

П. Гриффин, В. Соколов, Б. Ванин

Распределение и миграция влаги в изоляционной системе трансформатора

ИСТОЧНИКИ УВЛАЖНЕНИЯ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГИ В СТРУКТУРЕ ИЗОЛЯЦИИ. РАВНОВЕСНАЯ ВЛАЖНОСТЬ – ЧТО ИЗВЕСТНО И НЕИЗВЕСТНО. РАСТВОРИМОСТЬ ВОДЫ В МАСЛЕ. «ПОТЕНЦИАЛ ВЛАЖНОСТИ». МИГРАЦИЯ ВЛАГИ. ОБРАЗОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВ – МЕХАНИЗМ И КРИТЕРИИ. ОПАСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОДЫ. КЛАССЫ УВЛАЖНЕНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отмечен повышенный интерес к вопросу увлажнения трансформатора, что было вызвано несколькими причинами:

- **Огромный парк состаренного и очевидно увлажненного оборудования.** Возникает вопрос: Как эксплуатировать такое оборудование, учитывая широко известные проблемы влияния воды на увеличение скорости старения [1], возможное снижение электрической прочности с увеличением относительной влажности масла [2] и риск образования пузырьков при высоких температурах [3, 4],
- **Неуверенность в эффективности имеющихся методов оценки состояния оборудования.** Например, в [5] показано, что, несмотря на то, что по результатам стандартного анализа отобранных проб масла влагосодержание является низким, в трансформаторе может быть обнаружено большое количество воды. Как относиться к трансформатору, который нуждается в сушке? Как во избежание отказа определить критический уровень увлажнения и допустимые эксплуатационные условия, например, перегрузку?
- **Становятся доступными новые методы контроля – датчики влаги, позволяющие осуществлять контроль состояния под напряжением** [6]. Возникает вопрос о том, как разработать экспертную систему, позволяющую выявить аномальный уровень увлажнения и предотвратить дефектное состояние оборудования.

Вопросы деградации и восстановления изоляции трансформатора представляют особый интерес для Рабочей группы СИГРЭ 12.18 «Продление срока службы трансформаторов» [7, 8]. По мнению экспертов СИГРЭ, для разработки эффективных средств по продлению ресурса трансформаторов необходимым условием является более глубокое понимание процессов, связанных с водой: проникновение, равновесие и миграция влаги, ее опасные воздействия, а также использование эффективных диагностических методов.

Понимание физики процессов проникновения влаги в трансформатор, ее миграции и распределения, а также математическое описание этих процессов являются актуальными для энергетики. Целью данной статьи является рассмотрение этих вопросов.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ УВЛАЖНЕНИЯ

Имеется три источника воды в изоляции трансформатора:

- *Остаточная влага в элементах «толстой структуры»,*
- *Проникновение влаги из атмосферы,*
- *Разложение целлюлозы и масла в результате старения.*

Остаточная влага

Избыточная (2 - 4%) остаточная влага может оставаться в крупных изоляционных деталях, особенно из пластмассы, которые требуют большего времени сушки по сравнению с электрокартоном. Такими деталями являются: крепления отводов, РПН, опорная изоляция нейтральных катушек в обмотке, бакелитовые цилиндры, опорная изоляция магнитопровода и т.п.

Иногда такое явление становится причиной повышенного значения $\tan\delta$ изоляции и его роста с повышением температуры. При эксплуатации трансформатора эта влага может постепенно перейти в масло, увеличивая влагосодержание тонкой изоляционной структуры.

Проникающая влага

Атмосферная вода является основным источником увлажнения трансформатора. Действуют три механизма: поглощение воды при непосредственном контакте изоляции с воздухом (при мон-

тажных и ремонтных работах); проникновение влаги в бак в виде молекулярного потока (Кнудсена) вследствие разницы между концентрацией воды в атмосфере и масле в баке; вязкий поток влажного воздуха в трансформатор из-за разницы давления (атмосферного и внутри бака). Аналитическая интерпретация этих механизмов увлажнения представлена в [7].

