

УДК 621.314.2

## Технология восстановления жидкой изоляции силового трансформатора

Т. П. Салихов\*, В. В. Кан, Д. Т. Юсупов

Увеличение рабочего ресурса силовых трансформаторов в условиях невозможности массовой замены установок со сроком службы свыше 30 лет — одна из наиболее актуальных и безальтернативных задач энергетической отрасли.

Надежность и длительность работы маслонаполненных трансформаторов во многом зависят от качества масла. В процессе эксплуатации силовых трансформаторов оно состаривается и теряет эксплуатационные качества. Следовательно, возникает необходимость замены, которая, однако, тоже не решает проблему очистки целлюлозной изоляции трансформатора. При загрузке свежего масла в силовой трансформатор класс чистоты масла ухудшается на несколько единиц. Это связано с состоянием целлюлозной изоляции. Целлюлоза накапливает на своей поверхности и в толще продукты старения. При замене изоляция «отдает» свежему маслу накопившиеся загрязнения и существенно снижает эффективность очистных мероприятий.

Цель работы заключается в апробации адсорбционной технологии очистки масла с применением керамических мембран для восстановления целлюлозной изоляции силового трансформатора. Масло очищается от продуктов старения и частиц механических примесей размером менее 5 мкм, составляющих 95% всех механических загрязнений.

Для проведения исследований были изготовлены партия многослойных керамических мембранных фильтроэлементов со средней пористостью 1 — 3 мкм и конструкция патронного фильтроаппарата для тонкой очистки трансформаторного масла на основе керамических мембран. Регенерация масла проводилась на лабораторном стенде, обеспечивающем циркуляционный режим адсорбционной очистки с постоянным выведением механических примесей, содержащихся в исходном масле, и загрязнений, появившихся при прохождении через адсорбент.

Рассмотрена макетная схема установки, позволяющей осуществлять промывку трансформатора и одновременную очистку циркулирующего масла. Применение метода очистки целлюлозной изоляции позволит существенно продлить срок службы трансформаторов и повысить экономическую и энергетическую эффективность промышленных объектов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, регенерация, трансформаторное масло, целлюлоза, механические примеси, класс чистоты, керамическая мембрана, мобильная установка.

---

\* salikhov.t@yandex.ru

Опыт эксплуатации силовых трансформаторов показал, что простая замена отработанного масла недостаточно эффективна. При загрузке свежего масла в трансформатор класс чистоты масла снижается на несколько единиц. Это связано с состоянием целлюлозной изоляции. Целлюлоза накапливает продукты старения масла и при его замене «отдает» свежему маслу накопившиеся загрязнения, чем существенно сокращает эффективность очистных мероприятий [1, 2]. Возможное применение метода многократного залива и слива требует наличия буферных емкостей для хранения частично загрязненного масла, объемы которого превышают загрузку трансформатора в несколько раз, и в последующем должны быть очищены. В целом это непрактично и затратно.

В настоящее время создан новый подход к продлению срока службы силовых трансформаторов, который предусматривает подачу масла из трансформатора в мобильную установку адсорбционной очистки и возврат очищенного масла обратно в корпус трансформатора.

Циркуляция чистого масла обеспечивает очистку целлюлозной изоляции и продлевает рабочий ресурс трансформатора.

По данным [3] однократная обработка трансформатора, отработавшего гарантированный срок эксплуатации (25 лет), замедляет деструкцию целлюлозы до скорости естественного старения и продлевает срок жизни целлюлозы и трансформатора в целом ориентировочно на 3 — 5 лет. Учитывая общий срок службы трансформаторов, это дает экономический эффект от 10 до 15% стоимости нового трансформатора [3].

Цель настоящей работы — апробация адсорбционного метода регенерации отработанного трансформаторного масла с использованием установки с керамическими мембранами и анализ его эффективности.

Образцы трансформаторного масла, работающего с 1976 г., были предоставлены СРП ОАО «Энерготаймир».

Практика производственной деятельности энергетических предприятий показывает, что для оценки загрязненности трансформаторного масла механическими примесями применяются весовой и визуальный методы контроля. Они позволяют получить информацию о массе примесей, но ни один из них не дает возможности оценить общий диапазон размеров частиц и тем более их распределение по размерам.

