

УДК 621.314.212  
DOI:

Оригинальная статья

## Исследование влияния адсорбентов на концентрацию антиокислительных присадок трансформаторных масел

С. П. Высогорец\*

Акционерное общество «НПО «Стример», Санкт-Петербург, Российская Федерация  
\*e-mail: s-151075@yandex.ru

*Аннотация.* Статья посвящена вопросам исследования воздействия различных адсорбентов на компоненты трансформаторного масла силовых (авто)трансформаторов. Рассмотрена проблема влияния концентрации антиокислительной присадки ионов на процессы старения жидкого диэлектрика. Изложено воздействие протекающих окислительных процессов и образующихся продуктов старения масла на надежность силовых (авто)трансформаторов. Подготовлены рекомендации по нормированию предельных концентраций ионов в эксплуатационном трансформаторном масле. Представлены результаты исследований влияния адсорбентов на содержание антиокислительной присадки ионов в минеральном трансформаторном масле. Рекомендована новая стратегия применения адсорбентов в системах защиты изоляции силовых (авто)трансформаторов.

*Ключевые слова:* адсорбент, трансформаторное масло, антиокислительная присадка, силовой трансформатор, ресурс, надежность

*Финансирование.* Работа поддержана средствами АО «НПО «Стример» на 2024–2025 гг. Исследования адсорбционных материалов выполнены на базе лаборатории физико-химического и хроматографического анализа службы изоляции и защиты от перенапряжения производственного отделения «Южные электрические сети» филиала ПАО «Россети Северо-Запад» в Республике Коми (Сыктывкар).

*Конфликт интересов.*

*Вклад автора в публикацию.* С.П. Высогорец — постановка задачи, планирование эксперимента, анализ и написание статьи.

*Ссылка для цитирования:* Высогорец С.П. Исследование влияния адсорбентов на концентрацию антиокислительных присадок трансформаторных масел // *Известия Российской академии наук. Энергетика / Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics.* 2026. № 3. С. 112–122. <https://doi.org/>

DOI:

Original Article

## Study of the Influence of Adsorbents on the Concentration of Antioxidant Additives in Transformer Oils

S. P. Vysogorets\*

*Joint-Stock Company SPA Streamer, St. Petersburg, Russian Federation*

*\*e-mail: s-151075@yandex.ru*

*Abstract.* This article examines the effects of various adsorbents on the components of transformer oil in power (auto)transformers. The influence of the concentration of the antioxidant additive ionol on the aging process of the liquid dielectric is examined. The impact of ongoing oxidation processes and the resulting oil aging products on the reliability of power (auto)transformers is discussed. Recommendations for setting maximum ionol concentrations in operational transformer oil are prepared. The results of studies on the effect of adsorbents on the content of the antioxidant additive ionol in mineral transformer oil are presented. A new strategy for using adsorbents in insulation protection systems for power (auto)transformers is recommended.

*Keywords:* adsorbent, transformer oil, antioxidant additive, power transformer, service life, reliability

*Funding.* This work was supported by funds from JSC NPO Streamer for 2024–2025. The adsorption materials were studied at the physicochemical and chromatographic analysis laboratory of the insulation and surge protection service of the Southern Electric Networks production department of PJSC Rosseti North–West, a branch in the Komi Republic (Syktyvkar).

*Conflict of interests.*

*Author contribution.* S.P. Vysogorets — formulation of the problem, planning of the experiment, general supervision, discussion of the study results, analysis and writing of the article.

*For Citation:* Vysogorets S.P. Study of the Influence of Adsorbents on the Concentration of Antioxidant Additives in Transformer Oils. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika / Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics.* 2026, no. 3, pp. 112–122. (In Russ.)  
<https://doi.org/.....>

## ВВЕДЕНИЕ

В маслонаполненных силовых (авто)трансформаторах и шунтирующих реакторах (далее Т) качество залитого трансформаторного масла и процессы, происходящие в нем, вносят существенный вклад в общую надежность данного электрооборудования. В современной России используемые для заливки Т минеральные трансформаторные масла содержат антиокислительные присадки (ионол), от концентрации которых зависит устойчивость жидкого диэлектрика к окислению (противоокислительная стабильность). При этом применяемые в системах защиты изоляции Т (термосифонных и адсорбционных фильтрах) адсорбенты могут влиять на концентрацию данных присадок, что ведет к снижению их эффективности.

