

Салихов Темур Паттахович, д-р техн. наук, проф.; Тел: +998(93) 2 34 81 80; E-mail: salikhov.t@yandex.ru
Кан Валерий Викторович, стар. науч. сотр., канд. техн. наук; Тел: +998(93) 2 34 81 80;
E-mail: valery-kan1957@yandex.ru

Институт материаловедения Академии Наук Республики Узбекистан

Юсупов Дилмурод Турдалиевич, млад. науч. сотр.; Тел: +998(93) 3 91 69 86; E-mail: dilmurod85@list.ru
Институт энергетики и автоматики Академии Наук Республики Узбекистан

АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА СИЛИКАГЕЛЕМ В СОЧЕТАНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ МЕМБРАН

В статье приведены результаты регенерации отработанного масла силового трансформатора с длительной эксплуатацией. Рассмотрены способы адсорбционной очистки трансформаторного масла. Для оценки загрязненности трансформаторного масла механическими примесями была применена стандартная методика ГОСТ 6370-83, которая предусматривает фильтрацию масла через бумажный фильтр и весовое определение общего количества фильтрата. Определено, что указанный метод не даёт возможности оценить общий диапазон размеров частиц и их распределение по нескольким выбранным диапазонам размеров. Обосновано, что эта методика также не даёт возможности классифицировать чистоту масла по принятым классам чистоты ГОСТ 17216-2001. Между тем, электрическая прочность масла существенным образом зависит не только от количества, но и от размеров частиц. В связи с тем, что данные о фактически наблюдаемых размерах частиц механических примесей в масле трансформаторов при введении в работу и при эксплуатации в литературе практически отсутствуют, в работе проведены исследования трансформаторного масла на объектах АК «Узбекэнерго» (СРП ОАО «Энерготамир»). Приведены результаты экспериментальной очистки трансформаторного масла от различных видов примесей с применением разработанных керамических мембран. Очищенное масло показало высокие диэлектрические свойства, и вполне соответствовало требованиям нормативных документов. Обосновано, что наиболее перспективным методом является адсорбционная очистка масла в движущемся слое адсорбента, при котором процесс протекает непрерывно, без остановки для периодической замены, регенерации или фильтрования адсорбента. Предложена схема создания мобильной установки на базе керамических мембран, которая позволит регенерировать масла на месте эксплуатации силового трансформатора.

Ключевые слова: *силовой трансформатор, трансформаторное масло, регенерация, адсорбционная очистка, силикагель, керамическая мембрана, примеси.*

Саліхов Темур Паттахович, д-р техн. наук, проф.; Тел: +998(93) 3 91 69 86; E-mail: salikhov.t@yandex.ru
Кан Валерій Вікторович, стар. навч. співр., канд. техн. наук; Тел: +998(93) 2 34 81 80;
E-mail: valery-kan1957@yandex.ru

Інститут матеріалознавства Академії Наук Республіки Узбекистан

Юсупов Дилмурод Турдалиевич, молодший. навч. співр.; Тел: +998(93) 3 91 69 86; E-mail: dilmurod85@list.ru
Інститут енергетики і автоматики Академії Наук Республіки Узбекистан

АДСОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА СИЛІКАГЕЛЕМ В ПОСДНАННІ КЕРАМІЧНИХ МЕМБРАН

У статті наведено результати регенерації відпрацьованого масла силового трансформатора з тривалою експлуатацією. Розглянуто способи адсорбційного очищення трансформаторного масла. Для оцінки забрудненості трансформаторного масла механічними домішками була застосована стандартна методика ГОСТ 6370-83, яка передбачає фільтрацію масла через паперовий фільтр і вагове визначення загальної кількості фільтрату. Визначено, що вказаний метод не дає можливості оцінити загальний діапазон розмірів частинок і їх розподіл по кільком обраним діапазонах розмірів. Обґрунтовано, що ця методика також не дає можливості класифікувати чистоту олії з прийнятими класами чистоти ГОСТ 17216-2001. Між тим, електрична міцність масла істотним чином залежить не тільки від кількості, але і від розмірів частинок. У зв'язку з тим, що дані про фактично спостережуваних розмірах частинок механічних домішок у маслі трансформаторів при введенні в роботу і при експлуатації в літературі практично відсутні, в роботі проведено дослідження трансформаторного масла на об'єктах АК «Узбекэнерго». Наведено результати експериментальної очищення трансформаторного масла від різних видів домішок із застосуванням розроблених керамічних мембран. Очищене масло показало високі діелектричні властивості і цілком відповідало вимогам нормативних документів. Обґрунтовано, що найбільш перспективним методом є адсорбційна очистка масла в рухомому шарі адсорбенту, при якому

процес протікає безперервно, без зупинки для періодичної заміни, регенерації або фільтрування адсорбенту. Запропоновано схему створення мобільної установки на базі керамічних мембран, яка дозволить регенерувати масла на місці експлуатації силового трансформатора.

