ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ «ДИАГНОСТИЧЕСКИХ» ГАЗОВ И МЕТАНОЛА В БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

АВТОРЫ:

Л.А. ДАРЬЯН,
Д.Т.Н.,
АО «ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНСПЕКЦИЯ ЕЭС»

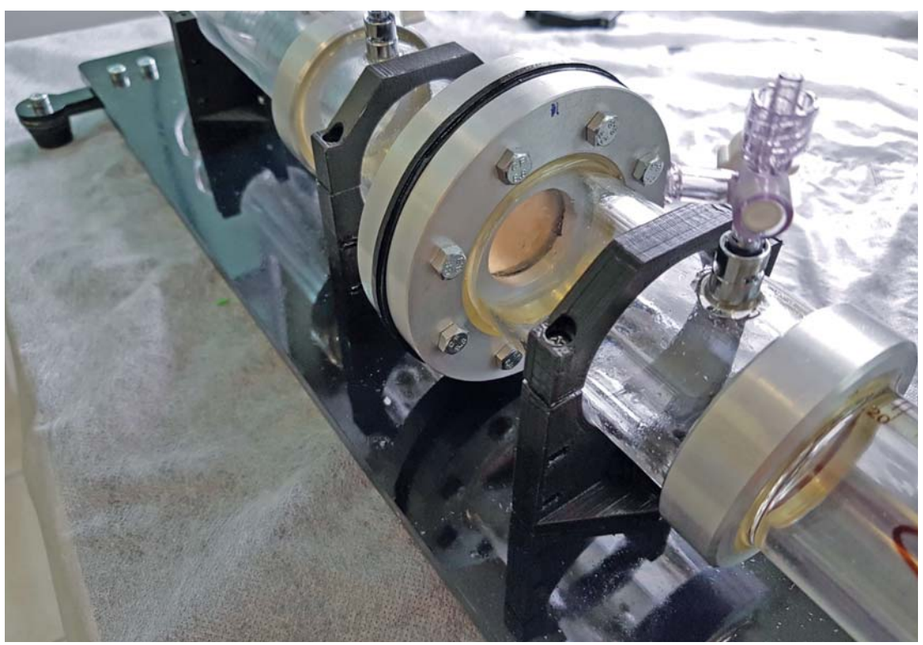
В.П. ПОЛИЩУК,
К.Ф-М.Н.,
ШАТУРСКИЙ ФИЛИАЛ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН

А.В. ПИЛЮГИН,
ПАО «МРСК ЦЕНТРА»

А.М. ОСИПОВ,
АО «ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНСПЕКЦИЯ ЕЭС»

Деградация бумажной изоляции обмоток приводит к снижению ее механической прочности и развитию дегидратации, приводящей к местному увеличению содержания влаги в трансформаторном масле и уменьшению пробивного напряжения трансформаторного масла. Развитие процессов деградации бумажной изоляции ведет к возрастанию риска витковых замыканий и повреждению трансформатора при воздействии токов короткого замыкания, грозовых и коммутационных перенапряжений и даже под рабочим напряжением.

Ключевые слова: диффузия; продукты разложения изоляции; «диагностические» газы; метанол; силовой трансформатор.



Установка для измерения коэффициентов диффузии газов в бумажно-масляной изоляции

ВВЕДЕНИЕ

В результате старения бумажно-масляной изоляции (БМИ) высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования (ВМЭО), в том числе силовых трансформаторов (СТ), образуются продукты разложения изоляции (ПРИ). Основными ПРИ, применяемыми в диагностических целях, являются «диагностические» газы (водород, этилен, этан, ацетилен, метан, оксид и диоксид углерода) и фурановые производные [1]. В последнее время также возрос интерес к исследованию других ПРИ, например, метанола.

Продукты разложения изоляции ВМЭО растворяются в трансформаторном масле (или другой изоляционной жидкости) и распределяются по внутреннему объему оборудования.

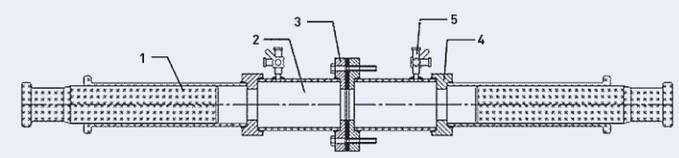
В настоящее время оценка состояния изоляционной системы СТ проводится по значениям концентрации ПРИ (критерий граничных концентраций), отношения характерных пар ПРИ и скорости их нарастания без учета процессов их сорбции во ВМЭО. Это может приводить к существенным ошибкам при интерпретации результатов измерений. Таким образом, учет распределения ПРИ между трансформаторным маслом и элементами конструкции ВМЭО (изоляционная бумага, сорбенты термосифонных/адсорбционных фильтров) весьма важен для достоверной оценки технического состояния СТ.