Изучение влияния адсорбентов на концентрацию антиокислительных присадок в трансформаторном масле является актуальной и важной задачей, решение которой позволит оптимизировать их использование с целью минимизации негативного воздействия.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА  
НА НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ (АВТО)ТРАНСФОРМАТОРОВ

В процессе эксплуатации маслонаполненного электрооборудования протекают процессы, связанные с изменением качества жидкого диэлектрика: минерального трансформаторного масла. Образующиеся продукты старения в трансформаторном масле влияют на деградацию бумажной изоляции обмоток, что приводит к снижению ее механической прочности и развитию дегидратации, приводящей к местному увеличению содержания влаги в изоляции, соответственно к ухудшению изоляционных характеристик [1, 2]. Развитие процессов деградации бумажной изоляции ведет к возрастанию риска витковых замыканий и повреждению Т при воздействии токов короткого замыкания, грозовых и коммутационных перенапряжений и даже под рабочим напряжением [2, 3, 4]. Вместе с этим в маслосборной изоляции ряда Т электрически наиболее нагруженными оказываются прослойки трансформаторного масла [3, 5]. Зачастую нарушение маслосборной изоляции начинается с пробоя масляного канала без полного пробоя изоляции, при этом в месте пробоя образуются необратимые повреждения электрокартона или бумаги, снижающие ее электрическую прочность [3]. Также в окисленном масле возрастает тангенс угла диэлектрических потерь жидкого диэлектрика ( $\text{tg}\delta_{\text{м}}$ ) и удельная проводимость. В бумаге и картоне, пропитанных жидким диэлектриком с повышением  $\text{tg}\delta_{\text{м}}$ , возрастают потери, соответственно увеличивается тепловыделение, что может привести к тепловому пробоям и местному перегреву изоляции [1, 3].

Важно отметить, что при снижении концентрации ионола в эксплуатационном масле ниже определенного предела начинается процесс интенсивного старения жидкого диэлектрика, обусловленный снижением стабильности против окисления. Снижение противоокислительной стабильности объясняется тем, что при малых концентрациях ионола в масле он перестает работать как ингибитор окисления и становится инициатором окисления [6, 7]. Согласно требованиям [6], эксплуатация трансформаторного масла с содержанием ионола ниже 0.1% массы недопустима ввиду высокой вероятности образования шлама и ухудшения эксплуатационных свойств масла.

Соответственно, концентрация ионола в эксплуатационном масле оказывает влияние на ресурс всей системы изоляции Т, а окислительные процессы, протекающие в трансформаторном масле основного бака Т, влияют на техническое состояние таких функциональных узлов, как изоляционная система и обмотки [8].

## ПОДБОР ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ АДСОРБЕНТОВ

В область исследования вошли адсорбенты разного типа (табл.), прошедшие перед каждым модельным испытанием термическую активацию до значений остаточного влагосодержания не более 0.5% массы. Термическая активация адсорбентов проводилась в течение пяти часов при следующих температурах: силикагели — 150°C; цеолиты — 350°C; активные оксиды алюминия — 250°C.

Исследуемый образец КСКГ относится к крупнопористым силикагелям, имеющим наибольший суммарный объем пор. Высокий суммарный объем пор позволяет адсорбенту удерживать больше вещества, что делает его более эффективным для удаления больших количеств адсорбтива. КСКГ — это силикагели, представленной формой диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), которые обладают высокой адсорбционной способностью по отношению к влаге и другим полярным молекулам, имеют крупнопористую структуру, что позволяет им адсорбировать крупные молекулы и газы [9, 10, 11]. Согласно требованиям [6], КСКГ используются для засыпки в термосифонные/адсорбционные фильтры Т (далее ТСФ/АДФ). При этом количество КСКГ, загружаемого в ТСФ/АДФ Т, различно (от 1.25 до 0.8% массы) и зависит от типа Т и количества залитого в него масла.