Ключові слова: силовий трансформатор, трансформаторне масло, регенерація, адсорбційна очистка, силікагель, керамічна мембрана, домішки.

Salikhov Temur Petakovic, Dr. Techn. PhD, Professor, тел: +998(93) 3 91 69 86; E-mail: salikhov.t@yandex.ru
Kan Valery, old. scientific. et al., Cand. tech. Sciences, тел: +998(93) 2 34 81 80; E-mail: valery-kan1957@yandex.ru
Institute of material science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Yusupov Dilmurod Turdalieva, young. scientific. et al., Tel: +998(93) 3 91 69 86; E-mail: dilmurod85@list.ru
Institute of energy and automation Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

ADSORPTION PURIFICATION OF TRANSFORMER OIL SILICA GEL IN COMBINATION WITH CERAMIC MEMBRANES

The article presents the results of regeneration of waste oil power transformer with long-term operation. The methods of adsorption purification of transformer oil. To assess the contamination of transformer oil mechanical impurities, was applied the standard method GOST 6370-83, which includes filtration through a paper filter and gravimetric determination of total amount of filtrate. It is determined that the specified method does not allow to assess the overall range of particle sizes and their distribution across several size ranges. It is proved that this technique also makes it impossible to classify the cleanliness of oil according to the accepted purity classes GOST 17216-2001. Meanwhile, the electric strength of the oil significantly depends not only on quantity but also on the particle size. Due to the fact that data on observed sizes of the particles of mechanical impurities in the oil of transformers in the introduction to the work and exploitation in the literature are practically absent, in work researches of transformer oil at the facilities of JSC "Uzbekenergo" (PSA, JSC "Energotamir"). The experimental results purification of transformer oil from different kinds of impurities with application of the developed ceramic membranes. The purified oil showed high dielectric properties, and is consistent with the requirements of normative documents. It is proved that the most promising method is adsorption treatment of the oil in a moving bed of adsorbent, wherein the process operates continuously, without stopping for periodic replacement, regeneration or filtration of the adsorbent. The proposed scheme of creation of mobile units on the basis of ceramic membranes that will allow to regenerate oil at the place of operation of the power transformer.

Keywords: power transformer, transformer oil regeneration, adsorption treatment, silica gel, ceramic membrane, impurities.

Введение

Для оценки загрязненности трансформаторного масла механическими примесями используется стандартная методика ГОСТ 6370-83, которая предусматривает фильтрацию масла через бумажный фильтр и весовое определение общего количества фильтрата. Однако, указанный метод не даёт возможности оценить общий диапазон размеров частиц и тем более их распределение по нескольким выбранным диапазонам размеров. Эта методика также не даёт возможности классифицировать чистоту масла по принятым классам чистоты ГОСТ 17216-2001. Между тем, электрическая прочность масла существенным образом зависит не только от количества, но и от размеров частиц.

Данные о фактически наблюдаемых размерах частиц механических примесей в масле трансформаторов при введении в работу и при эксплуатации в литературе практически отсутствуют, поэтому представляется целесообразным провести исследования трансформаторного масла на объектах АК «Узбекэнерго» (СРП ОАО «Энерготамир»).

В зависимости от их происхождения мелкие частицы в масле трансформатора можно подразделить на три вида:

- примеси, находившиеся в масле при заливке трансформатора;
- примеси, попавшие в масло с частей трансформатора, куда они были занесены при изготовлении и сборке;
- примеси, образовавшиеся в процессе эксплуатации.

Первоначально в масле имеются очень мелкие частицы, которые образуются 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 концентрация таких частиц, как волокна целлюлозы, крупинки металла и смолы, нарастает по мере старения материалов. Они разносятся по всему объему при принудительной циркуляции масла. При местных перегревах и частичных разрядах нарастают также концентрации углеводородных частиц.

