

Исследование влагоемкости адсорбентов, применяемых в системах защиты и сервиса силовых (авто)трансформаторов

С. П. Высогорец

АО «НПО «Стример», Санкт-Петербург, Россия

s-151075@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам подбора и исследования адсорбентов для их эффективного применения в системах защиты и сервиса изоляции силовых трансформаторов. На основе разработанных методик впервые эмпирически установлена влагоемкость адсорбентов в трансформаторном масле. Доказано наличие отличий влагоемкости адсорбентов в увлажненном трансформаторном масле и в атмосфере с повышенной относительной влажностью. Полученные влагоемкости адсорбентов в разных средах предложены для использования в качестве опорных значений в аналитических алгоритмах multifunctionальных автоматизированных систем восстановления изоляции силовых (авто)трансформаторов для цифровой индикации ресурса адсорбентов с целью недопущения процессов десорбции опасной влаги и обеспечения их своевременной замены/регенерации.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, автотрансформаторы, адсорбенты, влагоемкость, защита изоляции, автоматизированная система, сервис

Для цитирования: Высогорец С. П. Исследование влагоемкости адсорбентов, применяемых в системах защиты и сервиса силовых (авто)трансформаторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 5. С. 74–80. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-74-80.

Original article

Study of the Moisture Capacity of Adsorbents Used in Protection and Service Systems of Power (Auto) Transformers

S. P. Vysogorets

JSC NPO Streamer, Saint Petersburg, Russia

s-151075@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the issues of selection and research of adsorbents for their effective use in complex services and provision of power transformers. Based on the developed methods, the moisture capacity of adsorbents in transformer oil was empirically established for the first time. The existence of differences in the moisture capacity of adsorbents in humidified transformer oil and in an atmosphere with high relative humidity has been proven. The obtained moisture capacities of adsorbents in different environments are proposed for use as reference values in analytical algorithms of multifunctional automated systems for restoring the insulation of power transformers for digital indication of the resource of adsorbents in order to prevent the processes of desorption of hazardous moisture and ensure their timely replacement/regeneration.

Keywords: power transformers, autotransformers, adsorbents, moisture capacity, insulation protection, automated system, service

For citation: Vysogorets S. P. Study of the Moisture Capacity of Adsorbents Used in Protection and Service Systems of Power (Auto) Transformers // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 5. P. 74–80. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-74-80.

Введение. В последние годы одним из фламанов роста конкурентоспособности производственных компаний стала интеграция цифровых технологий в бизнес-процессы, где автоматизация позволяет сосредоточиться на более сложных задачах, улучшить рабочую среду (снизить физическую нагрузку и влияние вредных факторов на персонал), покрыть кадровый дефицит и, главное, снизить операционные расходы. Это обеспечило значительный интерес российского рынка к технологиям, позволяющим проводить управление изоляционными характеристиками маслонеполненных силовых (авто)трансформаторов и шунтирующих реакторов (далее Т) на оборудовании под нагрузкой щадящими методами в автоматическом режиме [1]. Данные автоматизированные системы восстановления изоляции (далее АСВИ) уже интегрированы в конструкцию и/или сервис порядка сотни Т в действующих электроустановках различных субъектов электроэнергетики. В 2025 г. появились первые в России Т с предустановленной системой АСВИ в условиях трансформаторного завода.

Учитывая, что эффективность технологий АСВИ существенно зависит от типа применяемого адсорбента и качества их подготовки, становятся актуальными вопросы изучения их адсорбционных свойств.

Мультифункциональные свойства технологии АСВИ. К группе оборудования АСВИ относятся модульные системы TRANSEC, представляющие собой мультифункциональные автоматические системы восстановления изоляции на Т под нагрузкой щадящими способами с цифровым управлением [2]. При стационарном применении АСВИ на крупногабаритном Т технология обеспечивает мониторинг изоляции и ее дополнительную защиту от воздействия всех источников влаги, а также продуктов окисления, что компенсирует недостатки существующих систем защиты Т.