В то же время установки, использующие фильтроэлементы, центрифуги и различные адсорбенты, ориентированы на существующий ГОСТ 17216—2001 и способны очистить масло от загрязнителей размером 5 мкм и выше. Исследования последних лет [4] показали, что именно частицы, имеющие размер менее 5 мкм, наиболее опасны для функционирования трансформатора, так представляют примерно 95% от общего числа загрязнителей в масле и в основном являются продуктами окисления.

Первоначально в масле имеются очень мелкие частицы, образующиеся из примесей в сырой нефти или же при ее обработке. При изготовлении и сборке трансформатора в масло могут попасть волокна целлюлозы, частицы смол и металлов, пыль. При работе трансформатора их концентрация нарастает по мере старения материалов. Они разносятся по всему объему при принудительной циркуляции. В случаях местных перегревов и при частичных разрядах нарастают концентрации углеводородных частиц. В процессе эксплуатации трансформаторного масла происходит укрупнение коллоидных частиц, наблюдающихся уже у базового (заводского) масла. Дегградация масла приводит к тому, что за счет образования парамагнитных центров, вокруг которых сосредотачиваются молекулы с меньшими энергиями взаимодействия, происходит формирование коллоидных микрогетерогенных систем.

Исходные образцы отработанного масла были исследованы на содержание механических примесей. Для анализа проб использовался лазерный дифракционный анализатор частиц («Malvern, Ltd.»). Измерения показали, что основная доля механических примесей находится в субмикронном диапазоне размеров частиц — от 0,6 до 2 мкм. На рис. 1 представлено распределение механических примесей по размерам в исходном отработанном трансформаторном масле.

Электрофизические свойства исходного отработанного масла были исследованы в специализированной лаборатории СРП ОАО «Энерготаймир». В табл. 1 представлены результаты проведенного анализа.

**Таблица 1**

**Электрофизические свойства исходного отработанного масла**

№	Электрофизические свойства масла	Значение	
1	Пробивное напряжение	22,8 кВ	
2	Содержание воды	присутствует	
3	Механические примеси	не измерялось*	
4	Содержание взвешенного угля	присутствует	
5	Цвет	коричневый	
6	Содержание органических кислот (в мг КОН на 1 г масла)	0,0311 (норма до 0,02)	
7	Температура вспышки	147 °С (норма до 135 °С)	
8	Тангенс угла $\delta$ при	30 °С	2,05%
		70 °С	6,86%
		90 °С	13,0%
		(норма до 1,7%)	

\* лаборатория СРП ОАО «Энерготаймир» не располагает методами количественного определения механических примесей субмикронного уровня

Для проведения исследований авторами была изготовлена партия многослойных керамических мембранных фильтроэлементов со средней пористостью 1 — 3 мкм. Селективный слой керамических мембран формировался послойным нанесением на крупнопористую подложку керамической суспензии на основе 20 мкм порошка, и после просушки — суспензии на основе 5 мкм порошка. Образцы обжигались при температуре 1195 °С [5]. На рис. 2 представлена конструкция патронного фильтра для тонкой очистки трансформаторного масла.

Регенерация масла проводилась на лабораторном стенде, обеспечивающем циркуляционный режим адсорбционной очистки с постоянным выведением механических примесей, содержащихся в исходном масле, и загрязнений, появившихся при прохождении через адсорбент. На рис. 3 представлена схема адсорбционной очистки трансформаторного масла с использованием керамических мембран.

Регенерация трансформаторного масла осуществлялась по замкнутой схеме. Исходное отстаившееся масло из емкости 1 при комнатной температуре самотеком пропускать через цеолит 2 в нагревательную камеру 3. Из масла удалялась эмульгированная вода. Вентили 6 — 8 — открыты, что обеспечивает заполнение камеры 3. Масло в камере 3 нагревалось до 70 °С. Вентили 6, 8 — закрывались и включался вакуумный насос. За счет разрежения масло из камеры 3 последовательно прокачивалось через крупнопористый силикагель (КСКГ)