Экспериментальные исследования показали [1], что распределение примесей по размерам в трансформаторном масле обнаруживает тенденцию к смещению сторону субмикронных частиц.

Исследованиями также показали [2], что примеси, имеющие размер менее 5 мкм, являются наиболее опасными для функционирования силового трансформатора, так как они представляют примерно 95% от общего числа загрязнителей в масле и в основном являются продуктами окисления масла.

Анализ отказов силовых масляных трансформаторов с длительной эксплуатации показывает, что среди причин повреждений - увлажнение, загрязнение трансформаторного масла, в том числе продуктами старения [3]. Основным фактором, определяющим реальный срок службы силовых трансформаторов, является твердая изоляция, состояние которой существенно зависит от качества залитого эксплуатационного трансформаторного масла и процессов, протекающих в нем [4-5].

Основная часть

В связи с этим, актуальной задачей электроэнергетики является своевременная очистка масла силовых трансформаторов от различных видов примесей.

Целью работы является очистка трансформаторного масла от влаги, кислот, механической грязи, а также нежелательных компонентов, таких как непредельные углеводороды и асфальто-смолистые вещества.

Для регенерации отработанных масел применяют разнообразные технологические операции, основанные на физических, физико-химических и химических процессах [6].

В качестве технологических операций обычно соблюдается следующая последовательность методов:

- механический – для удаления из масла свободной воды и твердых загрязнений (фильтрация, центрифугирование, отстой);
- теплофизический – выпаривание, вакуумная перегонка;
- физико-химический – коагуляция, адсорбция;
- химический – если недостаточно первых предыдущих, он связан с применением более сложного оборудования и большими затратами.

В эксплуатационном трансформаторном масле содержится вода, образующаяся в процессе старения масла и изоляции, а также вода, попадающая в масло из окружающей среды. Вода является наиболее опасной примесью в масле, так как даже небольшие её количества значительно снижают пробивное напряжение трансформаторного масла.

Адсорбционный способ, суть которого заключается в очистке масел с помощью твёрдых пористых тел, называемых адсорбентами, является наиболее эффективным. Примеси задерживаются на поверхности и во внутренних порах адсорбентов.

Адсорбционная очистка может осуществляться одним из трёх способов:

1. Перколяционный;
2. Контактный;
3. Методом противотока.

При перколяционном способе отработанное масло фильтруется через слой зерненого адсорбента (чаще всего, силикагеля), загруженного в вертикальный цилиндрический сосуд.

При контактной очистке восстанавливаемое масло при 70-75оС контактирует (перемешивается) с порошкообразным адсорбентом в течение определённого времени, а затем освобождается от адсорбента на фильтре - прессе. Мелкая фракция адсорбента и температура обеспечивают достаточно высокую скорость массообмена, и очистка масла проходит быстро. К недостаткам контактной очистки следует отнести необходимость утилизации большого количества адсорбента, загрязняющего окружающую среду.

При третьем способе – масло и адсорбент движутся навстречу друг другу. Наиболее перспективным методом является адсорбционная очистка масла в движущемся слое адсорбента, при котором процесс протекает непрерывно, без остановки для периодической замены, регенерации или фильтрования адсорбента, однако, применение этого метода связано с использованием довольно сложного оборудования.

В качестве адсорбентов для осушки и очистки масел можно использовать: силикагель, окись алюминия, алюмосиликатные соединения, отбеливающие глины, синтетические цеолиты [7-8].

Авторами была изготовлена партия многослойных керамических мембранных фильтроэлементов со средней пористостью 3 мкм [8] и произведена очистка экспериментальных проб трансформаторного масла, полученных на объектах СРП «Энерготамбир». Селективный слой керамических мембран формировался послойным нанесением керамической суспензии на основе 20 мкм порошка, и после просушки - суспензии на основе 5 мкм порошка. Предварительная фильтрация масла керамическими мембранами позволила удалить механические примеси с угольными проводящими компонентами. Для оценки влияния угольной составляющей на пробойное напряжение был проведён анализ исходного отфильтрованного масла (табл. 1).