Оснащение АСВИ системой мониторинга и управления обеспечивает автоматический режим работы технологии: функционирование и самодиагностику устройства, контроль комплекса параметров с формированием уведомительных сигналов и/или команд на отключение, архивирование потока данных, удаленное управление устройством и ретроспективный анализ его работы.

В конструкции АСВИ TRANSEC применяются резервуары адсорбции картриджного типа, т. е. в виде сменного элемента, легко устанавливаемого и заменяемого в действующей электроустановке на Т без формирования ремонтной схемы. Ре-

зервуары адсорбции АСВИ TRANSEC наполняются различными адсорбентами в зависимости от функционального назначения системы.

При наполнении резервуаров адсорбции синтетическими цеолитами, АСВИ проводит сушку твердой и жидкой изоляции Т. Сушка эксплуатационного масла осуществляется за счет перколяции, сушка изоляции обмоток Т – за счет диффузии влаги в осушенное масло с последующей перколяцией. Данный медленный способ сушки изоляции Т под нагрузкой обеспечивает равномерное высушивание всей активной части без негативного воздействия высоких температур и вакуума. При наполнении резервуаров адсорбции крупнопористыми гранулированными силикагелями, АСВИ проводит регенерацию изоляции от продуктов старения (окисления) перколяционным способом на Т под нагрузкой.

Конструкция АСВИ TRANSEC предусматривает комбинированное применение различных адсорбентов для решения задач восстановления изоляционных характеристик Т, имеющих признаки избыточного увлажнения и закисления одновременно. Возможность применения комбинаций различных адсорбентов позволяет значительно увеличить эффективность обработки изоляции на работающем Т.

Для обеспечения эффективной работы АСВИ становятся важными вопросы выбора подходящих адсорбентов.

Подбор адсорбентов для исследования. Традиционно, в морально устаревших термосифонных/адсорбционных фильтрах (далее ТСФ/АДФ) используются силикагели марки КСКГ для защиты изоляции от влаги и продуктов старения масла. Крупнопористые силикагели КСКГ (рис. 1, а), представлены формой SiO_2 и имеют наибольший суммарный объем пор (общий объем всех пор в адсорбенте): суммарный объем пор порядка 0.7...0.9 мл/г, при этом удельная поверхность составляет 300...400 $\text{м}^2/\text{г}$ [3]. Значительный суммарный объем пор позволяет КСКГ удерживать больше веществ, что делает его более эффективным для удаления значительных количеств адсорбтива. Высокая адсорбционная способность КСКГ по отношению к полярным молекулам и его крупнопористая структура позволяет адсорбировать крупные молекулы и газы [3]–[5]. Для исследований использован силикагель технический гранулированный крупнопористый марки КСКГ (далее КСКГ) форма зерна шарик фракция 3.8...7.2 мм производства ООО «Салаватский катализаторный завод» (Россия).

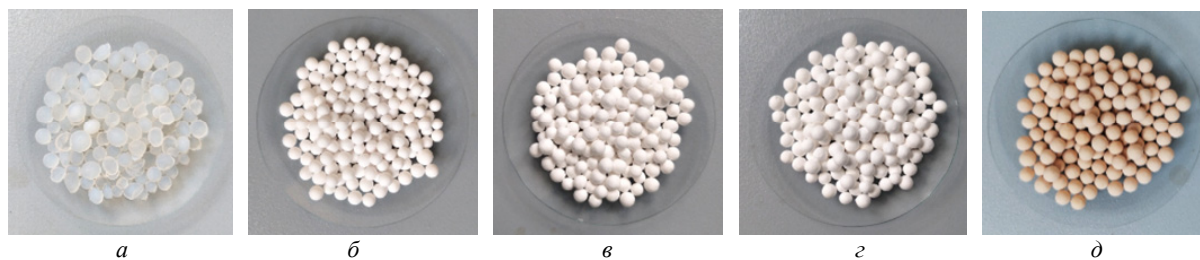


Рис. 1. Фотографии исследуемых адсорбентов: *a* – крупнопористый силикагель марки КСКГ (Россия); *б* – активированный оксид алюминия марки АОА-ш (Россия); *в* – активированный оксид алюминия марки JZ-K2 (Китай); *г* – активированный оксид алюминия марки Alumac AA-XR101-CH (Нидерланды); *д* – цеолит марки NaA-ш (Россия)

