε оказывает наличие воды.

2 Все виды загрязнений и старение масла приводят к значительному ухудшению его трибологических характеристик: росту коэффициента трения (f) и диаметра пятна износа (D). Влияние старения на рост коэффициента трения оказалось наиболее существенным (в 1,52 раза), тогда на диаметр пятна износа сильнее всего повлияли твердые загрязнители.

3 Показано, что влияние загрязнений на величину диаметра пятна износа зависит не только от трибологических свойств смазки, но и от механических свойств частиц загрязнителей. Максимальный рост пятна износа при одинаковом значении диэлектрической проницаемости показывает SiO₂, а минимальный – наличие воды и старение смазочной среды.

4 С использованием построенных регрессионных моделей получена возможность определения предельного значения диэлектрической проницаемости, при которой величина пятна износа выходит за критическое значение, что подтверждает перспективность использования диэлектрической проницаемости в качестве косвенного диагностического параметра для оперативной оценки состояния узла трения.

Список литературы

- 1 **ГОСТ 33-2016.** Нефтепродукты и другие жидкости. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 24 с.
- 2 **ГОСТ 25371-2019 (ISO 2909:2015).** Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинематической вязкости. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
- 3 **ГОСТ 11362-96.** Нефтепродукты. Метод определения кислотного числа. – Москва : Стандартинформ, 1996. – 8 с.
- 4 **ГОСТ 19199-73.** Масла турбинные. Метод определения антикоррозионных свойств. – Москва : Стандартинформ, 1973. – 6 с.
- 5 **ГОСТ 4333-2014.** Нефтепродукты. Методы определения температуры вспышки в открытом тигле. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
- 6 **ГОСТ 20287-91.** Нефтепродукты. Метод определения температуры застывания. – Москва : Стандартинформ, 1991. – 8 с.
- 7 **ASTM D6481-24.** Standard Test Method for Determination of Phosphorus, Sulfur, Calcium, and Zinc in Lubrication Oils by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy. – West Conshohocken : ASTM International, 2024. – 10 p.
- 8 **ГОСТ 6370-83.** Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – Москва : Стандартинформ, 1983. – 10 с.
- 9 **ГОСТ 2477-2014.** Нефть и нефтепродукты. Метод определения воды. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
- 10 **ГОСТ Р 51069-97 (ИСО 3675-93).** Нефть сырая и нефтепродукты. Лабораторный метод определения плотности. – Москва : Стандартинформ, 1997. – 12 с.
- 11 **ГОСТ 6709-72.** Вода дистиллированная. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 1972. – 6 с.
- 12 **ГОСТ 5985-79.** Нефтепродукты. Методы определения кислотного и основного чисел. – Москва : Стандартинформ, 1979. – 8 с. / **ASTM D664-18e2.** Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2018. – 12 с. / **ASTM D974-22.** Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2022. – 14 p.

References

- 1 **GOST 33-2016.** Petroleum products and other liquids. Method for determining kinematic viscosity and calculating dynamic viscosity. – Moscow : Standartinform, 2016. – 24 p.
- 2 **GOST 25371-2019 (ISO 2909:2015).** Petroleum products. Calculation of viscosity index by kinematic viscosity. – Moscow : Standartinform, 2019. – 16 p.
- 3 **GOST 11362-96.** Petroleum products. Method for determining acid number. – Moscow : Standartinform, 1996. – 8 p.
- 4 **GOST 19199-73.** Turbine oils. Method for determining anticorrosive properties. – Moscow : Standartinform, 1973. – 6 p.
- 5 **GOST 4333-2014.** Petroleum products. Methods for determining flash point in an open crucible. – Moscow : Standartinform, 2014. – 12 p.
- 6 **GOST 20287-91.** Petroleum products. Pour point method. – Moscow : Standartinform, 1991. – 8 p.
- 7 **ASTM D6481-24.** Standard Test Method for Determination of Phosphorus, Sulfur, Calcium, and Zinc in Lubrication Oils by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy. – West Conshohocken : ASTM International, 2024. – 10 p.
- 8 **GOST 6370-83.** Oil, petroleum products and additives. Method for determining mechanical impurities. – Moscow : Standartinform, 1983. – 10 p.
- 9 **GOST 2477-2014.** Oil and petroleum products. Method for determining water. – Moscow : Standartinform, 2014. – 14 p.
- 10 **GOST R 51069-97 (ISO 3675-93).** Crude oil and petroleum products. Laboratory method for determining density. – Moscow : Standartinform, 1997. – 12 p.
- 11 **GOST 6709-72.** Distilled water. Technical specifications. – Moscow : Standartinform, 1972. – 6 p.
- 12 **GOST 5985-79.** Petroleum products. Methods for determining acid and base numbers. – Moscow : Standartinform, 1979. – 8 p. / **ASTM D664-18e2.** Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2018. – 12 p. / **ASTM D974-22.** Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2022. – 14 p.

