

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.314.21

### Экономичный уход за трансформаторным маслом. Способы регенерации трансформаторного масла

Г.А. Лопатченко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### Аннотация

В статье рассматриваются современные методы регенерации трансформаторных масел, обязательных для поддержания их эксплуатационных свойств и экономической эффективности. Стремление ответить на вопрос о том, какие методы регенерации являются наиболее эффективными и экономически обоснованными, стало основной целью исследования. Для достижения этой цели проведён анализ существующих методов, таких как физические, химические и физико-химические, изучены их преимущества и недостатки. В результате работы выявлено, что комбинирование нескольких подходов, включая применение биосорбентов, существенно повышает эффективность регенерации и снижает затраты. Полученные результаты важны для улучшения эксплуатационных характеристик трансформаторных масел, что делает статью полезной для специалистов в области энергетики.

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, методы регенерации, адсорбция, биосорбент, примеси, силовой трансформатор

**Для цитирования.** Лопатченко Г.А. Экономичный уход за трансформаторным маслом. Способы регенерации трансформаторного масла. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(6):28–31.

### Cost-Efficient Approach to Maintenance of Dielectric Transformer Oil: Methods of Regeneration

Gleb A. Lopatchenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### Abstract

The article studies the modern methods of dielectric transformer oil regeneration necessary for maintaining its performance properties and cost-efficiency. The primary objective of the study was to determine the most relevant and cost-efficient regeneration methods. Therefore, the existing physical, chemical and physicochemical methods were analysed and their advantages and disadvantages were investigated. The study revealed the possibility to improve significantly the regeneration efficiency and reduce costs due to the combination of several approaches, including the use of biosorbents. These findings are important for improving the performance properties of transformer oils, therefore, the article could be of interest to the power industry specialists.

**Keywords:** dielectric transformer oil, regeneration methods, adsorption, biosorbent, impurities, power transformer

**For Citation.** Lopatchenko GA. Cost-Efficient Approach to Maintenance of Dielectric Transformer Oil: Methods of Regeneration. *Young Researcher of Don*. 2025;10(6):28–31.

**Введение.** Современные тенденции эксплуатации высоковольтного силового оборудования направлены на увеличение их технического ресурса, который существенно зависит от качества применяемого масла. В процессе обслуживания происходит повышение температуры, износ металла с поверхности деталей и поступление влаги из окружающего воздуха. Это приводит к старению масла: накапливаются примеси, происходит увлажнение, окисление и другие физико-химические изменения. Однако регулярная замена отработанного масла на новое представляет собой надежный, но далеко не экономичный процесс. Это также негативно сказывается на сокращении нефтяных ресурсов в стране в целом.

Цель данной работы заключается в анализе действующих методов регенерации масел, а также в выявлении основных недостатков для возможного комбинирования.

**Основная часть.** Прежде чем приступить к восстановлению свойств, трансформаторное масло защищают от окисления и увлажнения различными способами. Сначала проводится осмотр маслонаполненного оборудования на предмет течи и уровня масла. Затем, в соответствии с ГОСТ, отбирается масло в зависимости от времени его эксплуатации и уровня напряжения.

Одним из распространенных решений является установка фильтров на трансформаторе (рис. 1). Фильтрация может осуществляться при помощи силикагеля, который поглощает влагу и очищает масло перед попаданием в расширитель. В современное время применяется также термосифонные фильтры, основанные на разнице плотности, наряду с маслаочистительными системами. Преимуществом фильтров является их способность восстанавливать гидравлические свойства без необходимости демонтажа. Кроме того, для защиты масла используется азотная атмосфера, что снижает вероятность его контакта с воздухом. Однако эксплуатация азотных резервуаров также имеет свои недостатки. Как последний способ защиты применяется пленка, которая основана на герметизации масла трансформатора подвижной пленкой, помещаемой в расширитель.