Исследуемые образцы NaA-ш и NaA-БС относятся к молекулярным ситам (цеолитам), обладают наибольшей удельной поверхностью и высокой селективностью в сравнении с крупнопористыми силикагелями и активными оксидами алюминия (табл.). Высокая удельная поверхность позволяет адсорбентам более эффективно адсорбировать вещества, так как большая площадь поверхности обеспечивает больше активных центров адсорбции. Так, изучаемая группа цеолитов — это синтетические цеолиты, которые представляют собой алюмосиликат натрия ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), обладающий уникальной кристаллической структурой, представленной упорядоченной кристаллической решеткой с микропорами, что позволяет им избирательно адсорбировать молекулы определенного размера [9, 11]. Цеолиты не применяют для засыпки в ТСФ/АДФ Т, однако широко используют в системах сушки масла перколяционного типа.

Исследуемые образцы АОА-ш, АОА JZ-K2 и АОА Alumac относятся к активным оксидам алюминия, которые по размеру удельной поверхности в некоторой степени уступают цеолитам, по суммарному объему пор близки к силикагелям. Активный оксид алюминия — это форма оксида алюминия ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), которая обладает высокой адсорбционной способностью к влаге и другим полярным молекулам, имеющая аморфную или частично кристаллическую структуру, что делает его менее селективным по сравнению с цеолитами натриевой формы [9]. Некоторые марки активного оксида алюминия рекомендованы [6] для регенерации масел.

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ МАСЛА  
РАЗЛИЧНЫМИ АДСОРБЕНТАМИ

В ходе исследований было установлено, что наиболее предпочтительным способом моделирования процессов восстановления масла в лабораторных условиях является контактный способ в отличие от перколяции. Так, контактный способ позволяет более гибко варьировать условиями моделирования процесса: время контакта адсорбента с маслом, температурой нагрева масла, массой используемого адсорбента. Таким образом, в ходе научных исследований была разработана методика обработки масла контактным способом, в состав которой вошли эмпирически

**Таблица.** Перечень исследуемых адсорбентов  
**Table.** List of adsorbents studied

Наименование адсорбента (страна изготовитель)	Фракция (форма зерна)	Сокращенное наименование	Примечание
Силикагель технический гранулированный крупнопористый марки КСКГ (Россия, ООО «Салаватский катализаторный завод», ГОСТ 3956-76)	3.8–7.2 мм (шарик)	КСКГ	Удельная поверхность $\approx 300\text{--}400\text{ м}^2/\text{г}$ . Суммарный объем пор $\approx 0.7\text{--}0.9\text{ мл}/\text{г}$ .
Цеолит марки NaA-ш (Россия, ООО «Компонент», ТУ 2163-016-64060206-2015)	3.0–5.0 мм (шарик)	NaA-ш	Удельная поверхность $\approx 700\text{--}800\text{ м}^2/\text{г}$ . Суммарный объем пор $\approx 0.25\text{--}0.35\text{ мл}/\text{г}$
Цеолит марки NaA-БС (Россия, ООО «Салаватский катализаторный завод» СТО 61182334-006-2011)	диаметр 4.3 мм $\pm 0.3\text{ мм}$ ; длина 4–13 мм (черенок)	NaA-БС	Удельная поверхность $\approx 700\text{--}800\text{ м}^2/\text{г}$ . Суммарный объем пор $\approx 0.25\text{--}0.35\text{ мл}/\text{г}$
Активный оксид алюминия марки АОА-ш (Россия, ООО «Компонент», ТУ 2013-017-64060206-2017)	3.0–5.0 мм (шарик)	АОА-ш	Удельная поверхность — $268\text{ м}^2/\text{г}$ . Суммарный объем пор $\approx 0.35\text{--}0.45\text{ мл}/\text{г}$
Активный оксид алюминия марки JZ-K2 (Китай, Shanghai Jiuzhou Chemicals Co. Ltd)	3.0–5.0 мм (шарик)	АОА JZ-K2	Удельная поверхность — $382\text{ м}^2/\text{г}$ . Суммарный объем пор — $0.417\text{ мл}/\text{г}$
Активный оксид алюминия марки Alumac AA-XR101-CN (Нидерланды, LogiTank Consultansy Co.)	3.0–5.0 мм (шарик)	АОА Alumac	Удельная поверхность — $353.5\text{ м}^2/\text{г}$ . Суммарный объем пор — $0.452\text{ мл}/\text{г}$