Таблица 1

Электрофизические свойства исходного отфильтрованного масла

№ п/п	Электрофизические свойства масла	Значение
1.	Электрическая прочность	35,5 кВ
2.	Содержание воды	Присутствует
3.	Механические примеси	Не определено
4.	Содержание взвешенного угля	Присутствует
5.	Цвет	Тёмно-коричневый
6.	Содержание органических кислот (в мг КОН на 1 г масла)	0,27 (Норма до 0,02)
7.	Температура вспышки	148оС (Норма до 135оС)
8.	Тангенс угла δ при 30оС	2,01%
8.1	Тангенс угла δ при 70оС	5,83%
8.2	Тангенс угла δ при 90оС	11,21%

Результаты исследования авторами отработанного масла на содержание мелкодисперсных механических примесей показали, что основная масса частиц находится в субмикронной области распределения (рис. 1). Это подтверждает предположение о том, что наиболее вредные частицы в трансформаторном масле – меньше 5 мкм. Результат был получен на лазерном дифракционном анализаторе частиц (фирма «Malvern Ltd»). Образец отработанного трансформаторного масла получен с объекта СРП ОАО «Энерготамбир» (с трансформатора, работающего с 1970 г.).

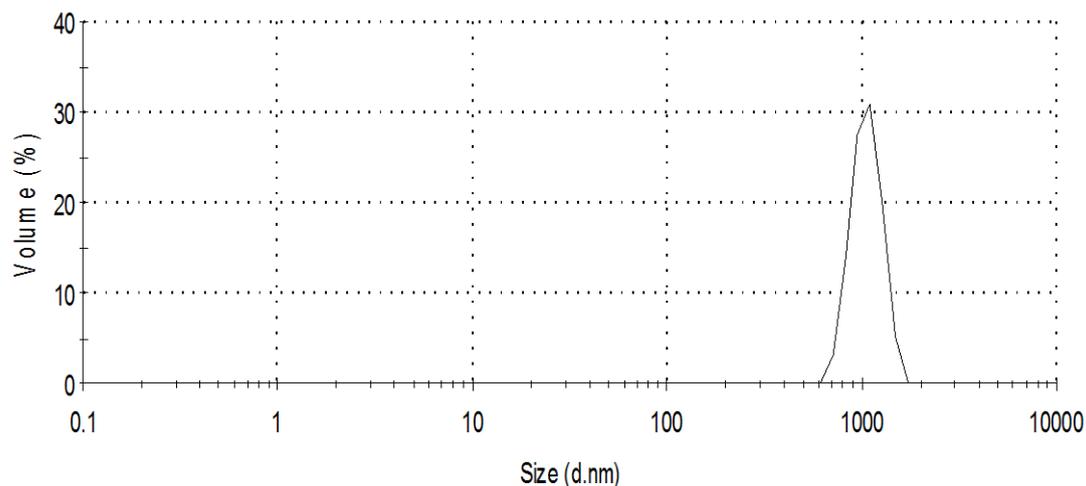


Рис. 1. Распределение механических примесей по размерам в трансформаторном масле

Регенерация отработанного масла осуществлялась по замкнутой схеме, разработанной авторами [9-10]. Очищенные от механических примесей образцы масла при температуре 50-70оС были пропущены через крупнопористый силикагель для удаления продуктов старения трансформаторного масла. Общее время контакта масла с адсорбентом составляло 4 часа. После адсорбента масло фильтровалось через керамические мембраны.

Анализ масла показал его высокие диэлектрические свойства (табл. 2), и масло вполне соответствовал требованиям нормативных документов РН 34-301-633:2011 и ГОСТ 6370-83.

Таблица 2

Электрофизические свойства очищенного масла (силикагель+мембрана)

№ п/п	Электрофизические свойства масла	Значение
1.	Электрическая прочность	60 кВ
2.	Содержание воды	Отсутствует
3.	Механические примеси	Отсутствует
4.	Содержание взвешенного угля	Отсутствует
5.	Цвет	Жёлтый
6.	Содержание органических кислот (в мг КОН на 1 г масла)	0,019 (Норма до 0,02)
7.	Температура вспышки	151,5оС (Норма до 135оС)
8.	Тангенс угла δ при 20оС	0,02%
	Тангенс угла δ при 70оС	0,10%
	Тангенс угла δ при 90оС	0,30% (Норма до 1,7%)

В процессе исследований проводился мониторинг спектрального коэффициента пропускания трансформаторного масла для оценки его визуальной прозрачности в видимом диапазоне спектра. На рис. 2 показаны спектральные зависимости коэффициентов пропускания трансформаторного масла до очистки и после адсорбционной очистки (силикагель + керамическая мембрана).