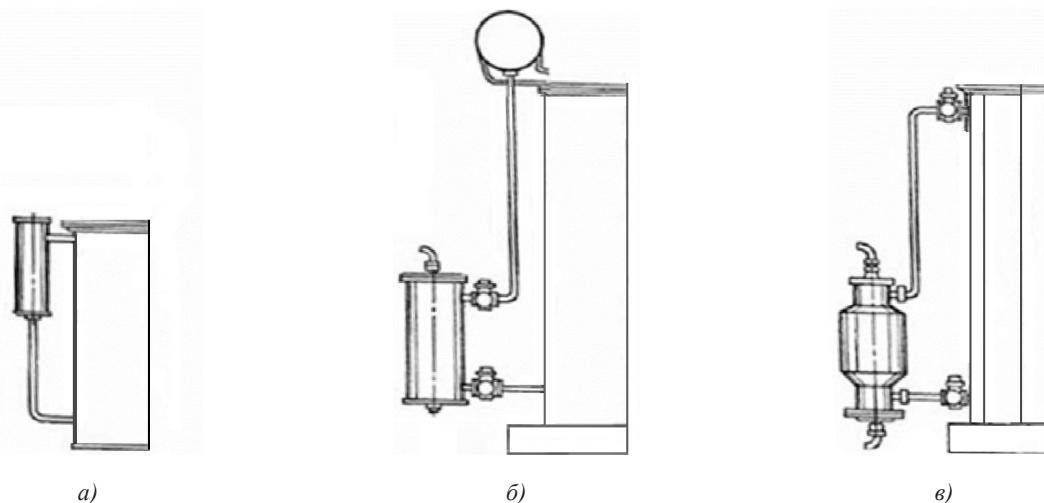


Рис. 1. Примеры расположения термосифонных фильтров на трансформаторах [1]:

*а* — присоединение без промежуточных кранов; *б* — присоединение через спускной патрубок расширителя;  
*в* — присоединение посредством фланцев на кожухе

Такие решения защиты трансформаторного масла объединяет расширитель трансформатора. Именно через него происходит охлаждение основного оборудования. Однако, несмотря на такие «защиты», масло всё равно окисляется и теряет свои свойства, поэтому далее необходимо осуществлять его регенерацию.

Регенерация масел является экономически рентабельной отраслью хозяйства. При правильной организации процесса стоимость восстановительных масел на 40–70 % ниже стоимости свежих масел при практически одинаковом качестве [2]. В последние годы наблюдается рост разнообразия методов восстановления свойств трансформаторного масла. Основными примерами средств обнаружения являются химический метод, физический метод и физико-химический метод.

**Химический метод** основывается на смешивании определённого реагента с объектом исследования. В результате такого взаимодействия уничтожаются частицы какого-либо вещества, что делает данный процесс необратимым. При введении  $H_2SO_4$  в масло образуется дисперсионная среда, после чего происходит полимеризация и окисление загрязняющих веществ. В масле происходит деление на две фазы: верхняя фаза — кислое масло, содержащее непредельные углеводороды, и нижняя фаза — кислый гудрон, включающий продукты реакции, избыток кислоты и механически увлечённое масло. Однако эта очистка не обеспечивает удаления полициклических аренов и высокотоксичных соединений хлора. Для повышения эффективности очистки следующим этапом добавляют щелочную кислоту, чаще всего тринатрий-фосфат или кальцинированную соду. Щёлочь взаимодействует только с органическими кислотами — продуктами старения, в результате чего образуются натриевые соли — мыла, которые легко растворяются в горячей воде. Завершающим этапом является отстой масла. Важно соблюдать технологические условия, использовать специальное оборудование и обеспечивать тесный контакт масла с воздухом при перемешивании. Также следует учитывать концентрации щелочей и температуры во избежание гидролиза или эмульсии.

**Физический метод** охватывает такие процессы регенерации, которые не затрагивают примеси на молекулярном и атомном уровнях, например, механические примеси, такие как смолистые, асфальтообразные и коксообразные вещества, микрокапли воды, углеводороды и прочее. Часто применяются методы отстойки, сепарации, фильтрации и отгонки горючего [2]. Масла проходят через теплообменные и массообменные процессы, обрабатываются в силовом поле с использованием гравитационных, центробежных, а реже электрических, магнитных и вибрационных сил [3].

Наиболее прост и дешев **метод отстаивания**. Эта процедура часто является начальным этапом в процессе комбинирования, но может использоваться и самостоятельно. Суть метода заключается в уравнении Стокса: скорость осаждения частиц зависит от их размеров, удельного веса и абсолютной вязкости. Метод базируется на химических определениях, согласно которым масло представляет собой дисперсионную среду, а примеси — дисперсную фазу. Несмотря на свою простоту, этот метод имеет множество недостатков, поскольку его эффективность зависит от размера примесей, интенсивности осаждения и свойств дисперсионной среды, что в свою очередь влияет на длительность процесса.

**Фильтрация** подразумевает удаление механических примесей и смолистых соединений путём пропускания масла через фильтры с сетчатыми или пористыми перегородками [4]. Главные преимущества этого метода заключаются в простоте конструкции и безопасности эксплуатации. Для создания фильтров используются разные материалы: ткани, бумага, металлические и пластиковые сетки. Однако всё чаще применяются полимерные материалы. Самоочищающиеся фильтры демонстрируют высокую эффективность, но в лабораторных условиях такой конструкции нет смысла.