Fig. 1. Photographs of the studied adsorbents: *a* – large-pore silica gel of the KSKG brand (Russia); *б* – activated aluminum oxide of the AOA-sh brand (Russia); *в* – activated aluminum oxide of the JZ-K2 brand (China); *г* – activated aluminum oxide of the Alumac AA-XR101-CH brand (Netherlands); *д* – zeolite of the NaA-sh brand (Russia)

РД 34.43.105–89 «Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел», а также [6], [7] для регенерации масел рекомендованы активные оксиды алюминия (рис. 1, *б*, *в*, *г*), представленные формой γ - Al_2O_3 (первичный кристалл). Первичные кристаллы, в свою очередь образуют вторичные и третичные макроструктуры с образованием пор в диапазоне 10...100 Å (10^{11} ... 10^{12} м) [3], [8]. Таким образом, активные оксиды алюминия, имеющие аморфную или частично кристаллическую структуру [3], как и силикагели обладают высокой адсорбционной способностью к полярным молекулам. Суммарный объем пор исследуемых активных оксидов алюминия в среднем составляет 0.4 мл/г (зависит от изготовителя), что ниже КСКГ, при этом удельная поверхность близка КСКГ. Для исследований использованы следующие образцы активных оксидов алюминия (форма зерна – шарик, фракция 3.0...0 мм): активный оксид алюминия марки АОА-ш (далее АОА-ш) производства ООО «Компонент» (Россия); активный оксид алюминия марки JZ-K2 (далее АОА JZ-K2) производства Shanghai Jiuzhou Chemicals Co. Ltd (Китай); активный оксид алюминия марки Alumac AA-XR101-CH (далее АОА Alumac) производства LogiTank Consultansy Co (Нидерланды).

Традиционно для сушки минеральных масел методом перколяции применяются синтетические цеолиты (рис. 1, *д*) [4], [6], [9], представленные алюмосиликатом натрия ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), обладающие уникальной кристаллической структурой: упорядоченной кристаллической решеткой с микропорами. Особая кристаллическая структура цеолитов позволяет избирательно адсорбировать молекулы определенного размера. Синтетические цеолиты обладают наибольшей удельной поверхностью (в среднем 700...800 м²/г), что обеспечивает большее количество активных центров адсорбции

и позволяет адсорбенту более эффективно адсорбировать вещества [3], [4]. Для исследований использованы следующие образцы синтетических цеолитов: цеолит марки NaA-ш (шарик) (далее NaA-ш), форма зерна – шарик, фракция – 3.0...5.0 мм производства ООО «Компонент» (Россия).

Рассматриваемые группы адсорбентов имеют принципиальные отличия в части кристаллической структуры. Так, активный оксид алюминия и крупнопористые силикагели не образуют упорядоченной кристаллической структуры и поэтому характеризуются неоднородной пористостью. Распределение пор по диаметрам у частиц данных адсорбентов может быть как узким (от 20 до 50 Å), так и широким (от 20 до нескольких тысяч ангстрем). Исследуемые цеолиты типа 4А форма Na, имеют номинальный диаметр микропор (размер входного окна) 4 Å, максимально близкий к размеру молекулы воды. Эти поры не способны адсорбировать молекулы, размер которых превышает их диаметр [3]–[5].

