

03

## Электроконвективная очистка жидкого диэлектрика

© Г.М. Михеев, Г.М. Михеев, В.А. Тарасов, Т.Г. Михеева

ООО „Инженерный центр“, Чебоксары  
Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск  
E-mail: gmmikheev@udmnet.ru  
Чувашский государственный университет, Чебоксары

*В окончательной редакции 13 августа 2007 г.*

Показано, что трансформаторное масло (ТМ), содержащее большое количество взвешенных углеродных частиц, влаги и газов, можно очистить турбулентной электроконвекцией, возникающей в жидком диэлектрике за счет пондеромоторных сил в неоднородном переменном электрическом поле. Разработана и изготовлена простая конструкция, позволяющая осуществлять очистку отработанного ТМ в значительных объемах при небольших энергозатратах. Достигнуто увеличение пробивного напряжения диэлектрической жидкости с 70 до 215 kV/cm после двухступенчатой очистки.

PACS: 81.20.Ym

ТМ широко используется в качестве охлаждающей и электроизолирующей жидкости в различных элементах высоковольтного оборудования. В масляных выключателях [1] и в так называемых устройствах регуляторов под напряжением (РПН) [2] высоковольтных силовых трансформаторов за счет периодической работы дугогасительных контактов происходит постепенное разложение жидкого диэлектрика с образованием различных газов и взвешенных углеродных частиц. Это приводит к ухудшению его электроизоляционных показателей. Для регенерации отработанных жидких диэлектриков используются адсорбционные, вакуумные, мембранные, кислотные, щелочные и другие методы [3,4]. Однако все эти методы очистки являются довольно сложными, требуют значительных материальных и энергетических затрат при своей практической реализации. Целью данной работы являются исследование диэлектрической жидкости, находящейся в неоднородном электрическом поле, и разработка новой методики очистки ТМ от примесей.

В неоднородном электростатическом поле при отсутствии свободных зарядов объемная плотность электрических пондеромоторных сил, действующих на жидкий диэлектрик, в системе СИ выражается следующим образом [5]:

$$\bar{f} = -\frac{E^2}{2} \text{grad} \varepsilon_a + \frac{1}{2} \text{grad} \left( E^2 \rho \left( \frac{\partial \varepsilon_a}{\partial \rho} \right) \right), \quad (1)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля,  $\varepsilon_a = \varepsilon \varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость,  $\rho$  — плотность среды.

Для неполярных диэлектриков связь между  $\varepsilon$  и  $\rho$  определяется известной формулой Клаузиуса–Мосотти:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = k\rho,$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от поляризуемости молекул диэлектрика. Из этой формулы можно получить следующее соотношение:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon_a}{\partial \rho} = \frac{1}{3} \varepsilon_0 (\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2).$$

С учетом последнего соотношения выражение для объемной плотности пондеромоторных сил записывается следующим образом:

$$\bar{f} = \frac{1}{3} \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E^2 \text{grad} \varepsilon + \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2)}{6} \text{grad} E^2. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что в электростатическом поле на каждый элемент объема жидкого диэлектрика действует составляющая силы, зависящая от квадрата градиента напряженности электрического поля и направленная в область с наибольшей напряженностью электрического поля. Поскольку эта сила пропорциональна квадрату градиента напряженности, ее направление определяется только формой и расположением электродов и не зависит от того, подано на электроды постоянное или переменное напряжение. Очевидно, что частицы примесей, находящиеся в жидком диэлектрике и имеющие различные значения диэлектрической проницаемости, в неоднородном электрическом поле движутся по различным траекториям под действием пондеромоторных