Скорость установления квазистационарного распределения ПРИ в объеме ВМЭО в значительной степени определяется величиной коэффициентов диффузии ПРИ в БМИ.

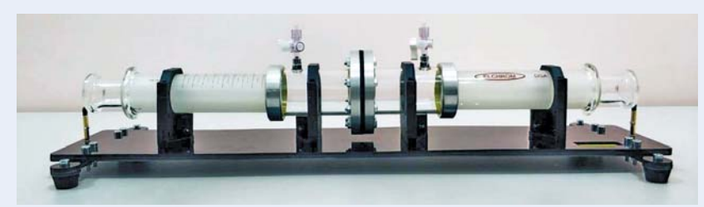
Процесс диффузии примесей в пропитанной жидкостью пористой среде, например БМИ, является весьма сложным для теоретического анализа. Трудности исследования процессов переноса примесей в таких средах описаны в некоторых работах [2, 3] на примере диффузии влаги в БМИ. Процесс диффузии ПРИ изучен явно недостаточно, и до сих пор остается ряд принципиальных нерешенных вопросов, что определяет актуальность проведения дополнительных исследований.

В статье приведены описание и результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов диффузии «диагностических» газов и метанола в системе «бумага — трансформаторное масло».

СХЕМА (А) И ФОТОГРАФИЯ (Б) ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ ПРИ



а)



б)

Рис. 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ «ДИАГНОСТИЧЕСКИХ» ГАЗОВ В СИСТЕМЕ «БУМАГА — ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО»

Для проведения исследований по определению коэффициентов диффузии «диагностических» газов в образце БМИ была разработана и изготовлена специализированная измерительная ячейка (рис. 1).

Измерительная ячейка состоит из двух одинаковых частей, а каждая часть — из модифицированного пробоотборника трансформаторного масла ELCHROM-G (1) объемом 100 мл, стеклянной трубки (2), соединительных фланцев (3, 4), трехходового краника (5) для заполнения ячейки и отбора проб трансформаторного масла.

Для заливки в ячейку использовалось трансформаторное масло марки ГК. Начальный объем $V_{л.0}$ масла в левой и объем $V_{пр.0}$ масла в правой частях ячейки составлял около 260 мл. В трансформаторное масло левой части ячейки вводилась смесь исследуемых ПРИ.

Между соединительными фланцами (3) устанавливалась предварительно высушенная и пропитанная трансформаторным маслом кабельная бумага марки К-120 толщиной 0,12 мм и диаметром 60 мм (далее — мембрана).

Для проведения хроматографического анализа объем $V_п$ пробы трансформаторного масла, отбираемой из обеих частей измерительной ячейки, составлял около 20 мл.

Хроматографический анализ «диагностических» газов, растворенных в трансформаторном масле, выполнялся на газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000М».

Вследствие диффузии через мембрану концентрация «диагностических» газов в правой части ячейки начинала увеличиваться. За время проведения эксперимента, длившегося около 30 ч, отбиралось семь проб из левой части ячейки и восемь проб из правой. Эксперимент проводился при температуре 25 °С.

Описанным методом были определены коэффициенты диффузии «диагностических» газов за исключением двуокиси углерода. Измерение коэффициента диффузии двуокиси углерода через мембрану было сопряжено с большой погрешностью вследствие высокого содержания этого газа в исходном трансформаторном масле.

Результаты измерения концентраций «диагностических» газов в левой и правой частях измерительной ячейки представлены в табл. 1 и 2.

КОНЦЕНТРАЦИИ «ДИАГНОСТИЧЕСКИХ» ГАЗОВ В ЛЕВОЙ ЧАСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

Время, ч	Концентрация, ppm						
	CO	CH_4	H_2	CO_2	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2
0	787	224	9576	660	568	51,7	172
2	753	220	9448	646,4	599	54,2	175
4	724	212	9240	638,7	588,6	53,6	169,3
6	713,6	209	9061	638	587	53,7	170,9
10	723,6	213	9080	642	591	53,7	167,7
23	728	213,8	8937	643,4	576	51,7	165,3
28	7732	215,3	8861	647,7	577	53,3	166,5