Из графика видно, что адсорбционная очистка привела к существенному осветлению трансформаторного масла.

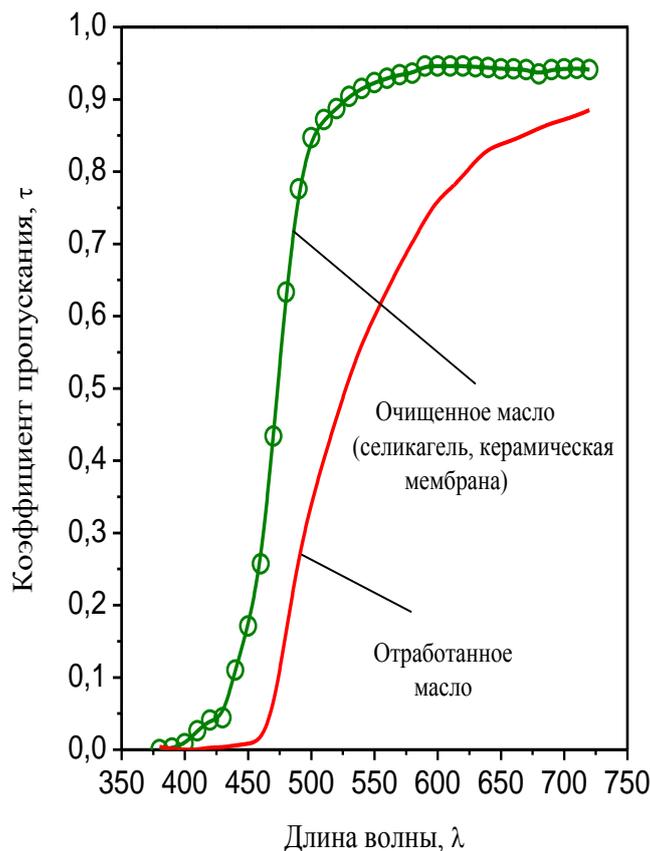


Рис. 2. Спектральные коэффициенты пропускания трансформаторного масла до очистки и после адсорбционной очистки (силикагель + керамическая мембрана)

Выводы

1. Распределение примесей по размерам в трансформаторном масле обнаруживает тенденцию к смещению сторону субмикронных частиц. Примеси, имеющие размер менее 5 мкм, являются наиболее опасными для функционирования силового трансформатора.
2. Своевременная очистка масла от различных видов примесей позволит продлить срок службы силовых трансформатора на несколько лет, что существенно повышает экономическую и энергетическую эффективность энергетических объектов.
3. Отличительной особенностью керамических мембранных фильтров перед бумажными фильтрами заключается в том, что их можно использовать несколько раз, т.е. они регенерируемые.
4. В настоящее время авторами разрабатываются мобильная установка на базе керамических мембран, которая позволяет регенерировать масла на месте эксплуатации силового трансформатора.

Список использованной литературы:

1. Каменчук Я. А., Писарева С. И. Изменение содержания ингибиторов окисления и парамагнитных центров в процессах старения нефтяных трансформаторных масел// Нефтехимия, № 5, 2006. С. 395–398
2. Курочкин А. С., Курочкин С. А., Львов Е. В., Осадчий В. Л. Метод сверхглубокой очистки трансформаторного масла <http://forca.ru/stati/podstancii/metod-sverhglubokoy-ochistki-transformatornogo-masla.html>