Согласно ГОСТ 3956–76 «Силикагель технический. Технические условия», при относительной влажности атмосферы 100 %, нормируемая влагоемкость КСКГ не менее 70 %. При этом влагоемкость КСКГ в атмосфере при более низкой относительной влажности не нормируется, сведения о влагоемкости КСКГ в минеральном трансформаторном масле отсутствуют. Согласно ТУ 2013-017-64060206–2017 «Технические условия. Оксид алюминия активный АОА-ш (шарик)» влагоемкость АОА-ш при относительной влажности атмосферы 60 % составляет не менее 9 %, при относительной влажности атмосферы 10 % – не менее 3.5 %, при этом данные о влагоемкости в минеральном трансформаторном масле отсутствуют. Влагоемкость синтетических цеолитов 4А формы Na в процентном выражении в атмосфере не нор-

мируется, сведения по влагоемкости в трансформаторном масле отсутствуют. Вместе с этим, согласно данным [10], влагоемкость синтетических цеолитов при относительной влажности атмосферы 100 % может составлять порядка 20–24 %.

Для эффективного применения адсорбентов в системах защиты, обеспечивающих нормативную влажность изоляции маслonaполненных Т, необходимо владеть сведениями о влагоемкости данных адсорбентов в жидком диэлектрике. Достаточная влагоемкость адсорбентов в установленном температурном диапазоне влияет на эффективность работы технологий АСВИ в части сушки твердой изоляции Т. Понимание предельной влагоемкости адсорбента позволяет наладить контроль его ресурса с целью недопущения процессов десорбции опасной влаги и обеспечить своевременную замену адсорбента в АСВИ или иных системах защиты изоляции Т.

Результаты оценки влагоемкости адсорбентов в трансформаторном масле и в атмосфере. Оценку влагоемкости адсорбентов в трансформаторном масле и в атмосфере проводили эмпирически косвенным методом по разработанным методикам. При этом под адсорбционной влагоемкостью исследуемого адсорбента подразумевалась его способность вмещать и удерживать определенное количество воды. Перед исследованиями все образцы адсорбентов были высушены до значения остаточного влагосодержания ($W_{\text{ост}}$) не более 0.5 %.

Результаты эмпирического определения минимальной влагоемкости исследуемых образцов адсорбентов в трансформаторном масле с повышенным влагосодержанием ($W_{\text{м}} \geq 50$ г/т) и в атмосфере с повышенной относительной влажностью ($\phi \geq 90$ %) указаны в табл. 1.

На рис. 2 отображены зависимости влагоемкости адсорбентов от продолжительности выдержки в анализируемой среде.

Сравнивая динамику увлажнения образцов различных адсорбентов в атмосфере (рис. 2, б), можно сделать вывод, что скорость адсорбции паров воды из воздуха растет с увеличением размеров пор адсорбента: значения влагоемкости

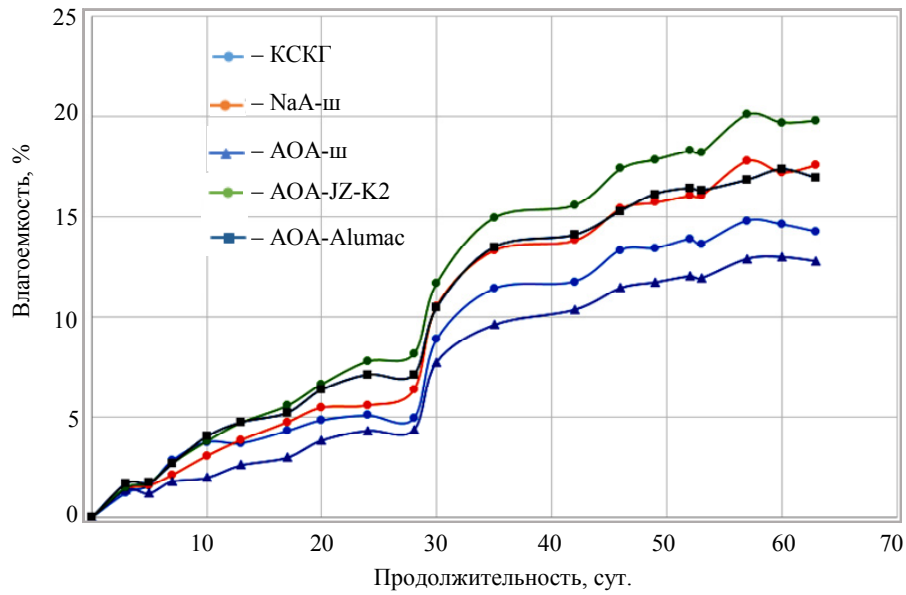
исследованных образцов адсорбентов, полученные при одинаковом времени выдержки, возрастают в ряду цеолиты → активированный оксид алюминия → крупнопористый силикагель. Наблюдаемые результаты отличаются от результатов, полученных для исследуемых адсорбентов при оценке влагоемкости в масле (рис. 2, а), что, вероятно, обусловлено влиянием состава и реологических свойств среды, из которой адсорбенты извлекают воду. Трансформаторное масло, как более вязкая среда, ограничивает диффузию адсорбируемых молекул и в целом снижает скорость адсорбции. Присутствующие в масле полярные молекулы конкурируют с молекулами воды, занимая часть активных центров на поверхности адсорбента, что также ограничивает скорость адсорбции воды, что особенно характерно для окисленных масел.

