

## Диффузия и течения в трансформаторном масле: регистрация термоконвективных течений

КОРОБЕЙНИКОВ С. М., доктор физ.-мат. наук, Новосибирский ГТУ 630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, д. 20; kor\_ser\_mir@ngs.ru  
 ДАРЬЯН Л. А., доктор техн. наук, ОАО Холдинг МРСК  
 МЕЛЕХОВ А. В., канд. техн. наук, Институт лазерной физики СО РАН  
 БЫЧКОВ А. Л., СВИРИДЕНКО М. В., инженеры, Новосибирский ГТУ

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению скорости течения трансформаторного масла (ТМ) вследствие термоконвекции в модели маслонаполненного электрооборудования (МНЭО). Представленные теоретические оценки не противоречат экспериментальным данным.

Ключевые слова: трансформаторное масло, конвекция, регистрация, диагностические газы, влага.

При эксплуатации МНЭО высокого напряжения (ВН) в результате деградации жидкой (ТМ) и твёрдой (электроизоляционной бумаги) изоляции образуются газообразные продукты разложения и вода. Они играют важную роль в процессах дальнейшего старения внутренней изоляционной системы, которые в свою очередь определяют срок службы МНЭО в целом. Кроме того, эти образования — одни из наиболее информативных диагностических параметров, позволяющих оценивать техническое состояние МНЭО.

Газы, образующиеся за счёт деструктивных процессов в областях с наибольшей напряженностью электрического поля или в горячих точках, постепенно распространяются по всему объёму МНЭО. Вода (вредная примесь в первую очередь для изоляции) появляется в МНЭО различными путями в зависимости от типа и конструктивных особенностей электрооборудования ВН. Наиболее легко она попадает в МНЭО, где система компенсации температурного расширения ТМ выполнена с «открытым дыханием».

В этом случае действует механизм, связанный с растворением в ТМ паров воды из воздуха. Для предотвращения попадания воды из воздуха в негерметичном оборудовании используются различные способы: плёночная защита, масляный затвор, силикагелевый воздухоосушитель. Однако эти виды защит не во всех случаях полностью себя оправдывают.

Конструктивные особенности МНЭО таковы, что отбор проб ТМ или другой изоляционной жидкости для последу-

ющего анализа на определение воды и растворённых в ТМ газов можно произвести, как правило, только из одной точки. Тогда при проведении интерпретации результатов анализа необходимо оценивать время задержки, т. е. интервал между образованием продуктов разложения и их регистрацией.

Знание механизма распространения растворённых в ТМ газов и воды важно при разработке методик отбора пробы ТМ и интерпретации результатов анализа с последующим диагностическим заключением и рекомендациями по дальнейшей эксплуатации МНЭО. Следует отметить, что если процессами адсорбции газов на поверхности твёрдой изоляции практически можно пренебречь, то в случае с водой необходимо учитывать и термодинамические процессы распределения воды между жидкой (ТМ) и твёрдой изоляцией (бумажной).

Существуют два механизма распространения газов и влаги в ТМ — диффузия и течение. Коэффициенты диффузии основных диагностируемых газов (водорода, метана и этана) были измерены и представлены в публикациях [1, 2]. Их значения для масла ГК при комнатной температуре составляют  $(3,3 \pm 1) \times 10^{-9}$ ,  $(1 \pm 0,3) \cdot 10^{-9}$ ,  $(4 \pm 1) \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с соответственно. Этим данным не противоречат сведения о коэффициенте диффузии воды в ТМ [3]. При температуре 15 °С указанный коэффициент равен  $1,3 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, а при 70 °С —  $1,1 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с.

Характерные расстояния, на которые успевают распространиться растворённые вещества посредством диффузии за время  $t$ , например 1 мес, составят

$\Delta x \approx (Dt)^{1/2}$ , где  $D$  — коэффициент диффузии соответствующего вещества в масле. Подставляя значения коэффициентов диффузии и времени легко определить, что радиус распространения диффузантов в течение месяца равен примерно от 5 мм (для воды) до 10 см (для водорода). Ясно, что диффузия в распределении растворённых веществ по объёму МПЭО играет важную, но не определяющую роль.

### Экспериментальная установка и методика измерений

На рис. 1 показан общий вид установки, а на рис. 2 — её схематическое изображение. Экспериментальная установка представляет собой прозрачный герметичный куб из органического стекла объёмом 1,5 л, заполненный ТМ марки ГК. Активная часть модели трансформатора состояла из магнитопровода высотой 50 мм и катушки, изготовленной в лабораторных условиях с помощью намотки на картонный каркас медного провода ПЭВ-2 диаметром 0,2 мм. Напряжение подавалось от сети переменного тока напряжением 220 В. При сопротивлении катушки 72 Ом и токе около 0,3 А, мощность активной части составляла 6–7 Вт.