Таблица 1

КОНЦЕНТРАЦИИ «ДИАГНОСТИЧЕСКИХ» ГАЗОВ В ПРАВОЙ ЧАСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

Время, ч	Концентрация, ppm						
	CO	CH_4	H_2	CO_2	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2
0	4,6	0,87	0	562	1,79	0,5	0
2	5,04	0,93	13,2	557,4	2,14	0,63	0,51
4	5,96	1,18	52	569	2,69	0,66	0,69
6	6,14	1,22	57	573,5	2,8	0,69	0,72
10	9,22	1,83	131	565	3,41	0,71	1,05
23	11,9	2,49	252	576	5,52	0,91	1,54
28	13,23	2,87	336	578	6,34	0,99	1,84
33	17,5	3,7	428	587	7,7	1,13	2,27

Таблица 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФУЗИИ ПРИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Баланс «диагностических» газов для левой части измерительной ячейки (i — номер измерения, i > 1):

$$C_{л.1}\times(V_{л.0}-V_п)=C_{л.i}\times V_{л.i}+Q_{б.i}+\Delta Q_{л.м.i}, \qquad (1)$$

где $V_{л.i}$ — объем трансформаторного масла в левой части ячейки после отбора пробы с номером i;

$C_{л.i}$ и $C_{п.i}$ — концентрации «диагностических» газов в левой и правой частях соответственно;

$Q_{б.i}$ — объемы «диагностических» газов, поглощенных мембраной и частично продиффундировавших в правую часть;

$\Delta Q_{л.м.i}$ — суммарный объем каждого «диагностического» газа, изъятый из левой части при отборе проб.

Слагаемое $\Delta Q_{л.м.i}$ рассчитывается из соотношения:

$$\Delta Q_{л..м.i} = V_п \sum_{j=2}^{i} C_{м..j} \qquad (2)$$

с использованием значений концентраций $C_{л.i}$.

Если пренебречь начальной концентрацией газов в правой части, то объем «диагностических» газов, поступивший в него в результате диффузии через мембрану $Q_{п.i}$, находится из соотношения:

$$Q_{п.i}=C_{п.i}\times V_{п.i}+\Delta Q_{п.м.i}, \qquad (3)$$

где $\Delta Q_{п.м.i}$ — суммарный объем «диагностических» газов, изъятый из правой части при отборе проб. Слагаемое $\Delta Q_{п.м.i}$ рассчитывается по соотношению (2) с использованием значений концентраций $C_{п.i}$.

Первичная обработка экспериментальных данных сводилась к расчету значений $Q_{п.i}$. Содержание «диагностических» газов в правой части ячейки рассчитывалось с погрешностью около 20 %, которая определялась главным образом погрешностью измерения концентрации газов $C_{п.i}$.

Коэффициент диффузии «диагностических» газов в БМИ $D_б$ определялся следующим образом.

Кабельная бумага толщиной 2×а (0,12 мм) и площадью $S_б$ разделяет измерительную ячейку на две части. В начальный момент в левой части измерительной ячейки концентрация ПРИ $C_л$ постоянна, в правой равняется нулю, «диагностические» газы отсутствуют и внутри БМИ. Распределение смеси «диагностических» газов внутри бумаги описывается уравнением диффузии [4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_б \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (4)$$

Ось x направлена по нормали к поверхности бумаги, плоскость x = 0 равноудалена от обеих внешних поверхностей бумаги.

Граничные и начальные условия к уравнению (4) при сделанных предположениях имеют вид:

$$C(-a, t) = C_л,\ C(a, t) = 0,\ C(x, 0) = 0 \qquad (5)$$

Как можно показать, решение уравнения (4) с граничными и начальными условиями (5) имеет вид:

$$\frac{C(z,Fo)}{C_л} = \frac{1-z}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\times \qquad (6)$$
$$\times\left[\frac{\sin(k_n z)\exp(-k_n^2 Fo)}{k_n} - \frac{\cos(l_n z)\exp(-l_n^2 Fo)}{l_n}\right]$$

где k_n и l_n — собственные значения уравнения диффузии (4) с граничными условиями (5);

$$z = x/a,\ k_n = п_n,\ l_n = п(n-1/2) \qquad (7)$$

Число Фурье ($F_о$) определяется из соотношения:

$$Fo = \frac{D_б t}{a^2} \qquad (8)$$

Как показывают расчеты, при значении числа Фурье $F_о$~1 профиль распределения концентрации «диагностических» газов внутри мембраны близок к линейному.