В Табл.1 представлена верхний предел увлажнения, рассчитанного по [7]. Можно сделать следующие выводы:

- Молекулярный поток влаги является пренебрежимо малым. Этот механизм может привести к проникновению значительного количества воды только во время термовакуумной обработки трансформатора,

- **Основным механизмом** проникновения воды является вязкий поток влажного воздуха из-за «недостаточной герметичности» под воздействием градиента давления. Обычно наиболее слабыми местами являются верхнее уплотнение вводов протяжной конструкции, уплотнение предохранительного клапана, течи масла в контуре принудительной циркуляции масла между трансформатором и охладителями. Все эти участки с недостаточным уплотнением работают как «водяной (паровой) насос»,

- **Большое количество «свободной» воды** может попасть в трансформатор за очень короткое время (несколько часов) при резком падении давления (после резкого снижения температуры), а также в результате проникновения дождевой воды из-за недостаточной герметичности. **Это явление особенно опасно**, когда трансформатор хранится частично заполненным маслом без системы защиты.

- Скорость возможного увлажнения трансформатора со свободным дыханием является значительной, но ограниченной [7].

Оценка влагосодержания образцов электрокартона, отобранных из около 100 трансформаторов после 6 - 20 лет эксплуатации показала, что средняя скорость увлажнения трансформатора со свободным дыханием составляет примерно 0.2% в год.

Однако это относится только к некоторым локальным (увлажненным) зонам, а не к общей массе изоляции. Обычно при сушке примерно 5000 кг «тонкой изоляции» с влагосодержанием до 2.5% удаляется только 25-30 кг воды.

Скорость увлажнения трансформаторов с пленочной системой защиты масла 0.03 – 0.06% в год (по результатам испытаний около 80 трансформаторов).

При плохом или нарушенном уплотнении в трансформаторах как со свободным дыханием, так и с пленочной защитой было обнаружено более 50 кг свободной воды. Большое количество свободной воды может проникать в бак трансформатора через поврежденный водомасляный охладитель системы охлаждения типа Ц. Сушка в полевых условиях, выполненная с нарушениями требований, может также стать причиной конденсации свободной воды.

Данные Таблицы 1 показывают, что работы, включающие контакт изоляции с воздухом, могут стать причиной проникновения гораздо большего количества влаги, чем длительная эксплуатация с несовершенной системой защиты.

Табл.1 Расчетная оценка предельной скорости увлажнения

Условия	Скорость увлажнения
Прямой контакт изоляции с воздухом:	Поглощение поверхностью 1000 м ² на глубину до 0.5 мм
Отн. влажность 75%, 16 часов, 20 °С	13.5 кг
Отн. влажность 40%, 16 часов, 20 °С	8.1 кг
Молекулярный поток паров воды:	
- Через капилляры уплотнений	Менее 1–5 г в год
- Через ослабленные прокладки	Менее 30–40 г в год
Вязкий поток воздуха при транспортировке (активная часть погружена в масло):	
- Достаточная герметичность	600 г в год

Условия	Скорость увлажнения
- Недостаточная герметичность	15 г в день
- Эксплуатация со свободным дыханием	6000 г в год
- Недостаточное уплотнение с попаданием дождевой воды	200 г в час

Разложение изоляционных материалов

Разложение целлюлозы при старении приводит к образованию фурановых соединений и сопровождается образованием воды – три молекулы воды за один элементарный процесс. Это означает, что существует зависимость между образованием воды и общим количеством обнаруженных фурановых соединений. Количественная оценка этого процесса требует дополнительных исследований.

Данные различных авторов существенно отличаются.

Лампе и Спикар [11] предположили, что деполимеризация до 5-6 разрывов молекулы целлюлозы приводит к образованию 2% воды. Испытания на старение моделей обмоток при 125-160°C выявили [12] увеличение влагосодержания до 1.5-2.8% в зонах, расположенных под наиболее нагретыми катушками.

Шрофф и Станнет [13] показали, что при деградации целлюлозы до степени полимеризации 400 образуется только 0.4% воды.