Между стенкой корпуса и магнитопроводом на расстоянии 6 мм размещался стеклянный барьер, моделирующий маслобарьерную изоляцию. Для визуализации течения внутри объёма экспериментальной установки засыпался специально подготовленный полипропиленовый порошок массой 10–15 г. Размер частиц полипропилена составлял 100–200 мкм. При удельной плотности полипропилена 905 кг/м<sup>3</sup> и трансформаторного масла 895 кг/м<sup>3</sup> можно предположить, что скорость оседания частиц полипропилена не превышала 0,1 мм/с. Количество полипропиленового порошка выбиралось из расчёта обеспечения не менее 3–4 частиц в

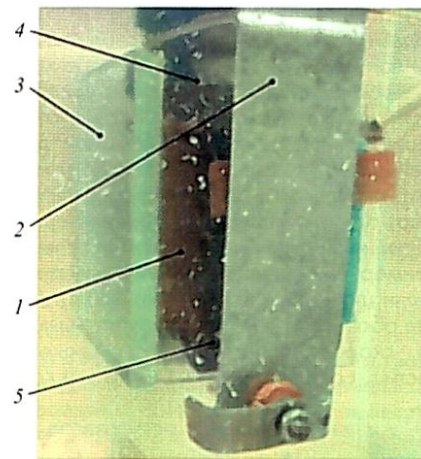
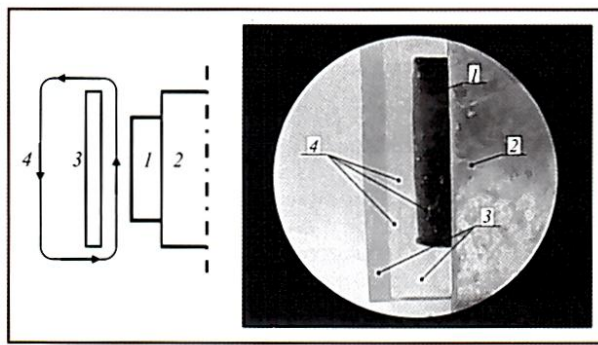


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки:

1 — обмотка; 2 — скоба; 3 — барьер; 4 — частицы-индикаторы; 5 — сердечник (белые пятна — частицы полипропилена)

Рис. 2. Схема и фрагмент модели трансформатора: 1 — обмотка; 2 — скоба; 3 — барьер; 4 — частицы полипропилена



области регистрации при равномерном перемешивании.

Экспериментальный образец получал питание от бытовой электрической сети через регулятор напряжения. Температура контролировалась двумя ртутными термометрами, скорость течения ТМ регистрировалась посредством микроскопа МБС-9 со встроенной в окуляр видеокамерой CNR-WCAM820 (интервал между кадрами 0,2 с). Пространственный масштаб определялся оптической регистрацией элементов известных размеров.

Перед началом экспериментов масло перемешивалось с полипропиленовым порошком магнитной мешалкой для равномерного распределения частиц полипропилена по всему объёму испытываемого образца. Затем подавалось питание от сети и контролировалась температура верхних и нижних слоёв масла до установления стационарного температурного режима. Далее с помощью микроскопа и видеокамеры регистрировали частицы полипропилена и определяли их скорости.

### Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены кривые нагрева верхних 1 и нижних 2 слоёв ТМ, из которых следует, что в данных опытах разница в температурах между верхними и нижними слоями масла составляла 7 °С. Анализ видеосъёмки показал, что частицы движутся по круговой траектории, обусловленной процессом конвекции. Вблизи катушки и магнитопровода частицы поднимались вверх, затем переходили в горизонтальное движение, удаляясь от источника тепла, и опускались. Потом снова приходили в горизонтальное движение по направлению к катушке и магнитопроводу и цикл повторялся. Например, одну и ту же частицу характерной удлиненной формы наблюдали в течение примерно 5 циклов подъёма — спуска (один цикл длился примерно 120 с). После обработки результатов была выявлена скорость вертикального движения частиц, составляющая 1,1 – 1,3 мм/с.