Также известно, что в составе силикагелей [11] и даже некоторых крупнопористых цеолитов [12] молекулы воды при адсорбции способны образовывать на внутренней поверхности пор адсорбентов кластеры за счет водородных связей между адсорбированными на активных центрах молекулами воды и молекулами последующих слоев, при этом влагоемкость достигает больших значений, чем в случае образования мономолекулярного слоя. В то же время, в случае цеолита типа NaA в [10] показано, что адсорбция воды из трансформаторного масла протекает по механизму мономолекулярной адсорбции, что связывают с малым размером пор.

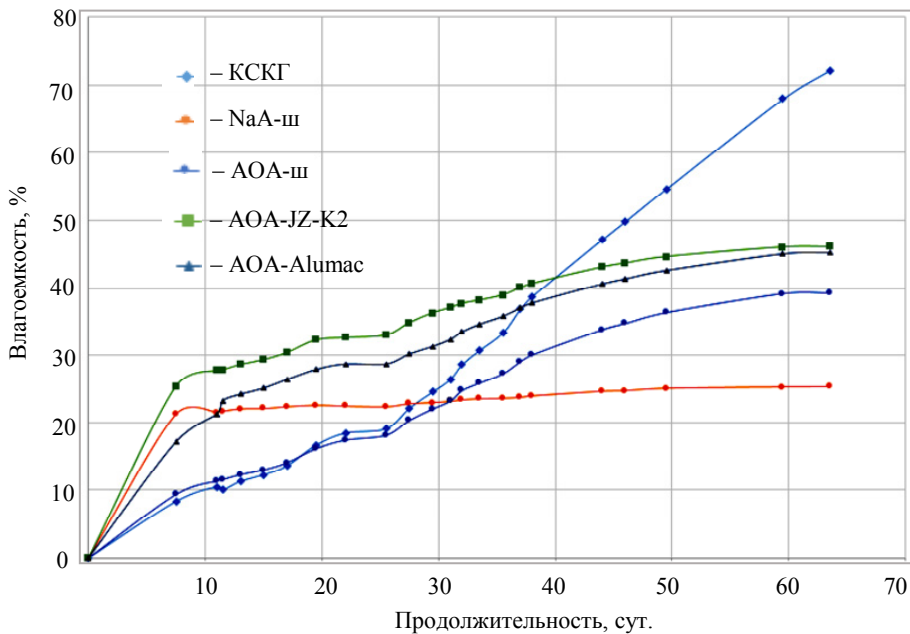
Таким образом, силикагель и активный оксид алюминия, имеющие достаточно крупный размер пор, при адсорбции воды из воздуха способны адсорбировать в единицу времени большее количество молекул воды на единицу массы, чем цеолит, во-первых, за счет большей проницаемости крупнопористых структур для воздуха и, во-вторых, за счет образования кластеров из молекул воды. В случае адсорбции из трансформаторного масла данное различие нивелируется из-за мешающего влияния компонентов масла, занимающих внутренний объем пор силикагеля и активного оксида алюминия, а также адсорбции конкурирующих полярных молекул.