Необходимо отметить, что процесс интенсивного образования влаги локализован в «наиболее нагретых точках», которые составляют, как правило, менее 5% изоляции. На Рис.1 показаны источники увлажнения трансформаторов в эксплуатации.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГИ В СТРУКТУРЕ ИЗОЛЯЦИИ

Компоненты маслобарьерной изоляции трансформатора можно разделить на три группы:

- 1) «**Толстая структура**» (в основном, уравнивательная изоляция) составляет около 50% общей массы изоляции, но играет очень незначительную роль в миграции влаги благодаря большой постоянной времени (несколько лет) процесса диффузии,
- 2) «**Тонкая холодная структура**», которая эксплуатируется при более низкой температуре масла в промежутке между обмоткой и баком: барьеры из электрокартона, формованная изоляция и т.п. Эти компоненты составляют 20 -30% общей массы и являются основным местом накопления воды. Движущей силой миграции влаги является разница в концентрации воды на границе масла и изоляции,
- 3) «**Тонкая горячая структура**», которая эксплуатируется при температуре, близкой к температуре проводника (изоляция витков, катушек, слоев). Около 5% ее массы характеризуется несколько повышенной температурой (так называемые наиболее нагретые точки). В данном случае может быть три движущие силы миграции влаги: градиент концентрации воды, температуры и давления пара (пар + газ).

Опыт показал, что большая часть влаги накапливается в компонентах второй группы. Около 10% (по массе) этой группы (самая холодная часть) образуют «влажные» зоны с уровнем влагосодержания на 1 – 1.5% выше среднего. Компоненты этой группы являются основным источником увлажнения масла при повышенных температурах, когда концентрация влаги в поверхностных слоях целлюлозы превышает концентрацию в прилегающем масле. Влагосодержание в компонентах третьей группы гораздо меньше, чем во второй, однако из-за более высоких температур воздействие может быть опаснее.

Масло является лишь средой, которая переносит влагу, но некоторое количество воды может «храниться» в поверхностно-активных веществах в масле.

В некоторых случаях свободная вода может накапливаться на дне бака, на магнитопроводе, в охладителях и т.п. в результате всасывания дождевой воды из-за недостаточной герметичности.