### Анализ полученных результатов

Оценим скорость конвективного течения жидкости  $v$  вблизи нагретой поверхности через баланс выталкивающей силы Архимеда  $\Delta \rho g$  ( $\Delta \rho$  — изменение плотности за счёт нагревания,  $g$  — ускорение

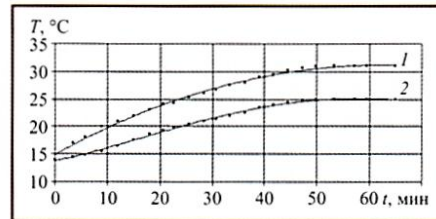


Рис. 3. Зависимость температуры ТМ от времени

свободного падения) и вязкой силы  $\eta \frac{d^2 v}{dx^2}$

( $\eta$  — динамическая вязкость). Толщина слоя прогретой жидкости составляет  $\Delta x_c \approx (a \tau_b)^{1/2}$ , где  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\tau_b$  — время вертикального движения жидкости вдоль поверхности высотой  $l_b$  ( $\tau_b \approx l_b/v$ ).

При  $\Delta p \approx \beta \Delta T \rho$  ( $\beta$  — температурный коэффициент объёмного расширения,  $\Delta T$  — перепад температур между нагретым потоком и окружающей холодной жидкостью,  $\rho$  — плотность жидкости) получаем:

$$v = \frac{\Delta x_c^2 \Delta T \rho \beta g}{12 \eta} \quad (1)$$

Перепад температур  $\Delta T$  определим при условии, что весь поток тепла, излучаемый поверхностью, переносится конвективным потоком, т. е.  $v \Delta x_c l_{\text{попер}} \rho \Delta T C \approx q S$  [ $l_{\text{попер}}$  — поперечный размер струи,  $C$  — теплоёмкость,  $q$  — удельная излучаемая мощность,  $S = l_n l_b$  — площадь теплообмена ( $l_n$  — периметр устройства, равный  $l_n \approx 4 l_{\text{попер}}$ )], тогда

$$\Delta T \approx \frac{q S}{v \Delta x_c l_{\text{попер}} \rho C} \quad (2)$$

Подставим выражение (2) в (1) и при условии  $\delta x_c \approx (a \tau_b)^{1/2} = (a l_b / v)^{1/2}$  после несложных преобразований получаем:

$$v = \left( \frac{\sqrt{a} \beta g l_b^{1/2} P}{12 \eta C l_{\text{попер}}} \right)^{2/5} \quad (3)$$

где  $P = q S$  — мощность, выделяющаяся в модели трансформатора.

В проводимых экспериментах мощность составляла 6 – 7 Вт, причём доля мощности, рассеиваемой на изучаемой части, — примерно одна четверть. Подставив следующие данные:  $a =$

$= 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\beta = 7 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ ,  $\eta = 20 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ,  $C = 0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ,  $l_b = 35 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{попер}} = 150 \text{ мм}$ , получим теоретическую оценку скорости конвективного потока 0,9 – 1,0 мм/с (экспериментальные данные 1,1 – 1,3 мм/с).

По мнению авторов статьи, такое совпадение теоретических расчётов с экспериментальными результатами с учётом приближённости оценок следует считать достаточно точным. Отметим, что при прочих равных условиях с увеличением мощности  $P$  получим скорость  $v \approx P^{2/5}$ , толщину слоя  $\delta x_c \approx (1/v)^{1/2} \approx (1/P)^{1/5}$ , а  $\Delta T \approx P^{4/5}$ , т. е. повышение температуры — преобладающий фактор в теплотеносе. Для постоянной удельной мощности ( $q = \text{const}$ ) указанные параметры следующие:  $v \approx \beta^{3/5}$ ,  $\delta x_c \approx l_b^{1/5}$ ,  $\Delta T \approx l_b^{4/5}$ . В этом случае преобладающий фактор — увеличение скорости потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 – 2013 годы».

### Выводы

1. Создана экспериментальная модель и разработана методика измерения скорости конвективного потока в модели маслонаполненного электрооборудования.

2. Проведены теоретические оценки скорости потока трансформаторного масла в модели электрооборудования. Для условий экспериментов оценка скорости практически совпадает с измеренным значением.

3. Показано, что при разнице температур между верхними и нижними слоями масла примерно 7 °С скорость потока трансформаторного масла в модели составляет 1,1 – 1,3 мм/с.

4. Предложенная модель — необходимое звено в цепи процессов, определяющих перенос и распределение как влаги, так и растворённых газов в объёме маслонаполненного электрооборудования при отсутствии принудительного перемешивания масла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков А. Л., Коробейников С. М., Рыжкина А. Ю. Определение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 106 – 107.
2. Растворение пузырьков диагностических газов в трансформаторном масле / С. М. Коробейников, Ю. Г. Соловейчик, А. В. Мелехов и др. // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49. № 5. С. 771 – 776.
3. Koch M. Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts // Proceedings of the XIV International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25 – 29, paper H-46, 2005.