установленные оптимальные условия моделирования указанного процесса. В ходе модельных испытаний проводилось варьирование массы адсорбента (2) и 5% массы, а также температуры нагрева масла (25 и 60°C), что не противоречит [6, 12, 13, 14]. Важно отметить, что наибольшая температура нагрева 60°C подобрана исходя из ее соответствия допустимой температуре верхних слоев масла основного бака Т любого типа, независимо от системы охлаждения.

Также по разработанной в ходе исследований методике проводилась подготовка образцов минерального трансформаторного масла с заданными характеристиками:

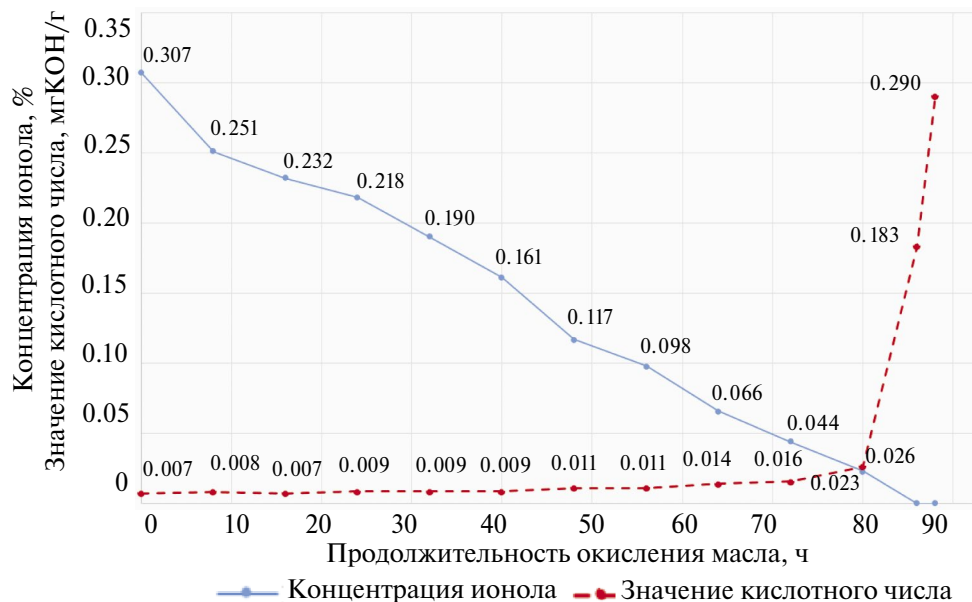
- высокая кислотность и высокая влажность;
- низкая кислотность и низкая влажность;
- низкая кислотность и высокая влажность;
- высокая кислотность и низкая влажность.

На базе данных образцов оценивалось влияние адсорбентов на параметры масла, в том числе концентрацию ионола.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АДСОРБЕНТОВ

В ходе отработки методики подготовки образцов трансформаторного масла с заданными характеристиками при искусственном окислении масла обнаружены критические концентрации ионола, влияющие на риск необратимого ухудшения качества масла (рисунок).