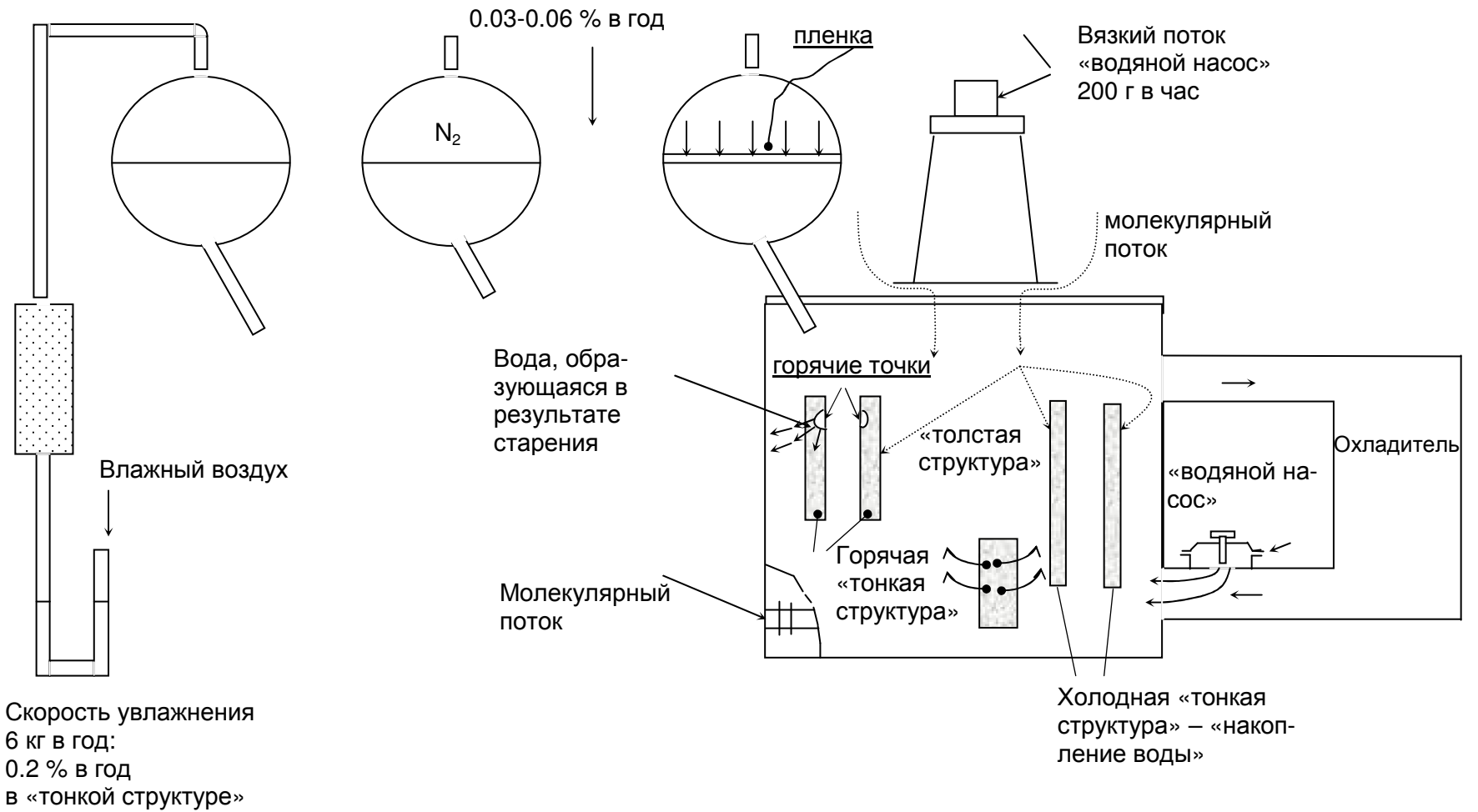


Рис. 1 Источники увлажнения.

РАВНОВЕСНАЯ ВЛАЖНОСТЬ. ЧТО ИЗВЕСТНО И НЕИЗВЕСТНО?

АБСОРБЦИЯ И АДСОРБЦИЯ

Существуют два способа сорбции паров и газов веществами и средами:

Абсорбция – процесс, в результате которого молекулы газа (пара) становятся частью вещества,

Адсорбция – присоединение молекул газа (пара) к поверхности твердых тел или жидкостей.

Адсорбированные молекулы являются все теми же молекулами газа (пара), но ограниченными в движении. Они представляют двухмерный газ в теле адсорбента, находящийся в постоянном движении вдоль его поверхности. Время от времени молекулы освобождаются и снова становятся частью трехмерного газа, являющегося адсорбентом, новые свободные молекулы занимают их место; поэтому равновесная адсорбция имеет динамический характер. В любой момент времени равновесие практически не наступает.

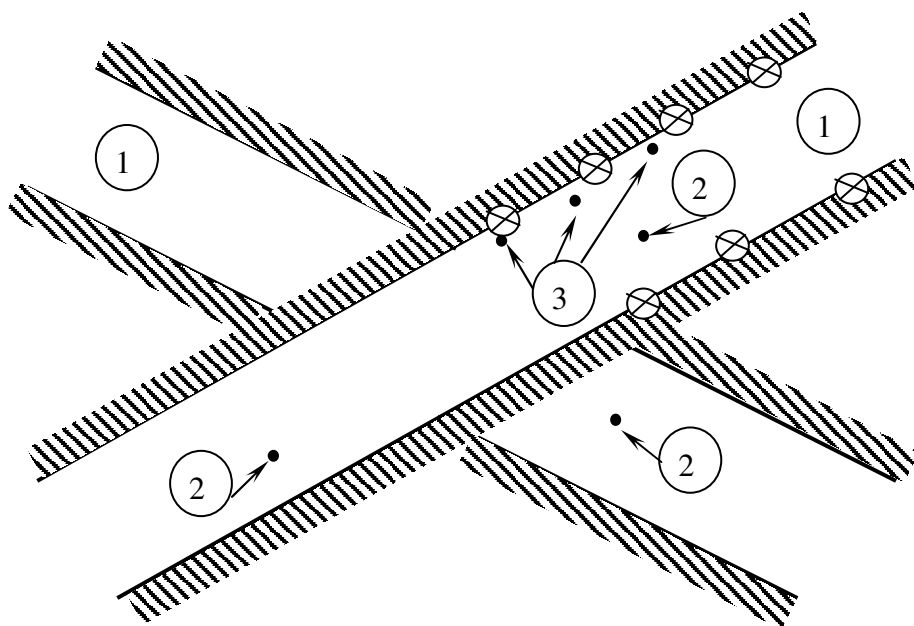


Рис. 2. Адсорбция молекул воды (пара) активными участками целлюлозного материала в микрокапиллярах:

1- микрокапилляры, 2 - свободные молекулы воды, 3 - молекулы газа, адсорбированные на активных участках,
⊗ - активные участки на границах капилляров

АДСОРБЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ЦЕЛЛЮЛОЗНОМ МАТЕРИАЛЕ

Такой случай адсорбции характеризуется особыми признаками из-за пористости материала и наличия полярных групп в молекулах целлюлозы. [26] Благодаря полярным группам целлюлоза активно притягивает и адсорбирует молекулы воды. Процесс адсорбции является практически мгновенным в любом месте, которого достигает пар, но процесс самой диффузии пара замедляется из-за медленного продвижения молекул воды по лабиринту микрокапилляров. Поэтому общее равновесие является трудно достижимым.

Десорбция является еще более медленным процессом, так как для ее активации требуется некоторое количество энергии, тогда как в результате адсорбции происходит выделение энергии.

Сорбционная вода характеризуется динамической природой: адсорбированные молекулы воды поддерживаются в интенсивном движении около активных центров молекул целлюлозы (группы ОН в кольцах глюкозы), приобретают достаточную кинетическую энергию, высвобождаются, и их место вскоре занимают другие молекулы воды. Это процесс показан на рис. 2.

Динамическое равновесие включает постоянный обмен молекулами пара между свободной водой и активными участками, а также между соседними активными участками с практически не освобожденными молекулами. Первый механизм происходит в основном при влагосодержании $w < w_0$, где w_0 – условное влагосодержание, при котором каждый из активных участков был бы занят одной адсорбированной молекулой (так называемый «мономолекулярный слой» или «монослой»). Второй механизм происходит в основном при $w > w_0$.

Молекулы воды (и газов) самостоятельно перемещаются по микрокапиллярам и по макрокапиллярам, заполненным маслом (молекулярный поток). Диффузия приводит к экспоненциальному росту адсорбированной воды до равновесного состояния. Температура ускоряет этот процесс.

ИЗОТЕРМА СОРБЦИИ

Изотерма сорбции – это зависимость количества адсорбированной воды от относительной влажности или давления воды в состоянии равновесия. Типичная изотерма адсорбции (Рис.3) имеет S-образную форму и разделяется на две части точкой изгиба. Левая часть имеет медленный рост и характеризует образование первого условного «монослоя». Правая часть имеет больший рост, что означает ускоренное улавливание молекул воды усиленными скоплениями молекул на активных участках. Это явление часто называют «многослойной» адсорбцией.

УРАВНЕНИЕ СОРБЦИИ

Общий вид изотермы сорбции можно выразить следующим уравнением, известным в молекулярной физике:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{K \cdot \varphi}{(1 - \varphi) \cdot (1 - \varphi + K \cdot \varphi)} = Y = \frac{K \cdot x}{(1 - x) \cdot (1 - x - Kx)} \quad (1)$$

где: $Y = W/W_0$ - количество адсорбированных условных «монослоев»,

$x = \varphi = P/P_s$ – относительная влажность,

P – давление пара,

P_s – давление насыщенного пара,

K – функция температуры, представляющая отношение вероятностей выхода молекул из поверхности свободной воды и активных участков адсорбированного материала.

Уравнение (1) и Рис.4 показывают, что точка изгиба изотерм адсорбции проходят по пути «0-M-L-1», когда температурный коэффициент K возрастает в интервале $2 \leq K < \infty$. При использовании опытных данных необходимо учитывать, что механизм сорбции до и после точки изгиба имеет различный характер.