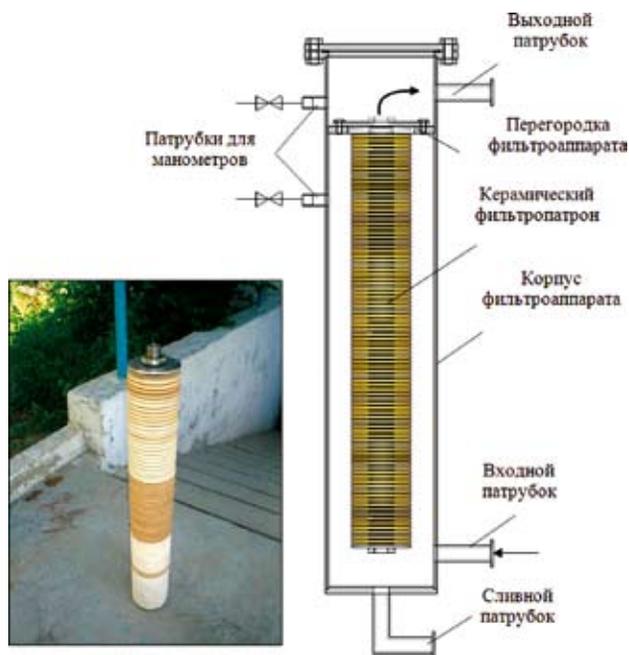


Рис. 2. Конструкция керамического фильтра для очистки трансформаторного масла

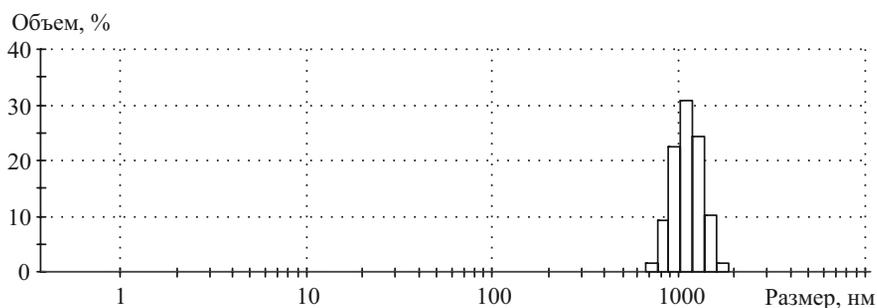


Рис. 1. Распределение механических примесей по размерам в исходном отработанном трансформаторном масле

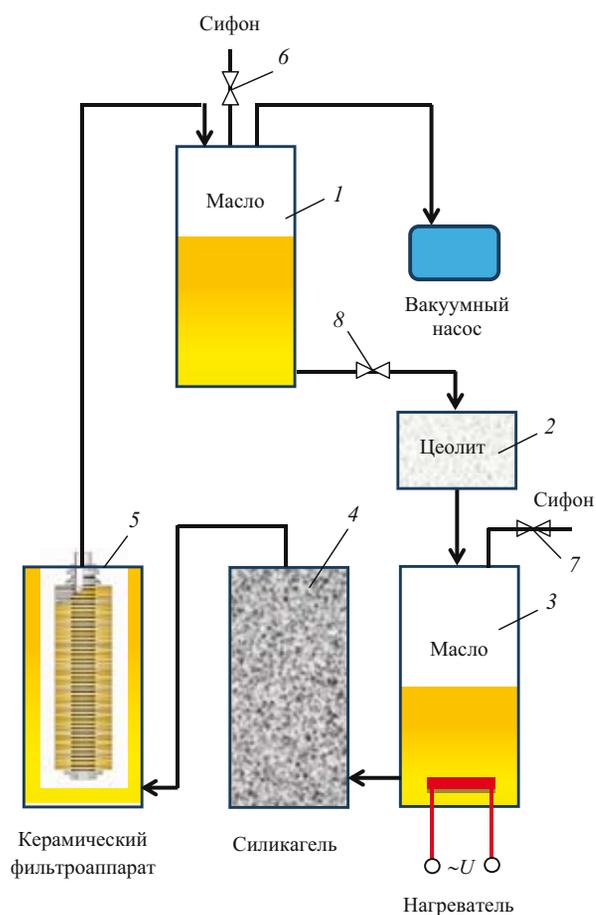


Рис. 3. Схема адсорбционной очистки трансформаторного масла с использованием керамических мембран

камеры 4 для удаления продуктов старения трансформаторного масла и керамические мембраны камеры 5 — для удаления механических примесей. В результате масло попадало в камеру 1, где вакуумировалось для удаления газов и остатков влаги. В дальнейшем процесс повторялся до достижения необходимой степени очистки. Оптимальные результаты были получены, когда суммарное время контакта адсорбентов с маслом составляло 4 часа.