Искусственное старение масла проводили в лабораторных условиях. Для данного процесса была разработана специальная методика подготовки образцов трансформаторного масла с заданными значениями кислотного числа в широком диапазоне.



**Рис.** Изменение показателей качества масла при форсированном окислении  
**Fig.** Changes in oil quality indicators during forced oxidation

Согласно данной методике, в лаборатории проводили форсированное окисление исходного трансформаторного масла с измеренными показателями качества с учетом следующих требований: температура нагрева  $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  с барботированием воздухом, время окисления устанавливали по результатам контрольных измерений кислотного числа аликвот обрабатываемого масла после каждого цикла окисления. При достижении заданного значения по кислотному числу процесс окисления масла останавливали. Измерение кислотного числа и концентрации антиокислительной присадки ионов аликвот исследуемых образцов масла проводили по МКХА 05-09 [15] и МКХА 01i-2022 [16] соответственно.

В ходе лабораторного старения масла процесс снижения концентрации ионла был линейным до достижения 0.044%. Далее процесс окисления, фиксируемый по росту показателя «кислотное число» (далее — КЧ), ускорялся. При снижении концентрации ионла до 0.023% процесс окисления масла (рост КЧ) развивался лавинообразно.

Данное наблюдение определяет недопустимость эксплуатации Т с содержанием ионла менее 0.025%, что вызывает риск необратимого лавинообразного ухудшения качества масла с негативным воздействием на всю изоляционную систему Т. При этом в эксплуатационном масле предельно допустимой концентрацией ионла определено значение 0.045%, когда необходимо неотложное проведение мер по управлению процессами старения жидкого диэлектрика, набор которых определяется по результатам физико-химического анализа масла: показателям кислотное число, водорастворимые кислоты, тангенс угла диэлектрических потерь масла, содержание растворенного шлама, влагосодержание масла, класс промышленной чистоты.

Важно отметить, что стабилизация масла ионолом недопустима до регенерации масла (удаления из масла продуктов старения) [11], которую в ряде случаев можно выполнить на работающем Т с применением автоматизированных систем восстановления изоляции (далее — АСВИ) типа TRANSEC [17]. Количество необходимого для стабилизации масла ионла определяется по методике [12].

Предложенное предельное значение концентрации ионла (не менее 0.045%) целесообразно ввести в нормативную документацию [18, 19], дополнительно к существующему значению, ограничивающему область нормального состояния (не менее 0.1%).

В ходе исследований установлена различная активность исследуемых адсорбентов по отношению к ионлу. Так, исследуемая группа цеолитов (с размером входных окон 3–4 Å) не проявила влияния на концентрацию ионла, что согласуется с отмеченной селективностью по отношению к молекулам установленного размера [10]. Вместе с этим исследуемые крупнопористые силикагели и активные оксиды алюминия обнаружили адсорбционную активность к антиокислительной присадке масла.

Анализ изменения концентрации ионла во времени в ходе регенерации масла силикагелями указывает на то, что скорость адсорбции данной присадки протекает крайне медленно, что обусловлено низкой скоростью диффузии крупных молекул. Так, при продолжительности контакта КСКГ с маслом в течение восьми часов концентрация ионла снижалась незначительно: на 9% от исходного значения. Однако при увеличении времени контакта масла с силикагелем до 95 ч концентрация ионла снижалась существенно: на 21% от исходного значения.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что с ростом продолжительности контакта масла с силикагелями КСКГ нарастает количество извлекаемого

ионола: рост времени контакта в 12 раз приводит к увеличению количества извлекаемой антиокислительной присадки в два раза. При этом в присутствии значительного количества продуктов старения (в маслах более глубокой стадии окисления, на что указывает значительный  $tg\delta_m$ ), адсорбция ионола протекает менее активно в связи с тем, что, в условиях конкуренции за активные центры на поверхности адсорбента, молекулы ионола уступают более полярным продуктам окисления масла.