**Метод центрифугирования**, основанный на высокой скорости вращения, эффективно разделяет трансформаторное масло с твёрдыми веществами. Этот способ является наиболее производительным для удаления механических частиц и воды, а также основан на разделении химических сред и фаз. В зависимости от свойств масла и степени загрязнения настраивается частота центрифуги и диаметр частиц цеолита. Однако большие затраты на такое оборудование представляют собой основной недостаток данного метода регенерации.

**Физико-химические методы** нашли широкое применение и включают в себя удаление неуглеводородных компонентов масла при помощи коагулянтов (метод коагуляции) либо контактными методами (адсорбция, ионно-обменная очистка). Процесс коагуляции зависит от количества вводимого коагулянта, продолжительности его контакта с маслом, температуры и эффективности перемешивания. Обычно продолжительность коагуляции составляет 20–30 минут, после чего можно очищать масло от крупных загрязнений с помощью отстаивания, центробежной очистки или фильтрации [4]. Ионно-обменный процесс происходит благодаря обмену ионов между раствором и растворителем. Большим минусом этого метода является его несовместимость с веществами, такими как нейтральные смолы или асфальтены. Для очистки применяется контактная очистка, где масло пропускается через сорбент. Адсорбционная очистка подразумевает использование адсорбентов, которые удерживают загрязняющие продукты на своей поверхности [5]. В качестве адсорбента чаще всего используется силикагель, что делает этот метод дорогостоящим. Применение адсорбента в движущемся слое позволяет осуществлять процесс непрерывно без остановок на замену.

Эффективность очистки масла от воды или механических примесей зависит от каждого метода регенерации. Адсорбционная очистка является наиболее эффективной для удаления влаги, но менее эффективна для технических примесей. Традиционная комбинация очистки масла включает отстаивание, адсорбцию и центробежную сепарацию. Однако важным нововведением является применение биосорбентов для адсорбции, что значительно увеличивает экономическую выгоду. Сложности, связанные с восстановлением адсорбентов, требуют дополнительного оборудования и покупки редких химических материалов. Применение адсорбентов, созданных из доступных природных материалов, обладающих большой адсорбционной способностью, предоставляет значительные преимущества. Глины различного химического состава обладают отбеливающими свойствами, однако их адсорбирующая способность зависит от структуры адсорбента. Используются также трепел из Зикеевского месторождения, бокситы и цеолиты, которые не уступают синтетическим материалам по качеству.

**Заключение.** В рамках данной научной работы рассмотрены основные методы восстановления свойств масла и экономическая выгода каждого из них. Необходимо анализировать известные и новые методы, позволяющие выявить наиболее эффективные подходы для обеспечения надежности и безопасности.

Рекомендации по выбору метода регенерации масла включают комбинированный метод очистки отработанного трансформаторного масла с применением сорбции на биосорбенте. Такой подход обеспечивает экономическую выгоду и увеличивает срок службы трансформаторного масла. Режимы работы свежих масел разнообразны, поэтому выбор оптимального метода регенерации требует аналитического подхода. Использование мобильных установок обеспечивает очистку на месте эксплуатации трансформатора и облегчает удаление воды и механических примесей.

#### Список литературы

1. Белецкий О.В., Лезнов С.И., Филатов А.А. *Обслуживание электрических подстанций*. Москва: Энергоатомиздат; 1985. 333 с.
2. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. *Трансформаторное масло*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат; 1983. 68 с.

3. Юсупов Д.Т., Ботиров А.Н., Рузиев С.Б. Эффективность существующих методов регенерации трансформаторного масла. *Молодой учёный.* 2017;(24):227.
4. Рылякин Е.Г., Волошин А.И. Очистка и восстановление отработанных масел. *Молодой учёный.* 2015;1(81):92.
5. Орипов С.Т., Тураева Х.Т. Теоретические основы адсорбционной очистки масел. *Вопросы науки и образования.* 2017;3(4):40–41.
6. Шашкин П.И., Брай И.В. *Регенерация отработанных нефтяных масел.* 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Химия; 1970.

***Об авторе:***

**Глеб Андреевич Лопатченко**, магистрант кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [gleb.lopatchenko.04@mail.ru](mailto:gleb.lopatchenko.04@mail.ru)

***Конфликт интересов:* автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

***Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.***

***About the Author:***

**Gleb A. Lopatchenko**, Master's Degree Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [gleb.lopatchenko.04@mail.ru](mailto:gleb.lopatchenko.04@mail.ru)

***Conflict of Interest Statement:* the author declares no conflict of interest.**

***The author has read and approved the final manuscript.***