Суммарное содержание «диагностических» газов в мембране в зависимости от числа Фурье $Q_б(F_о)$ находится интегрированием соотношения (6):

$$\frac{Q_б(Fo)}{S_б C_л a} = 1 - 2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\exp(-l_m^2 Fo)}{l_m^2} \qquad (9)$$

Диффузионный поток «диагностических» газов, поступающий в правую часть ячейки (z = 1), находится из закона Фика [4]:

$$J(1,Fo) = -S_б \frac{D_б C_л}{a}\frac{\partial C(1,Fo)}{\partial z} \qquad (10)$$

Градиент концентрации «диагностических» газов на поверхности мембраны, граничащей с правой частью ячейки, с учетом соотношения (6) находится по формуле:

$$\frac{\partial C(z,Fo)}{\partial z} = -\frac{1}{2} + \qquad (11)$$
$$+\sum_{n=1}^{\infty}\left[\exp(-l_n^2 Fo) - \exp(-k_n^2 Fo)\right]$$

Содержание «диагностических» газов в правой части измерительной ячейки $Q_п$ определяется после интегрирования по времени (числу Фурье) потока (11). В результате для величины $Q_п$ выводится следующее соотношение:

СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В ПРАВОЙ И ЛЕВОЙ ЯЧЕЙКАХ

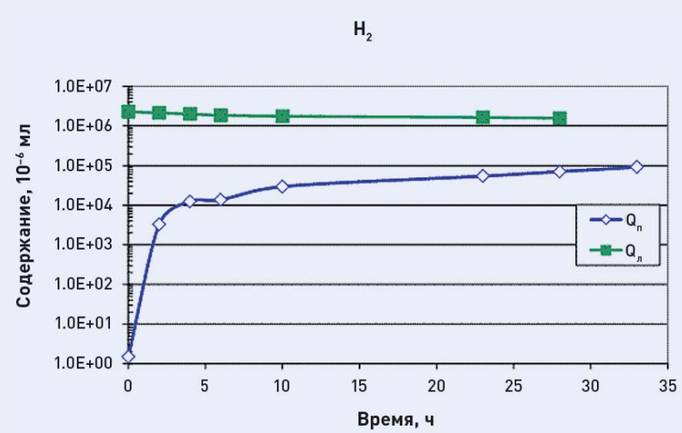


Рис. 2

$$\frac{Q_п}{C_л a S_б} = \frac{Fo}{2} - \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{1-\exp(-l_n^2 Fo)}{l_n^2} - \frac{1-\exp(-k_n^2 Fo)}{k_n^2}\right] \quad (12)$$

Из соотношения (12) следует, что если число Фурье достаточно велико, то содержание примеси в правой части измерительной ячейки, измеряемой в единицах $Q_0 = C_л \times a \times S_б$, приближенно описывается ломаной линией:

$$F_o < 0{,}66,\ Q_п = 0;\ F_o > 0{,}66,\ Q_п(F_o) = 0{,}5 \times F_o - 0{,}33 \quad (13)$$

Результаты расчетов $Q_п$ по формуле (12) использовались для определения коэффициентов диффузии «диагностических» газов в БМИ.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработка экспериментальных данных проводилась по следующей схеме:

- рассчитывалось значение Q_0;
- из общего содержания «диагностических» газов в правой части ячейки вычиталось начальное ее содержание $Q_{п.0}$;
- строился график «содержание ПРИ в правой части ячейки (в единицах $Q_п/Q_0$) в зависимости от числа Фурье», которое рассчитывалось при разных значениях коэффициента диффузии ПРИ в БМИ.

Коэффициент диффузии определялся из условия лучшего согласия экспериментальных данных и теоретической зависимости.

Отметим, что по данным табл. 1 и 2, начальная концентрация газов в правой части ячейки была на два-три порядка меньше, чем в левой.

РАССЧИТАННЫЕ И ИЗМЕРЕННЫЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В ПРАВОЙ ЧАСТИ ЯЧЕЙКИ

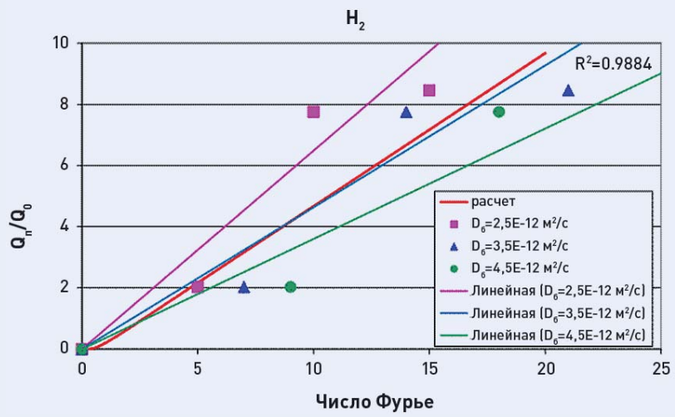


Рис. 3

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ «ДИАГНОСТИЧЕСКИХ» ГАЗОВ В ПРОПИТАННОЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫМ МАСЛОМ КАБЕЛЬНОЙ БУМАГЕ ТОЛЩИНОЙ 0,12 ММ

№	«Диагностический» газ	Коэффициент диффузии $D_б$, 10^{-12} м²/с
1	Монооксись углерода	1,5
2	Метан	1,1
3	Водород	3,5
4	Этилен	0,8
5	Ацетилен	2,5
6	Этан	2,0

Таблица 3

Поэтому соблюдалось граничное условие (5) на поверхности мембраны, обращенной к левой части ячейки.