Табл. 1. Эмпирически установленная влагоемкость адсорбентов в разных средах
Tab. 1. Empirically determined moisture capacity of adsorbents in different environments

Среда	Влагоемкость адсорбентов, не менее, %				
	КСКГ	NaA-ш	АОА-ш	АОА-JZ-K2	АОА – Alumac
В трансформаторном масле ($W_{\text{м}} \geq 50$ г/т)	15	18	13	20	17
В атмосфере ($\phi \geq 90$ %)	72	25	39	45	46



a



b

Рис. 2. Зависимость влагоемкости адсорбентов от продолжительности выдержки в разных средах: а – в трансформаторном масле с повышенным влагосодержанием; б – в атмосфере с повышенной относительной влажностью
Fig. 2. The dependence of the moisture capacity of adsorbents on the duration of exposure in different environments: a – in transformer oil with increased moisture content; б – in an atmosphere with increased relative humidity

Представленные результаты исследований получены впервые, целесообразно их эмпирическое подтверждение через организацию воспроизводимого эксперимента. Однако полученные значения влагоемкости адсорбентов в трансформаторном масле и в атмосфере согласуются с теоретическими предсказаниями, построенными на основе научного анализа комплекса публикаций [2]–[7], [9], [10]. Соответственно, представленные результаты оценки влагоемкости адсорбентов в

трансформаторном масле могут быть использованы как опорные значения в аналитических алгоритмах АСВИ для индикации ресурса адсорбентов.

Важно принять к учету, что поглощательная способность зависит не только от типа адсорбента, его пористой структуры, природы поглощаемого вещества, но и его концентрации, температуры [3]. Влияние качества масла (кислотности, влажности) и температуры на адсорбционную активность синтетических цеолитов и крупнопо-

ристых силикагелей изучены в последующих экспериментах.

Заключение. В последние годы становятся особенно актуальными автоматизированные цифровые решения, применяемые в системах сервиса Т. Для обеспечения эффективной работы АСВИ становятся важными вопросы выбора подходящих адсорбентов и наличие достоверной информации об их ключевых характеристиках.

Для исследований были подобраны образцы крупнопористых силикагелей, активных оксидов

алюминия и синтетических цеолитов, прошедшие предварительную термическую активацию.

В ходе серии проведенных экспериментов установлены существенные отличия влагоемкости адсорбентов в увлажненном трансформаторном масле и в атмосфере с повышенной относительной влажностью. Эмпирически полученные значения влагоемкости адсорбентов в разных средах согласуются с теоретическими предсказаниями и могут быть использованы как опорные значения в аналитических алгоритмах АСВИ для цифровой индикации ресурса резервуаров адсорбции (адсорбентов).

Список литературы

1. Развитие критериев влажности изоляции как следствие технологического прогресса в системе сервиса маслонаполненных трансформаторов / С. П. Высогорец, Д. М. Нестеренко, В. В. Лопатин, С. М. Редькин // Науч.-техн. журн. «Надежность и безопасность энергетики». 2022. Т. 15, № 4. С. 253–262. doi: 10.24223/1999-5555-2022-15-4-253-262.

2. Высогорец С. П. Результаты экспериментального применения автоматизированных систем восстановления изоляции в составе конструкции маслонаполненных силовых (авто) трансформаторах разного габарита // Науч.-техн. журн. «Энергия единой сети». 2024. №1 (72). С. 44–51.

3. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1984. 592 с.

4. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. М.: Мир, 1976. 784 с.

5. Высогорец С. П. Обеспечение надежности силовых трансформаторов на основе управления качеством масла. СПб.: ПЭИПК, 2015. 116 с.

6. Маневич Л. О. Обработка трансформаторного масла. М.: Энергия, 1975. 72 с.

7. Брай И. В. Регенерация трансформаторных масел. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1972. 165 с.

8. Чукин Г. Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Типограф. Паладин, ООО «Принта», 2010. 288 с.