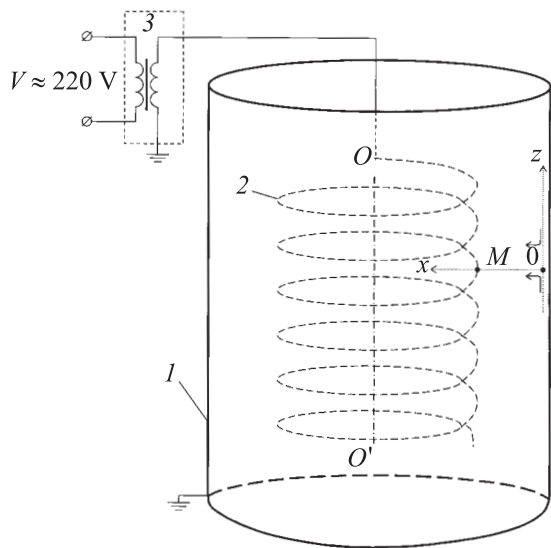


Рис. 1. Схема эксперимента.

сил. Частицы с высокой диэлектрической проницаемостью интенсивно перемещаются в области с большими значениями градиента квадрата напряженности электрического поля. Таким образом, под воздействием неоднородного электрического поля в дисперсных системах за счет электроконвекции будет происходить перераспределение частиц дисперсной фазы. Вследствие этого могут образоваться области с высоким содержанием примесей и структуры, ориентированные вдоль силовых линий.

Для экспериментальной проверки вышеизложенных рассуждений была изготовлена установка (рис. 1). Заземленный сосуд цилиндрической формы 1 ( $\varnothing 57 \times 84$  см, емкость сосуда составляла 200 л) был заполнен отработанным трансформаторным маслом, взятым из бака устройства РПН высоковольтного трансформатора. Внутри металлического сосуда был закреплен металлический электрод 2 в виде спирали. На электрод от повышающего трансформатора 3 подавалось высоковольтное напряжение частотой 50 Гц. С помощью специального устройства контролировались ток, проходящий через высоковольтную обмотку

трансформатора, электрод и ТМ. Напряжение между спиральным электродом и поверхностью металлического сосуда составляло 12 kV. В этом случае переменный ток, проходящий через высоковольтную обмотку трансформатора, составлял 8–10 mA, так что электрическая мощность, потребляемая установкой, была менее 120 W.

Представленная геометрия расположения электродов обеспечивает в объеме с трансформаторным маслом весьма неоднородное электрическое поле. Действительно, произвольная диаметральная плоскость, проходящая через ось  $OO'$  (например, плоскость  $\alpha$ , параллельная плоскости рисунка (см. рис. 1)), пересекает спираль в  $2n$  точках, где  $n$  — количество витков спирали. Выберем одну из этих точек, например точку  $M$ , и через эту точку проведем ось  $x$  в плоскости  $\alpha$ , перпендикулярную  $OO'$ . На оси  $x$  отметим произвольную точку, лежащую внутри цилиндрического сосуда вблизи ее стенок, и примем эту точку за начало локальной прямоугольной системы координат, вторая ось  $z$  которой параллельна линии  $OO'$ . Можно показать (это также следует из симметрии задачи), что зависимость  $E^2$  от  $z$  в точке  $z = 0$ ,  $x = 0$  имеет локальный максимум, а зависимость  $\text{grad } E^2$  от  $z$  в точке  $z = 0$ ,  $x = 0$  меняет свой знак. При этом с увеличением  $x$  величина  $E^2$  возрастает. Таким образом, в соответствии с (2) ponderomotorные силы, действующие в окрестности точки начала системы координат  $zOx$ , имеют распределение, вызывающее турбулентное движение жидкости, как показано на рис. 1 в виде соответствующих стрелок. Взаимодействие турбулентных потоков жидкости со стенками сосуда может способствовать эффективному выделению и оседанию инородных частиц на ее поверхности. Очевидно, что для нашей схемы эксперимента взаимодействие неоднородного электрического поля с жидким диэлектриком имеет более сложную картину. Однако представленное рассмотрение позволяет понять принцип электроконвективной очистки жидкого диэлектрика в неоднородном электрическом поле.