В энергетике используются две хорошо известные аппроксимации: Пайпера и Фесслера [25], основанные на аппроксимации Фрейндлиха $W = A p^a$, где A – функция температуры. Эта аппроксимация действительна только для части изотермы ниже точки изгиба. При использовании уравнения Фрейндлиха Пайпер и Фесслер не отбрасывали опытные данные выше точки изгиба. Они предложили следующие формулы:

$$\text{Пайпер: } W = [P \exp(-21.92 + 6850/T)]^{0.75} \quad (2)$$

$$\text{Фесслер: } W = 2.173 \cdot P \cdot 0.6685 \cdot 10^{-7} \exp(4725.6/T) \quad (3)$$

где: P – давление пара, мм рт. ст., W - содержание воды, %

T – термодинамическая температура, К

Оба выражения занижают влагосодержание при низких концентрациях и завышают его при концентрациях до 10%.

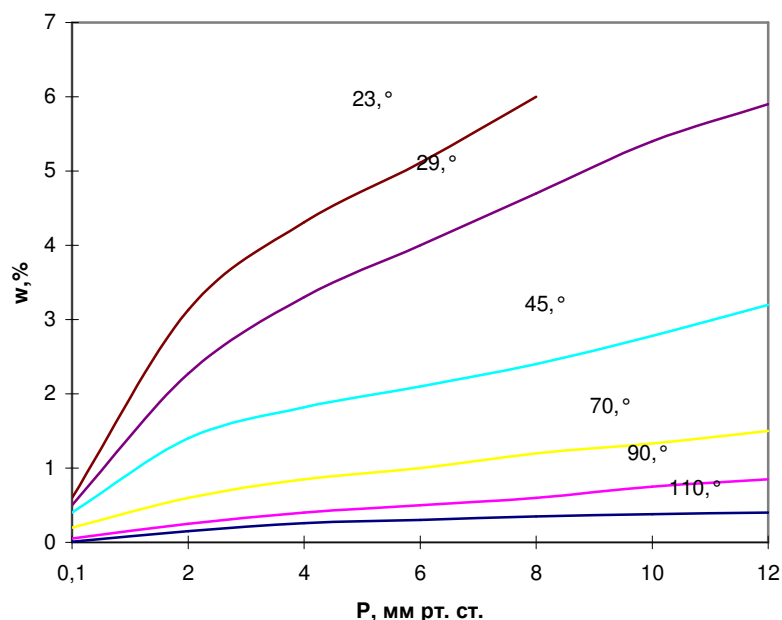
Уравнение (1) дает гораздо лучшее совпадение с опытными данными. Уравнение (3) можно представить в форме уравнения (2) с несколько другими численными постоянными.

Оба уравнения можно получить из основного уравнения сорбции при помощи некоторого упрощения и ограничения предела влагосодержания. На Рис. 5 и в Табл.2 представлена сравнительная оценка параметров равновесия с использованием уравнений (1), (2) и (3) и опытных данных [24]. Можно отметить, что все результаты довольно хорошо совпадают при небольшой влажности (2-4%), но довольно сильно отличаются при более высокой влажности.

Очевидно, что эмпирические аппроксимации можно применять только для оценки влагосодержания, но не для определения точных значений.

Была также обнаружено, что имеется заметная разница в сорбции электрокартона и крафт-бумаги (Рис. 6), а также существенная разница между сорбцией воды в воздухе и вакууме (Рис. 5). Процесс сорбции в вакууме происходит гораздо быстрее, чем в воздухе, поскольку «посторонние» молекулы воздуха адсорбируются целлюлозным материалом вместе с молекулами воды, что ослабляет напряженность поля активных участков. Поэтому при одинаковой температуре адсорбция в воздухе всегда количественно меньше, чем в вакууме.