На рис. 2 на с. 22 и рис. 3 для примера приведены результаты экспериментов по определению коэффициентов диффузии водорода. На рис. 2 показано, как изменялось со временем содержание водорода в левой и правой частях измерительной ячейки.

На рис. 3 приведены измеренные и рассчитанные значения содержания водорода в правой части измерительной ячейки в единицах $Q_0 = C_л \times a \times S_б$. Числа Фурье при представлении экспериментальных данных рассчитывались по формуле (8) при трех значениях коэффициента диффузии водорода $D_б$ в БМИ: $2{,}5\times10^{-12}$; $3{,}5\times10^{-12}$; $4{,}5\times10^{-12}$ м²/с. Затем были построены линейные аппроксимирующие функции с величиной достоверности R^2=0,9884. Как видно из графика на рис. 3, теоретическое значение содержания водорода в правой ячейке, рассчитанное по формуле (12), хорошо согласуется с экспериментом при значении коэффициента диффузии $D_б$=$3{,}5\times10^{-12}$ м²/с.

Аналогичным образом были определены коэффициенты диффузии в БМИ и других «диагностических» газов. Полученные значения коэффициентов диффузии приведены в табл. 3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ МЕТАНОЛА В СИСТЕМЕ «БУМАГА — ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО»

При аналогично проведенном эксперименте определить коэффициент диффузии метанола в БМИ не удалось вследствие очень медленного изменения концентрации метанола в правой части измерительной ячейки. Это означает, что оцениваемое значение коэффициента диффузии метанола намного меньше, чем для «диагностических» газов, и длительность подобного эксперимента должна быть гораздо больше.

Авторами настоящей работы проведена оценка коэффициента диффузии метанола, исходя из результатов эксперимента по сорбции метанола в образце БМИ.

В эксперименте по сорбции метанола использовались образцы, изготовленные из кабельной бумаги марки К-120 толщиной 0,12 мм. Образец БМИ в форме прямоугольника длиной 90 мм и шириной 61 мм был скручен в цилиндр диаметром ~30 мм. Объем образца $V_б$ равен примерно 0,65 мл, его масса — примерно 0,5 г. Образец БМИ помещался в измерительную ячейку, в данном случае — в газоплотный шприц, заполненный трансформаторным маслом марки ГК с начальным объемом $V_{м.0}$ = 275 мл (рис. 4).

С каждой пробой из измерительной ячейки отбирался объем $V_п$ = 20 мл трансформаторного масла, содержащего метанол. За время эксперимента было отобрано семь проб. В процессе проведения эксперимента трансформаторное масло в измерительной ячейке непрерывно перемешивалось с помощью магнитной мешалки. Эксперимент проводился при температуре 60 °С.

В табл. 4 на с. 26 приведены измеренные значения концентрации метанола в трансформаторном масле $C_м$ и рассчитанные значения объема метанола $Q_б$ в образце БМИ.

Для определения коэффициента диффузии метанола из экспериментов по его сорбции использовались данные об изменении его содержания в образце БМИ с течением времени. Баланс метанола в измерительной ячейке после отбора пробы с номером i (i > 1) имеет вид:

$$Q_{м.0} = Q_{б.i} + Q_{м.i} + \Delta Q_{п.м.i}, \quad (14)$$

где $Q_{м.0} = (V_{м.0} - V_п) \times C_{м.1}$ — содержание метанола в измерительной ячейке в начальный момент времени, когда весь метанол находился только в масле;

ОБРАЗЕЦ БМИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА, ЗАПОЛНЕННАЯ РАСТВОРОМ МЕТАНОЛА В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