Эксперименты показали, что действительно при подаче высокого напряжения в жидкости, находящейся в металлическом сосуде, возникают вихревые потоки. На начальном этапе осаждение углеродосодержащих частиц примеси происходит на поверхности цилиндрического сосуда в зонах напротив витков винтовой спирали металлического электрода. При этом образующийся углеродный след на поверхности сосуда имеет вид спирали. Затем, с течением времени, вся внутренняя поверхность цилиндра покрывается слоем углеродного материала. Накопление углеродных частиц также происходит на витках металлического электрода,

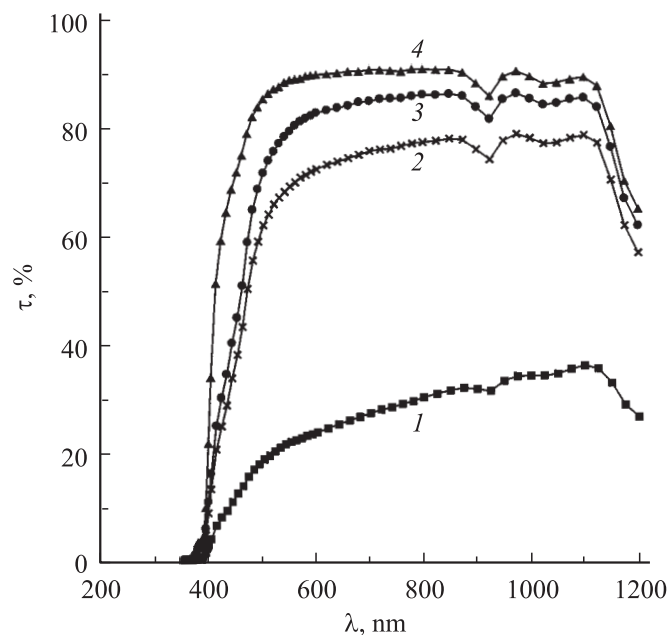


Рис. 2. Спектры оптического пропускания проб трансформаторного масла.

а влага, находящаяся в масле, выделяется на дне сосуда. Таким образом, происходит постепенное очищение трансформаторного масла от инородных частиц.

Кроме визуального наблюдения, о степени очистки трансформаторного масла можно судить по измерениям спектра оптического пропускания, класса чистоты, газового содержания, влагосодержания, пробивного напряжения ( $U_{br}$ ), тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ). В наших экспериментах спектр оптического пропускания проб трансформаторного масла исследовался на спектрофотометре СФ-26 с помощью оптических стеклянных кювет толщиной 5 мм. Класс чистоты определялся из экспериментов, проведенных с помощью прибора ПКЖ 904А, позволяющего определять размер и количество взвешенных частиц, находящихся в заданном объеме жидкости. Содержание газов в трансформаторном масле определялось с помощью газового хроматографа „Кристалл“ по стандартной методике. Содержание влаги

Пробивное напряжение  $U_{br}$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ , класс чистоты, влагосодержание и концентрация газов проб трансформаторного масла до и после электроконвективной очистки

Состояние масла	$U_{br}$ , kV/cm	$\operatorname{tg} \delta$ , %	Класс чистоты	Влагосодержание, % (mass)	Концентрация газов, % (vol.)				
					CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
До очистки	70	20.4	15	0.0053	0.229	0.011	0.267	0.249	0.061
После первого этапа очистки	149	11.2	11						
После второго этапа очистки	215	11	9	0.0017	0.15	0.002	0.053	0.06	0.018

в трансформаторном масле определялось прибором типа ПВН, принцип работы которого основан на гидрид-кальциевом методе [6]. Пробивное напряжение и тангенс угла диэлектрических потерь ТМ определялись по стандартным методикам, описанным в [7] при температурах 293 и 363 К соответственно.