Важно отметить, что обнаруженное негативное влияние исследуемых КСКГ и активных оксидов алюминия, равно как и отсутствие негативного воздействия цеолитов на концентрацию ионола, является многократно эмпирически подтвержденным в ходе серии проведенных модельных испытаний.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СТРАТЕГИИ ПРИМЕНЕНИЯ АДСОРБЕНТОВ В СИСТЕМЕ ЗАЩИТЫ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ (АВТО) ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходя из установленных особенностей адсорбционной активности исследованных образцов адсорбентов по отношению к ионолу, целесообразно для новых Т в системах защиты изоляции запретить применение КСКГ ввиду их негативного влияния на химическую стабильность жидкого диэлектрика. Взамен морально устаревших ТCF/АДФ использовать АСВИ типа TRANSEC, наполненных цеолитами марки NaA.

Для эффективного управления изоляционными характеристиками на работающем Т при высокой кислотности эксплуатационного масла и нормативной влажности изоляции целесообразно применение АСВИ TRANSEC, наполненных силикагелями марки КСКГ. При этом после восстановления показателей качества масла оправдан переход на применение АСВИ TRANSEC с наполнением цеолитами марки NaA. При высокой влажности изоляции и нормативной кислотности масла Т необходимо использовать АСВИ TRANSEC, наполненные цеолитами марки NaA, что обеспечит сушку жидкого диэлектрика и/или твердой изоляции в условиях необходимой селективности к присадке. В случаях, когда изоляция Т обладает признаками избыточной влажности и кислотности одновременно, необходимо комбинированное применение цеолитов и силикагелей в системах АСВИ TRANSEC.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмечено важное влияние концентрации антиокислительных присадок минеральных трансформаторных масел на химическую стабильность и химическую стойкость жидкого диэлектрика Т.

Подготовлены рекомендации для внесения уточнений в [18, 19] в части нормирования предельно допустимого значения показателя качества эксплуатационного масла Т «Содержание антиокислительной присадки АГИДОЛ-1 (2,6-дитретбутил-4-метилфенол или ионол)» — не менее 0.045% массы. Установлено критичное значение концентрации ионола — менее 0.025% массы, при котором возникает высокий риск необратимого ухудшения качества масла с негативным воздействием на всю изоляционную систему Т.

В ходе исследований установлено, что применяемые в системах защиты изоляции Т силикагели марки КСКГ негативно влияют на концентрацию антиокислительных присадок, что приводит к снижению долговечности изоляции и общей

надежности электрооборудования. При этом существенное значение имеет время контакта силикагеля с маслом, а также стадия (глубина) окисления масла.

Современные технологии АСВИ типа TRANSEC позволяют изменить стратегию применения различных адсорбентов в зависимости от потребности, нивелируя сопутствующие проблемы негативного воздействия на ресурс жидкого диэлектрика. Преимуществом АСВИ перед морально устаревшими ТСФ/АДФ становится возможность применения как в отдельности, так и комбинированно цеолитов и силикагелей для защиты и/или восстановления изоляции на Т под нагрузкой.