13 **ГОСТ 9490-75.** Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод испытания на четырехшариковой машине трения. – Москва : Стандартинформ, 1975. – 14 с.

14 **Фролов, К. В.** Трение, износ и смазка (трибология) в машиностроении / К. В. Фролов, В. А. Белый. – Москва : Машиностроение, 2008. – 358 с.

15 **Вайсман, А. А.** Модификация поверхностей трения в условиях граничной смазки / А. А. Вайсман, Ю. Н. Дроздов // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 4. – С. 720–728.

16 **Паспорт качества № 25001701-ОЗСМ** на турбинное масло ТП-22С / ООО «Газпромнефть-СМ», Омский завод смазочных материалов. – Омск, 2025. – 2 с.

13 **GOST 9490-75.** Liquid and plastic lubricating materials. Test method on a four-ball friction machine. – Moscow : Standartinform, 1975. – 14 p.

14 **Frolov, K. V.** Friction, wear and lubrication (tribology) in mechanical engineering / K. V. Frolov, V. A. Bely. – Moscow : Mashinostroenie, 2008. – 358 p.

15 **Vaisman, A. A.** Modification of friction surfaces under conditions of boundary lubrication / A. A. Vaisman, Yu. N. Drozdov // Friction and wear. – 1985. – Vol. 6, No. 4. – P. 720–728.

16 **Quality certificate No. 25001701-OZSM** for TP-22C turbine oil / Gazpromneft-SM LLC, Omsk Lubricants Plant. – 2025. – 2 p.

M. S. Ignatov, O. Yu. Elagina

TRIBODIAGNOSTICS OF TP-22C TURBINE OIL

Abstract. The article presents the results of a study of the effect of various pollutants and thermo-oxidative aging on the dielectric constant and tribological properties of TP-22c turbine oil. It has been experimentally established that the introduction of contaminants such as 40X steel powder, quartz sand and water into the oil, as well as its aging process, lead to a statistically significant increase in dielectric constant and deterioration of antifriction characteristics – an increase in the friction coefficient and the diameter of the wear spot. A strong positive correlation was found between an increase in permittivity and an increase in the friction coefficient, which confirms the possibility of using permittivity measurement as an indirect method for rapid diagnosis of oil condition and predicting wear of friction units without complex tribological tests.

Keywords: tribodiagnostics, turbine oil, dielectric constant, coefficient of friction, wear spot, pollution, oil aging, condition monitoring.

For citation: Ignatov, M. S. Tribodiagnostics of TP-22c turbine oil / M. S. Ignatov, O. Yu. Elagina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 26–34. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_26.

Сведения об авторах

Игнатов Максим Сергеевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина ((РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина), кафедра «Трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования», аспирант, e-mail: maksig28@bk.ru

Елагина Оксана Юрьевна

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина ((РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина), кафедра «Трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования», доктор технических наук, профессор, e-mail: elaguina@mail.ru

Information about the authors

Ignatov Maxim Sergeevich

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Research University), Chair “Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment”, Postgraduate Student, e-mail: maksig28@bk.ru

Elagina Oksana Yurievna

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Research University), Chair “Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: elaguina@mail.ru