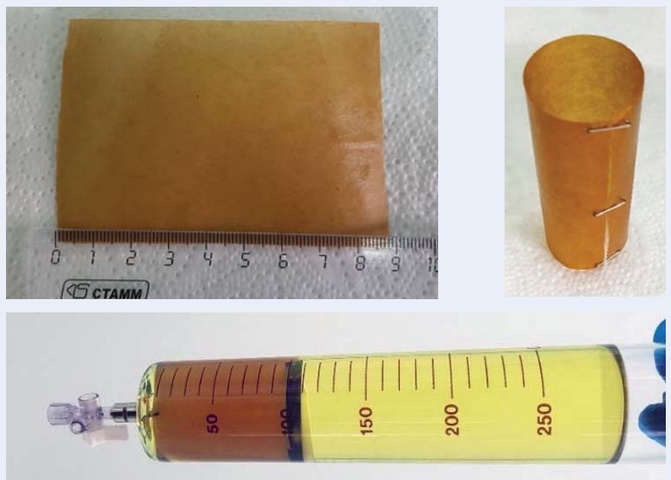


Рис. 4

КОНЦЕНТРАЦИЯ $C_м$ МЕТАНОЛА В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ И ЕГО ОБЪЕМ $Q_Б$ В ОБРАЗЦЕ БМИ

Время, час	$C_м$, ppb	$Q_б$, 10^{-6} мл
0	6027	0
6	5651	96
12	5536	123
18	5087	219
24	5166	204
48	4969	239
56	4719	277

Таблица 4

$C_{м.1}$ — концентрация метанола в начальный момент времени;

$Q_{б.i}$ — объем метанола в образце БМИ;

$Q_{м.i} = (V_{м.0} - (i - 1) \times V_п) \times C_{м.i}$ — объем метанола, содержащийся в масле;

$\Delta Q_{п.м.i}$ — потери метанола из измерительной ячейки с пробами трансформаторного масла;

$$\Delta Q_{п..м.i} = V_п \sum_{j=2}^{i} C_{м..j} \qquad (15)$$

Из соотношений (14) и (15) рассчитывалось общее содержание метанола в образце БМИ, которое приведено в табл. 4.

Коэффициент диффузии метанола был определен из сопоставления экспериментальных результатов, представленных в табл. 4, с расчетом по формуле (9).

На рис. 5 приведено изменение со временем относительного содержания метанола в образце БМИ $Q_б/Q_{б.к}$, где $Q_{б.к}$ — установившееся содержание метанола в образце БМИ. На этом же графике представлены расчетные значения содержания метанола из соотношения (8) при трех значениях коэффициента диффузии $D_б$.

Из рис. 5 следует, что при температуре 60 °С коэффициент диффузии метанола в образце БМИ составляет $D_б$=2×10^{-14} м^2/с.

Эксперименты по сорбции метанола показали, что время установления его равновесного содержания в образце БМИ при температуре 60 °С примерно вдвое меньше, чем при температуре 25 °С. Следовательно при температуре 25 °С коэффициент диффузии метанола равен: $D_б$≈1×10^{-14} м^2/с.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ

Значения коэффициентов диффузии для исследованных «диагностических» газов лежат в диапазоне (0,8×10^{-12}) – (3,5×10^{-12}) м^2/с. В работах Шахсиаха и соавторов [5–7] приведены экспериментальные данные о значении коэффициентов диффузии ряда «диагностических» газов в электротехническом картоне.

РАСЧЕТНОЕ И ИЗМЕРЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ МЕТАНОЛА В ОБРАЗЦЕ БМИ

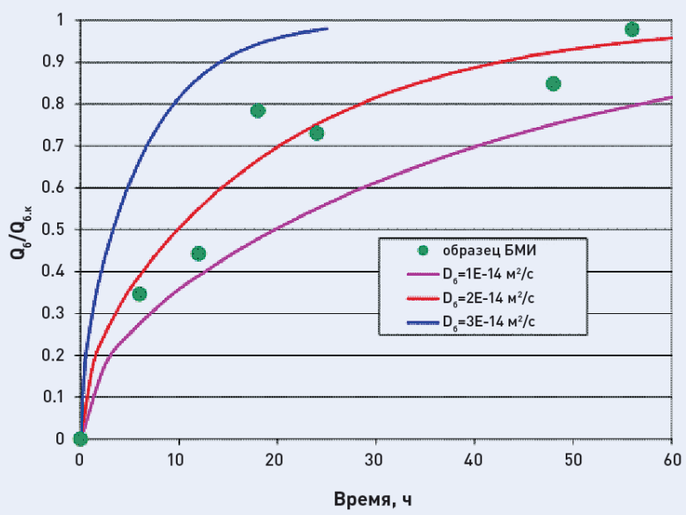


Рис. 5

Как и в описанных выше опытах, в этих работах фиксировалось изменение концентрации примеси в двух сосудах, разделенных картонной мембраной толщиной 1 мм, но при этом использовалась другая методика обработки результатов экспериментов. На рис. 6 приведена зависимость от времени концентрации этилена в правой и левой ячейках [по данным работы 5].