Результаты представленных исследований могут быть использованы для усовершенствования конструкции Т, включая переход на более современные автоматизированные системы защиты изоляции, что обеспечит повышение надежности, долговечности, экономической и экологической эффективности эксплуатации данного электрооборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучинский Г.С., Кизиветтер В.Е., Пинталь Ю.С. *Изоляция установок высокого напряжения*. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
2. Львов М.Ю., Кутлер П.П. *Физико-химические методы в практике оценки состояния силовых трансформаторов в условиях эксплуатации*: учебно-методическое пособие. М.: ИУЭ ГУУ, ВИПК-энерго, ИПКГосслужбы, 2003. 20 с.
3. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. *Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах* / под общ. ред. В.П. Ларионова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
4. Соколов В.В. *Опыт обновления и продления срока службы мощных силовых трансформаторов*. Избранные труды / Сост. А.Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной. Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. С. 98–104.
5. Сви П.М. *Контроль изоляции оборудования высокого напряжения*. М.: Энергия, 1980. 113 с.
6. РД 34.43.105-89. *Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел*. М.: Технорматив, 2007. 51 с.
7. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. *Трансформаторные масла*. М.: «Энергоатомиздат», 1983. 296 с.
8. Приказ Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».
9. Шумяцкий Ю.И. *Адсорбционные процессы*: учеб. пособие — РХТУ им. Д.И. Менделеева. Москва, 2005. 164 с. [Электронный ресурс] URL: [https://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Magistratura/04.04.01/Metod\\_doc/Adsorbicija\\_i\\_adsorbicionnye\\_proces.pdf](https://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Magistratura/04.04.01/Metod_doc/Adsorbicija_i_adsorbicionnye_proces.pdf) (дата обращения: 25.10.2025).
10. Брек Д. *Цеолитовые молекулярные сита*. М.: Мир, 1976. 782 с.
11. Высогорец С.П. *Обеспечение надежности силовых трансформаторов на основе управления качеством масла*. Монография. СПб.: ПЭИПК, 2015. 117 с. ISBN 978-5-93630-945-8. УДК 621.314.222.6-192.
12. Высогорец С.П. *Совершенствование методологии физико-химического диагностирования масел наполненного трансформаторного оборудования*: дис. д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2020. 423 с.
13. Sybulski M., Przybylek P. Application of molecular sieves for drying transformers insulated with mineral oil, natural ester, or synthetic ester. *Energies*. 2021. No. 14. 1719 p.

14. Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Адсорбционная осушка трансформаторного масла на природных цеолитах. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2016. № 2 (30). С. 82–89.
15. МКХА 05-09 Методика измерений. Определение кислотного числа в трансформаторных маслах титриметрическим методом. (№ свидетельства об аттестации 253.0098/01.00258/2014; № ФР методики — ФР.1.31.2014.18228).
16. МКХА 01i-2022 Методика измерений массовой доли ионола в пробах энергетических масел методом газожидкостной хроматографии. (№ свидетельства об аттестации 241.0098/RA.RU.311866/2022; № ФР методики — ФР.1.31.2023.45170).
17. Высогорец С.П. Результаты экспериментального применения автоматизированных систем восстановления изоляции в составе конструкции маслonaполненных силовых (авто)трансформаторах разного габарита. *Научно-технический журнал «Энергия единой сети»*. 2024. № 1 (72). С. 44–51.
18. СТО 34.01-23.1-001-2017. *Объем и нормы испытаний электрооборудования*. г. Москва. 241 с. [Электронный ресурс] URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/b36/dowqrri80ps20qe1m21e1cu204yckykl.pdf>
19. РД 34.45-51.300-97. *Объем и нормы испытаний электрооборудования*. Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. 6-е изд., с изм. и доп. М.: ЭНАС, 2007. 256 с.