На рис. 2 представлены спектры оптического пропускания проб трансформаторного масла до очистки (кривая 1), после первичной очистки в течение 8 h (кривая 2), после повторной очистки в течение 8 h (кривая 3) и свежей пробы трансформаторного масла марки Т-1500 (ГОСТ 9832-80) (кривая 4). Примечательно, что для отработанного масла (кривая 1) в диапазоне длин волн от 400 до 800 nm коэффициент пропускания  $\tau$  с увеличением длины волны  $\lambda$  монотонно возрастает, что является характерным свойством и для углеродосодержащих водных суспензий [8]. Из рис. 2 наглядно видно, что процесс электроконвективной очистки приводит к существенному увеличению коэффициента пропускания трансформаторного масла в широком диапазоне длин волн  $\lambda$ . Специальные измерения, проведенные на длине волны 1064 nm, показали, что показатели экстинкции проб масел, соответствующие кривым 1 и 3, отличаются в 8.6 раз. Однако необходимо отметить, что во всем диапазоне  $\lambda$  прозрачность свежего масла марки Т-1500 несколько превосходит прозрачность отработанного масла даже после двухступенчатой очистки.

В таблице приведены другие физические параметры, характеризующие пробы трансформаторного масла до и после процесса очистки

предложенным методом. Из нее следует, что после двухступенчатой очистки класс чистоты ТМ изменяется с 15 до 9, а пробивное напряжение  $U_{br}$  возрастает более чем в 3 раза и составляет около 215 кВ/см. ТМ с таким значением  $U_{br}$  вполне можно использовать в качестве диэлектрической жидкости в высоковольтных выключателях и устройствах РПН высоковольтных силовых трансформаторов класса напряжения 110–220 кВ. Заметим, что обычно свежее ТМ имеет  $U_{br}$ , равный 280 кВ/см. Пробивное напряжение жидкого диэлектрика тесно связано с содержанием в нем влаги. Действительно, в соответствии с представленной таблицей влагосодержание в масле после двухступенчатой очистки уменьшается в 3 раза. Примечательно, что в процессе турбулентной электродоохлажденной очистки также происходит значительное уменьшение концентрации растворенных газов в жидком диэлектрике, что наглядно демонстрируется представленной таблицей. Необходимо отметить, что описанные эксперименты проводились на воздухе при нормальном давлении. Можно ожидать, что в разреженной атмосфере, создаваемой при вакуумной откачке, обезгаживание трансформаторного масла при турбулентной электродоохлажденной очистке будет более глубоким. Из таблицы также следует, что в экспериментах наблюдается уменьшение  $\text{tg } \delta$  практически в 2 раза. Однако это уменьшение является несущественным, так как для свежего трансформаторного масла значение  $\text{tg } \delta$  составляет около 0.5%.

Таким образом, в данной работе показано, что отработанное трансформаторное масло можно очистить от углеродосодержащих примесей, влаги и газов. Очистка достигается довольно простым методом с применением высоковольтного напряжения промышленной частоты за счет турбулентной электродоохлажденной, возникающей в неоднородном электрическом поле. При этом пробивное напряжение возрастает более чем в 3 раза. Однако данный метод очистки не обеспечивает полную регенерацию трансформаторного масла, ибо тангенс угла диэлектрических потерь сохраняется на довольно высоком уровне (в нашем случае до 11%). Разработанный метод очистки является довольно простым и эффективным. Для очистки одного литра трансформаторного масла расход электрической энергии составляет менее 0.01 кВт · ч, в то время как известные способы очистки ТМ с применением центрифуги или цеолитовой установки требуют электроэнергии на один порядок больше. Описанный метод может найти применение в практике эксперимента и в различных областях промышленности для предварительной очистки жидких диэлектриков.

Авторы выражают благодарность С.Н. Ржавину и Т.Н. Могилевой за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Бортник И.М.* и др. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 544 с.
- [2] *Прудоминский В.В.* Устройство переключения трансформаторов под нагрузкой. М.: Энергия, 1974. 288 с.
- [3] *Липштейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 294 с.
- [4] РД 34.43.105-89. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. М.: СПО Союзтехэнерго, 1995. 86 с.
- [5] *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1992. 661 с.
- [6] ГОСТ 7822-75. Масла нефтяные. Метод определения растворенной воды. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. 9 с.
- [7] ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81) Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 15 с.
- [8] *Liu L., Zhang S., Hu T.* et al. // Chem. Phys. Lett. 2002. V. 359. P. 191–195.