Рис.3 Изотермы вода-бумага для крафт-бумаги К-120 в вакууме



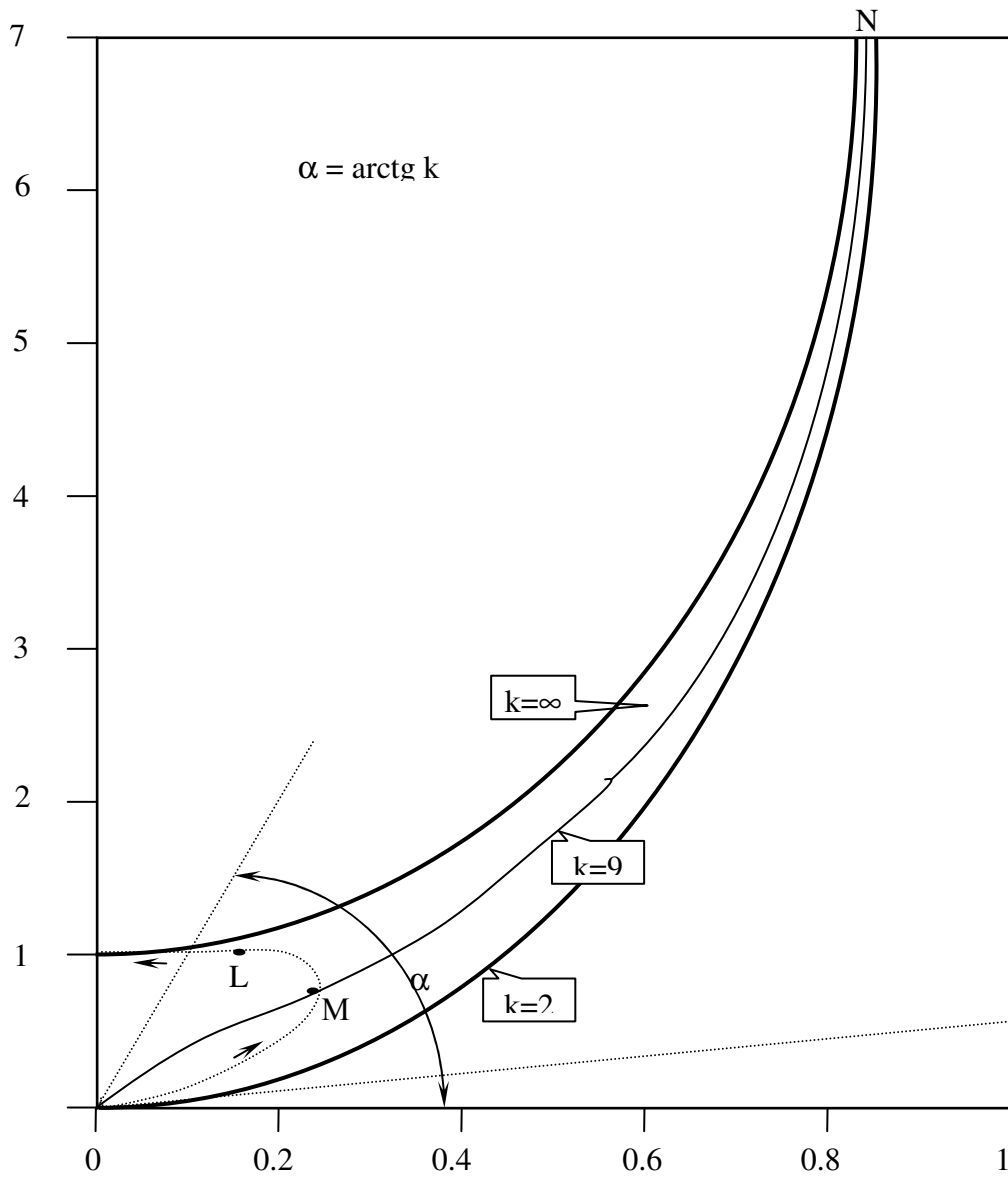


Рис. 4. Конечные формы изотерм адсорбции при $2 \leq k < \infty$.
 При $k = 9$ точка изгиба M находится на наибольшем расстоянии ($x_m = 0,25$) от нуля ($x=0$).