За 40 ч концентрация этилена в левой ячейке уменьшилась на 20 % (на ~25 ppm), в правой ячейке увеличилась с нуля до 13 ppm.

Коэффициент диффузии в работе Шахсиаха и соавторов [5] рассчитывался из соотношения:

$$D_б = \frac{a^2}{\tau_д} \qquad (16)$$

где а = 1 мм — толщина мембраны;

$\tau_д$ — характерное время диффузии, которое определяется из эксперимента.

Методика расчета времени $\tau_д$ в работе Шахсиаха и соавторов [5] не пояснена. По данным этой работы, при температуре 70 °С коэффициент диффузии этилена в электротехническом картоне составляет 1,4×10^{-12} м^2/с. По данным проведенных экспериментов (см. табл. 4), коэффициент диффузии для этилена в кабельной бумаге составил 0,8×10^{-12} м^2/с. Эти значения коэффициентов диффузии неплохо согласуются между собой, особенно если учесть, что коэффициент диффузии примесей в пористых средах может возрастать с увеличением толщины образца. Подобный эффект применительно к диффузии влаги в БМИ описан в работах П.С. Куца, И.Ф. Пикуса [2], Д.Ф. Гарсии и соавторов [3].

В табл. 5 на с. 28 приведены данные о коэффициентах диффузии «диагностических» газов из работ Шахсиаха и соавторов [6, 7]. Обращает на себя внимание тот факт, что данные одних и тех же авторов отличаются.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭТИЛЕНА В РАЗНЫХ ЧАСТЯХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ, ТЕМПЕРАТУРА ОПЫТА 70 °С

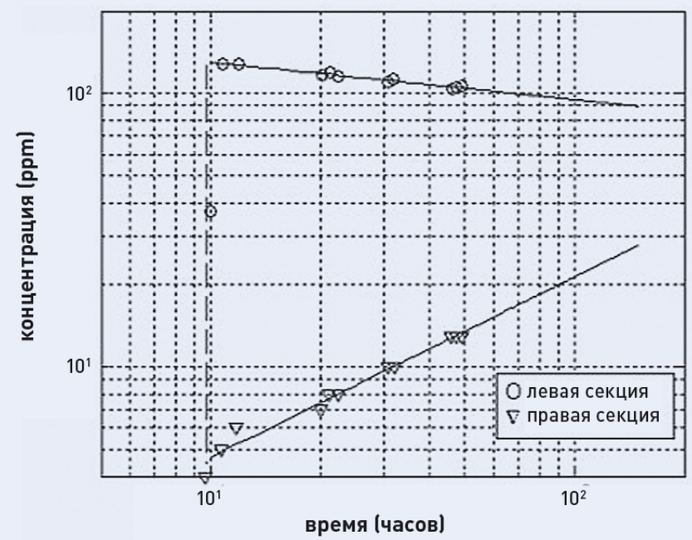


Рис. 6

По данным табл. 5, коэффициенты диффузии для двуокиси углерода и этилена сильно зависят от температуры: при комнатной температуре коэффициенты диффузии для этих газов в пять раз меньше, чем при температуре 70 °С. Для других газов температурная зависимость коэффициента диффузии является более слабой. По порядку величины коэффициенты диффузии в электротехническом картоне из работ Шахсиаха и соавторов [5–7] совпадают со значениями для кабельной бумаги, приведенными в настоящей статье.

В работах Шахсиаха и соавторов [5–7] показано, что из опытов по исследованию диффузии «диагностических» газов через мембрану из целлюлозного материала могут быть найдены соответствующие коэффициенты распределения «диагностических» газов в системе «трансформаторное масло — бумага».

Сопоставим значения коэффициентов диффузии «диагностических» газов в БМИ с коэффициентами их диффузии в трансформаторном масле $D_м$. По данным работ Шахсиаха и соавторов [6, 7], коэффициент диффузии газов в масле примерно на два порядка больше, чем в БМИ. В свою очередь, коэффициенты диффузии газов в воздухе при ат-

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ «ДИАГНОСТИЧЕСКИХ» ГАЗОВ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ПРИ	Коэффициент диффузии D_6, 10^{-12} м²/с		
	23 °C [6]	70 °C [6]	среднее значение в диапазоне температур 23–70 °C [7]
CO_2	0,5	2,5	1,5
CO	—	—	3,8
C_2H_2	0,28	0,1	1,9
C_2H_6	0,16	0,17	1,6
C_2H_4	0,27	1,4	8,2

Таблица 5

мосферном давлении на два–три порядка больше, чем в масле [7].