3. Соколов В. В. и др. Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов // – Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. – С. 22–30.
4. Высогорец С. П., Васильев А. П. Оценка качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 1/2013. – С. 84–92.
5. Черкашина В. В. Анализ эффективности методов оценки механической прочности целлюлозной изоляции высоковольтных трансформаторов // Интегрированные технологии и энергосбережение 4'2006. С. 32–36.
6. Горбунов Н. И. и др. Повышение эффективности регенерации отработанного масла//Вісник СевНТУ: зб, наук. пр. Вип. 122/2011. – С. 159–162.
7. Коваль Е. А. и др. Адсорбционная очистка отработанного трансформаторного масла с использованием промышленных монтмориллонит содержащих сорбентов // Известия Томского политехнического университета. № 3.2007. – С. 86–89.
8. Кипелов Б. Г., Мезенцев А. И. Контактная очистка отработанных трансформаторных масел отбеливающими землями зикеевского месторождения // Электро 5/2002. – С. 31–33.
9. Салихов Т. П., Кан В. В., Уразаева Э. М., Саватюгина Т. М., Арушанов Г. М., Кан С. Н., Юсупов Д. Т. Пористая структура керамических мембран для тонкой очистки технологических жидкостей нефтегазовой отрасли. Научно-технический журнал ФерПИ, 2015. № 3. С. 95–98.
10. Салихов Т. П., Кан В. В., Аскарлов Ш. Ш., Юсупов Д. Т. Экономические аспекты регенерации трансформаторного масла// Узбекский журнал Проблемы информатики и энергетики. 2014 г. № 3–4. С. 74–78.
11. Салихов Т. П., Кан В. В., Юсупов Д. Т. Метод циркуляционной промывки трансформаторов с использованием адсорбентов и керамических мембран// Научно-технический журнал ФерПИ. 2014. № 4. С. 62–66.

Referenses:

1. Kamenchuk Ja. A., PIsareva S. I. Izmenenie sodержaniya ingibitorov okisleniya s paramagnitnykh zentrov v protsessakh stareniya neftyanikh transformatornykh masel // Petrochemistry, № 5, 2006. С. 395–398
2. Kurochkin A.S., Lvov E. V., Osadchiy V. L. Metod sverchglubokoy ochistki trasformatornogo masla //http://forca.ru/stati/podstancii/metod-sverchglubokoy-ochistki-transformatornogo-masla.html
3. Sokolov V. V. et al. Voprosy otsenki i obespecheniya nadezhnosti silovykh transformatorov // – Ekaterinburg: A publishing house is «Autograph», 2010. – С. 22–30.
4. Vysokogorets S. P., Vasilev A. P. Otsenka kachestva ekspluatatsionnykh masel silovykh transformatorov napryazheniem 35-100 kV // the Scientific and technical lists of Cankt-Pe-terburgskogo of state polytechnic university 1/2013. – С. 84–92.
5. Cherkashina V. V. Analiz effektivnosti metodov otsenki mekhanicheskoy prochnosti tsellyuloznoy izolyatsii vysokovoltnykh transformatorov // Computer-integrated technologies and energy-savings 4'2006. С. 32–36.
6. Gorbunov N. I. et al. Incr Povyshenie effektivnosti regeneratsii otrabotannogo masla // Vicnik SEVNTU: zb, sciences. pr. Vip. 122/2011. – С. 159–162.
7. Koval Ye. A. et al. Adsorbtsionnaya ochistka otrabotannogo transformatornogo masla s ispolzovaniem promyshlennykh montmorillont sodержashshikh sorbentov// Information of the Tomsk polytechnic university // № 3.2007. – С. 86–89.
8. Kipelov B. G., Mezentsev A. I. Kontaktnaya ochistka otrabotannykh transformatornykh masel otbelivayushshimi zemlyami zikeevskogo mestorozhdeniya // Electro- 5. 2002. – С. 31–33.
9. Salikhov T. P., Kan V. V., Urazaeva E. M., Savatyugina T. M., Arushanov G. M., Kan S. N., Yusupov D. T. Poristaya struktura keramicheskikh membrane dla tonkoy ochistki tekhnologicheskikh zhidkostey neftegazovoyotrasli // Scientific and technical magazine of FerPI, 2015. № 3. С. 95–98.
10. Salikhov T. P., Kan V. V., Аскарлов Sh. Sh., Yusupov D. T. Ekonomicheskie aspekty regeneratsii transformatornogo masla // are the Uzbek magazine of Problem of informatics and energy. 2014 г. № 3–4. С. 74–78.
11. Salikhov T. P., Kan V. V., Yusupov D. T. Yusupov D. T. Metod tsirkulyatsionnoy promyvki transformatorov s ispolzovaniem adsorbentov i keramicheskikh membrane // the Scientific and technical magazine of FerPI. 2014. № 4. С. 62–66.

Прийнята до друку 24. 12. 2019