В табл. 2 представлены результаты анализа пробы очищенного трансформаторного масла. Образец масла полностью соответствует требованиям ГОСТ 6370—83 [6].

Таблица 2

## Электрофизические свойства очищенного масла

№	Электрофизические свойства масла	Значение
1	Пробивное напряжение	60 кВ
2	Содержание воды	отсутствует
3	Механические примеси	отсутствуют
4	Содержание взвешенного угля	отсутствует
5	Цвет	желтый
6	Содержание органических кислот (в мг КОН на 1 г масла)	0,0185 (норма до 0,02)
7	Температура вспышки	151 °С (норма: до 135 °С)
8	Тангенс угла $\delta$ при	
	20 °С	0,05%
	70 °С	0,14%
	90 °С	0,22%
		(норма до 1,7%)

Следует отметить, что анализ очищенного масла на лазерном анализаторе частиц показал отсутствие «пика» в субмикронной области размеров. На рис. 4 представлены результаты измерений. Наблюдаемый в области  $< 1$  нм «пик» представляет собой распределение ассоциированных коллоидных частиц, характерное и для свежего базового трансформаторного масла.

Регенерация отработанного трансформаторного масла может производиться без слива его из основного оборудования [7]. В этом случае бак основного оборудования включается в технологическую схему и происходит очистка масла в режиме циркуляционной прокачки. Данный режим позволяет использовать адсорбционный метод регенерации масла через бак трансформатора для промывки изоляции и самого бака [8].

На рис. 5 приведена технологическая схема очистки масла и внутренней изоляции трансформатора. Пунктиром обозначены элементы мобильной установки, работающей следующим образом. В процессе циркуляции чистого масла, залитого в ремонтируемый

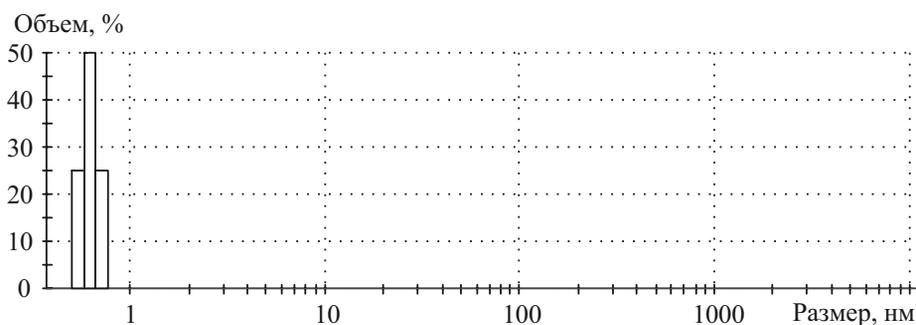


Рис. 4. Распределение частиц механических примесей в трансформаторном масле после очистки цеолитом + силикагелем и керамическими мембранами

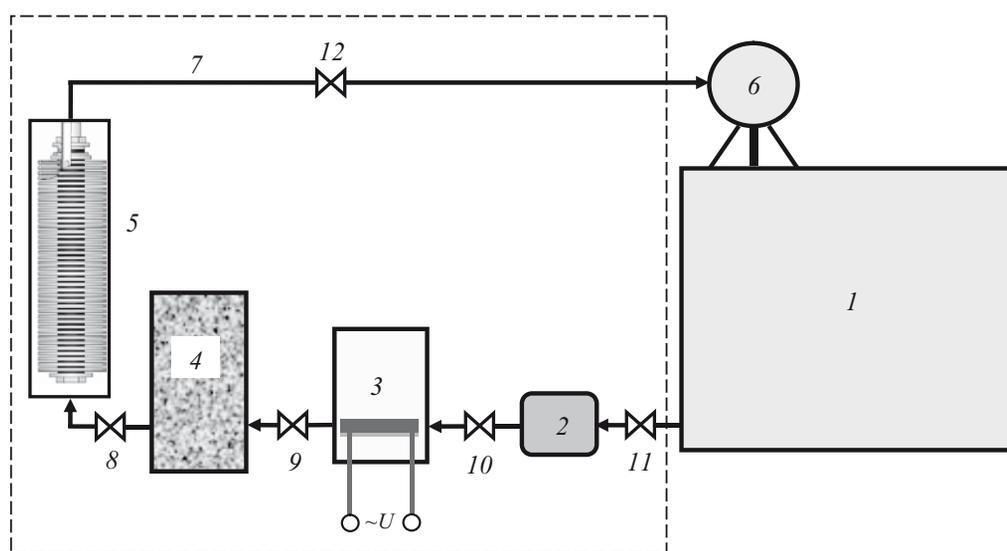


Рис. 5. Технологическая схема очистки масла и внутренней изоляции трансформатора:

1 — высоковольтный масляный трансформатор; 2 — циркуляционный маслонасос; 3 — электронагреватель масла; 4 — адсорбент (силикагель); 5 — керамический фильтроаппарат; 6 — расширительный бак трансформатора; 7 — соединительные трубопроводы; 8 — 12 — запорные вентили.

трансформатор, происходит промывка емкости и узлов изоляции. При этом в масло поступает значительное количество шлама. Благодаря циркуляции масла керамические мембраны обеспечивают непрерывный вывод механических загрязнений. Существенным преимуществом керамических мембран является возможность их регенерации. Масло из трансформатора 1 перекачивается циркуляционным маслонасосом 2 и попадает в электронагреватель масла 3. Нагретое до 70 °С отработанное трансформаторное масло подается в бокс с адсорбентами (силикагель) 4, где подвергается перколяционному воздействию и поступает в керамический фильтроаппарат 5. Потом очищенное масло подается в расширительный бак трансформатора, а затем направляется на второй цикл. Многократная циркуляция масла позволяет добиться необходимого уровня очистки.

## Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали эффективность применения керамических мембран для очистки трансформаторного масла от механических примесей субмикронного размера (0,6 — 2 мкм).

Комплексная очистка отработанного трансформаторного масла адсорбентами и керамическими мембранами со средней пористостью 1 — 3 мкм позволила получить масло, соответствующее всем требованиям [6].

Применение мобильных установок для адсорбционной очистки трансформаторного масла в циркуляционном режиме подключения к силовым трансформаторам существенно повысило экономическую и энергетическую эффективности промышленных энергетических объектов.

Своевременное проведение мероприятий по поддержанию стабильных характеристик изоляции путем удаления продуктов старения обеспечило требуемый уровень надежности работы силовых трансформаторов.

## Литература

1. **Львов М.** Силовые трансформаторы на 110 кВ и выше. Будущее определит диагностика // Новости электротехники. 2003. № 6 (24). [Электрон. ресурс]. <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/12.php> (дата обращения 12.04.2016).

2. **Прохоров Е.** Капитальный ремонт оборудования обходится на порядок дешевле, чем приобретение нового // Там же. [Электрон. ресурс]. <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/03.php> (дата обращения 12.04.2016).

3. **ООО «ТРИДЭКС ЦЕНТР»** [Электрон. ресурс]. [http://www.tridexcenter.com/ochistka\\_izolyacionnoj\\_sistemi\\_/](http://www.tridexcenter.com/ochistka_izolyacionnoj_sistemi_/) (дата обращения 12.04.2016).

4. **Курочкин А.С., Курочкин С.А., Львов Е.В., Осадчий В.Л.** Метод сверхглубокой очистки трансформаторного масла // Энергетика. Оборудование. Документация [Электрон. ресурс]. <http://forca.ru/stati/podstancii/metod-sverhglubokoy-ochistki-transformatornogo-masla.html> (дата обращения 12.04.2016).

5. **Салихов Т.П., Кан В.В., Уразаева Э.М., Саватюгина Т.В.** Технология получения керамических композиционных мембран из порошков разной дисперсности // Композиционные материалы». 2007. № 1. С. 54 — 59.

6. **ГОСТ 6370—83.** Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей.

7. **Долин А., Смекалов В., Першина Н., Смекалов С.** Силовые трансформаторы 35 кВ и выше. Технология продления ресурса изоляции // Новости электротехники. 2006. № 4 (40). [Электрон. ресурс]. <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/40/10.php> (дата обращения 12.04.2016).

8. **Салихов Т.П., Кан В.В., Юсупов Д.Т.** Метод циркуляционной промывки трансформаторов с использованием адсорбентов и керамических мембран // Илмий-техника журналы. 2014. № 4. С. 62 — 66.

*Статья поступила в редакцию 23.09.2015*