Можно отметить, что по данным работы Д.Ф. Гарсии и соавторов [3], значения коэффициентов диффузии влаги в БМИ по порядку величины близки к тем значениям, что были получены в описанных экспериментах для «диагностических» газов. В БМИ, изготовленной из электротехнической крафт-бумаги, при комнатной температуре коэффициент диффузии влаги $D_6 \sim 2\times10^{-13}$ м²/с, при увеличении температуры до 70 °C коэффициент диффузии влаги возрастает примерно на порядок.

Коэффициент диффузии метанола в БМИ при температуре 25 °C составляет $D_6 \approx 1\times10^{-14}$ м²/с, что по порядку величины совпадает с коэффициентом диффузии влаги в электротехническом картоне, пропитанном трансформаторным маслом [3].

Полученные значения коэффициентов диффузии позволяют оценить время установления равновесных распределений концентрации «диагностических» газов и метанола в БМИ в силовых трансформаторах. Время, требуемое для установления подобного распределения, находится из условия, что значение числа Фурье для соответствующего ПРИ составляет порядка единицы. Из оценок по соотношению (8) с использованием измеренных значений коэффициентов диффузии следует, что при комнатной температуре в БМИ толщиной порядка 1 мм время установления стационарной концентрации составляет 100–300 ч. При температуре 70 °C для некоторых «диагностических» газов это время, как следует из данных табл. 5, может быть в 3–5 раз меньше.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и изготовлена измерительная ячейка для определения коэффициентов диффузии «диагностических» газов в БМИ.
2. Представлены результаты измерений коэффициентов диффузии «диагностических» газов в кабельной бумаге толщиной 0,12 мм при температуре 25 °C. Результаты измерений согласуются с имеющимися литературными данными.
3. Приведены оценки коэффициента диффузии метанола, полученные при исследовании его сорбции кабельной бумагой толщиной 0,12 мм. Коэффициент диффузии метанола оказался примерно на два порядка меньше, чем у «диагностических» газов.
4. Полученные значения коэффициентов диффузии необходимы для оценки времени установления равновесного распределения «диагностических» газов и метанола в силовых трансформаторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. РАО «ЕЭС России», 2001.
2. Куц П.С., Пикус И.Ф. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника, 1979.
3. Garcia D.F., Garcia B., Burgos J.C. A Review of Moisture Diffusion Coefficients in Transformer Solid Insulation. Part 1: Coefficient for Paper and Pressboard // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2013. 29. N. 1. P. 46.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967.
5. Shahsiah A., Degeneff R.C., Nelson J.K. A New Dynamic Model for Propagation of Characteristic Gases in Transformer Oil-Cellulose Structures Due to Temperature Variations // 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Pp. 269–272.
6. Shahsiah A., Degeneff R.C., Nelson J.K. A Study of the Temperature-Based Dynamic Nature of Characteristic Gases in Oil-cellulose Insulation Systems // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (2007) 14. N. 2. Pp. 471–478.
7. Shahsiah A., Degeneff R.C., Nelson J.K. Modeling Dynamic Propagation of Characteristic Gases in Power Transformers Oil-Paper Insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (2007) 14. N. 3. Pp. 576–583.

реклама

БРЧН-100

Интеллектуальное устройство автоматической разгрузки

Устройство выполняет автоматическую частотную разгрузку с частотным автоматическим повторным включением потребителей.

Устройство включает в себя широкий набор функций:

- до 8 очередей АЧР (в том числе с блокировкой по скорости снижения частоты)
- до 8 очередей АРСН
- ЧАПВ
- АПВН
- АОПЧ
- до 16000 записей в памяти журнала событий
- до 3600 секунд записи в памяти осциллографа
- длительная предыстория в осциллограмме - 500 мс
- погрешность измерения частоты - 0,01 Гц

МЭК 61850

Устройство БРЧН-100 разработано в соответствии со стандартом СТО 59012820.29.020.003-2016

Единое ПО для устройств НТЦ «Механотроника» с графическим редактором гибкой логики

Сертификат соответствия International Users Group IEC 61850 Edition 2

ООО «НТЦ «Механотроника» более 28 лет разрабатывает и производит интеллектуальные устройства релейной защиты и автоматики. Развиваясь и совершенствуясь, предприятие наращивает выпуск существующих устройств и решений и создает новые, превосходящие по своим параметрам продукцию мирового уровня.

МЕХАНОТРОНИКА
Интеллектуальные устройства релейной защиты

198206, Санкт-Петербург, ул. Пионерстроя, д. 23, лит. А
Единый телефон тех. поддержки: **8 (800) 250-63-60**
www.mtrele.ru