9. Тутубалина В. П., Гайнуллина Л. Р. Осушка трансформаторного масла адсорбентами на электрических станциях / КазГЭУ. Казань, 2017. 114 с.

10. Cybulski M., Przybylek P. Application of molecular sieves for drying transformers insulated with mineral oil, natural ester, or synthetic ester // Energies. 2021. Vol. 14, no. 6. P. 1719. doi: 10.3390/en14061719.

11. Айлер Р. Химия кремнезема / пер. с англ. Л. Т. Журавлева, под ред. В. П. Прянишникова. В 2 ч. М.: Мир, 1982. 416 с.

12. Габуда С. П. Связанная вода. Факты и гипотезы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. 159 с.

Информация об авторе

Высогорец Светлана Петровна – д-р техн. наук, член-корр. АЭН РФ, директор по НИОКР АСВИ АО «НПО «Стример», Невский проспект д. 147, 17 Н, Санкт-Петербург, 191024, Россия.

E-mail: s-151075@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-4529-1184>

References

1. Razvitie kriteriev vlazhnosti izoljatsii kak sledstvie tehnologicheskogo progressa v sisteme servisa maslonapolnennykh transformatorov / S. P. Vysogorets, D. M. Nesterenko, V. V. Lopatin, S. M. Red'kin // Nauch.-tehn. zhurn. «Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki». 2022. T. 15, № 4. S. 253–262. doi: 10.24223/1999-5555-2022-15-4-253-262. (In Russ.).

2. Vysogorets S. P. Rezultaty eksperimental'nogo primeneniya avtomatizirovannykh sistem vosstanovlenija izoljatsii v sostave konstruktsii maslonapolnennykh silovykh (avto) transformatorakh raznogo gabarita // Nauch.-tehn. zhurn. «Energija edinoj seti». 2024. № 1 (72). S. 44–51. (In Russ.).

3. Keltsev N. V. Osnovy adsorbtsionnoj tehniki. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Khimija, 1984. 592 s. (In Russ.).

4. Brek D. Tseolitovye molekulyarnje sita. M.: Mir, 1976. 784 s. (In Russ.).

5. Vysogorets S. P. Obespechenie nadezhnosti silovykh transformatorov na osnove upravlenija kachestvom masla. SPb.: PEIPK, 2015. 116 s. (In Russ.).

6. Manevich L. O. Obrabotka transformatornogo masla. M.: Energija, 1975. 72 s. (In Russ.).

7. Braj I. V. Regeneratsija transformatornykh masel. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Khimija, 1972. 165 s. (In Russ.).

8. Chukin G. D. Stroenie oksida aljuminija i katalizatorov gidroobesserivanija. Mehanizmy reaktsij. M.: Tipografija Paladin, OOO «Printa», 2010. 288 s. (In Russ.).

9. Tutubalina V. P., Gajnullina L. R. Osushka transformatornogo masla adsorbentami na elektricheskikh stantsijah / KazGEU. Kazan, 2017. 114 s. (In Russ.).

10. Cybulski M., Przybylek P. Application of molecular sieves for drying transformers insulated with mineral

oil, natural ester, or synthetic ester // Energies. 2021. Vol. 14, no. 6. P. 1719. doi: 10.3390/en14061719.

11. Ajler R. Himija kremnezema: per. s angl. L. T. Zhuravleva, pod red. V. P. Prjanishnikova. V 2 ch. M.: Mir, 1982. 416 s. (In Russ.).

12. Gabuda S. P. Svjazannaja voda. Fakty i gipotezy. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1982. 159 s. (In Russ.).

Information about the author

Svetlana P. Vysogorets – Dr Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Academy Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, director of R & D at the AIRS JSC NPO Streamer, Nevsky Pr., 147, 17 N, St. Petersburg, 191024, Russia.

E-mail: s-151075@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-4529-1184>

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; принята к публикации после рецензирования 20.03.2026; опубликована онлайн 25.05.2026.

Submitted 28.01.2026; accepted 20.03.2026; published online 25.05.2026.