#### REFERENCES

1. Kuchinsky G.S., Kiziwetter V.E., Pinal Yu.S. *Insulation of high-voltage installations*. М.: Energoatomizdat, 1987. 368 p. (In Russ.)
2. Lvov M.Yu., Kutler P.P. *Physicochemical methods in the practice of assessing the state of power transformers under operating conditions: a teaching aid*. М. IUE GUU, VIPK-energo, IPKgosluzhby, 2003. 20 p. (In Russ.)
3. Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pinal Yu.S. *High Voltage Engineering: Insulation and Overvoltage in Electrical Systems*. Ed. V.P. Larionov. 3rd revised and enlarged edition. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 464 p. (In Russ.)
4. Sokolov V.V. *Experience in updating and extending the service life of powerful power transformers*. Selected works. Comp. A.G. Ovsyannikov, V.N. Osotov, V.N. Berezhnoy. Ekaterinburg: Publishing house “Autograph”, 2010. P. 98–104. (In Russ.)
5. Svi P.M. *Insulation control of high-voltage equipment*. М.: Energy, 1980. 113 p. (In Russ.)
6. RD 34.43.105-89. *Guidelines for the operation of transformer oils*. М.: Tekhnormative, 2007. 51 p. (In Russ.)
7. Lipshteyn R.A., Shakhnovich M.I. *Transformer oils*. М.: “Energoatomizdat”, 1983. 296 p. (In Russ.)
8. ORDER of the Ministry of Energy of Russia dated July 26, 2017, No. 676 “On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power transmission lines of electric power plants and electric networks”. (In Russ.)
9. Shumyatsky Yu.I. *Adsorption processes: textbook* — Mendeleyev University of Chemical Technology. Moscow, 2005. 164 p. [Electronic resource] URL: [https://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Magistratura/04.04.01/Metod\\_doc/Adsorbciya\\_i\\_adsorbionnye\\_proces.pdf](https://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Magistratura/04.04.01/Metod_doc/Adsorbciya_i_adsorbionnye_proces.pdf) (date of access: 25.10.2025). (In Russ.)
10. Breck D. *Zeolite molecular sieves*. М.: Mir, 1976. 782 p. (In Russ.)
11. Vysogorets S.P. *Ensuring the reliability of power transformers based on oil quality management*. Monograph — Collection: PEIPK, 2015. 117 p. ISBN 978-5-93630-945-8. UDC 621.314.222.6-192. (In Russ.)

12. Vysogorets S.P. *Improving the methodology of physicochemical diagnostics of oil-filled transformer equipment*: diss... Doctor of Engineering Sciences. St. Petersburg, 2020. 423 p. (In Russ.)
13. Cybulski M., Przybylek P. Application of molecular sieves for drying transformers insulated with mineral oil, natural ester, or synthetic ester. *Energies*. 2021. No. 14. 1719 p.
14. Gainullina L.R., Tutubalina V.P. Adsorption drying of transformer oil on natural zeolites. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2016. No. 2 (30). P. 82–89. (In Russ.)
15. Vysogorets S.P. Results of experimental application of automated insulation restoration systems in the design of oil-filled power (auto)transformers of different sizes. *Scientific and technical journal "Energy of the Unified Grid"*. 2024. No. 1 (72). P. 44–51. (In Russ.)
16. МКХА 05-09 Measurement procedure. Determination of acid number in transformer oils by titrimetric method. (Certification certificate no. 253.0098/01.00258/2014; FR procedure no. — FR.1.31.2014.18228). (In Russ.)
17. МКХА 01i-2022 Methodology for measuring the mass fraction of ionol in energy oil samples using gas-liquid chromatography. (Certification certificate no. 241.0098/RA. RU.311866/2022; Methodology FR no. FR.1.31.2023.45170). (In Russ.)
18. STO 34.01-23.1-001-2017. *Scope and standards for testing electrical equipment*. Moscow. 241 p. [Electronic resource] URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/b36/dowq-rii80ps20qe1m21e1cu204ycky1.pdf> (In Russ.)
19. RD 34.45-51.300-97. *Scope and standards for testing electrical equipment*. General editors: B.A. Alekseev, F.L. Kogan, L.G. Mamikonyants. 6th ed., with amendments and additions. Moscow: ENAS, 2007. 256 p. (In Russ.)

#### *Сведения об авторе*

Высогорец Светлана Петровна — д-р техн. наук, чл.-кор. АЭН РФ, директор по научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе автоматизированных систем восстановления изоляции АО «НПО «Стример», Санкт-Петербург, Российская Федерация  
e-mail: s-151075@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-4529-1184>

Поступила в редакцию 04.02.2026  
После доработки 06.04.2026  
Принята к публикации 28.04.2026

#### *About the Author*

Vysogorets, Svetlana P. — Ph.D. (Engineering), Corresponding Member, the Russian Academy of Economic Sciences, Director of Research and Development Work for Automated Insulation Restoration Systems JSC NPO Streamer, St. Petersburg, Russian Federation  
e-mail: s-151075@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-4529-1184>

Received February 04, 2026  
Revised April 06, 2026  
Accepted April 28, 2026