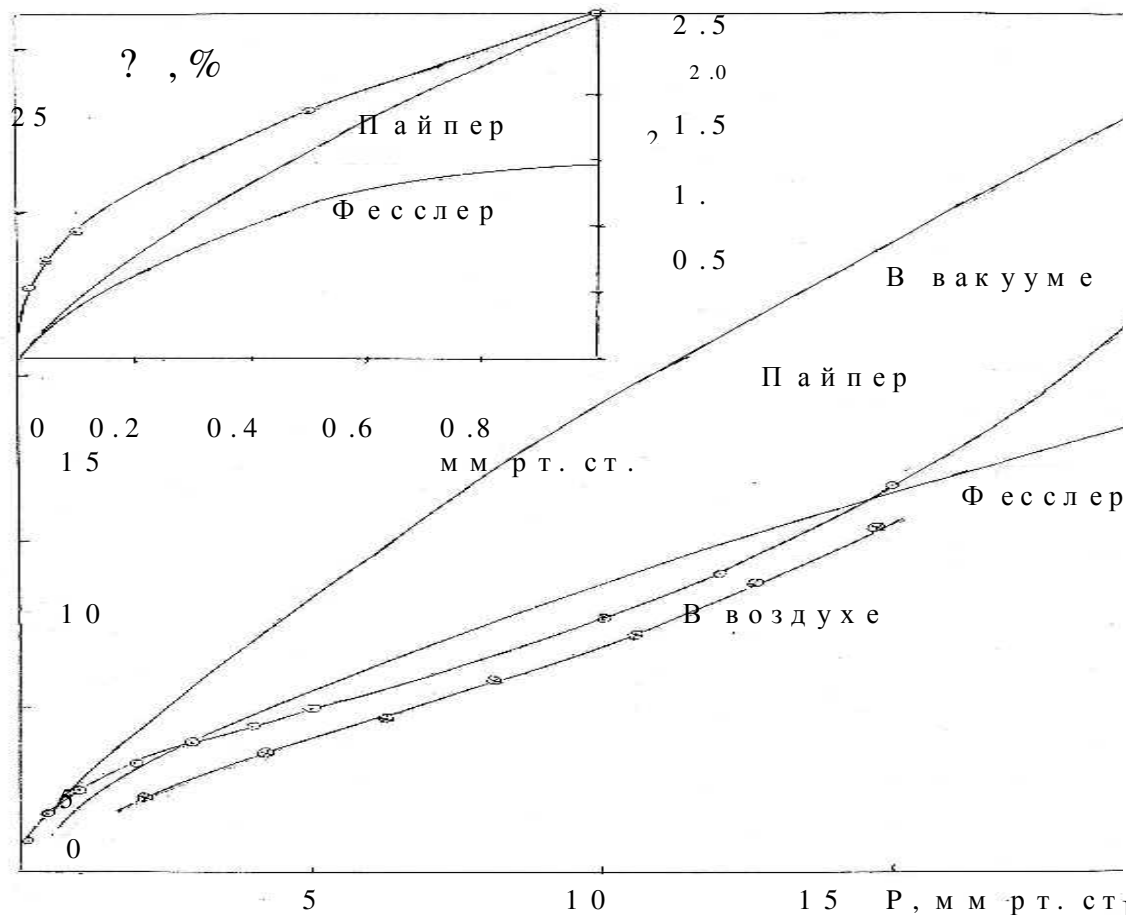


Рис. 5

Изотермы вода-бумага (23°C), полученные опытным путем и представленные в виде формул Пайпера и Фесслера

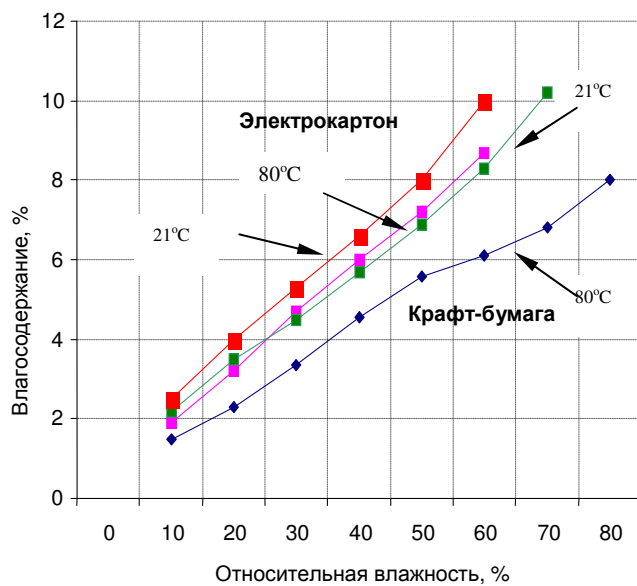


Рис. 6. Равновесная влажность в электрокартоне и бумаге.

Таблица 2 Сравнительное оценка параметров равновесия: крафт-бумага, 70°C

Бумага	Параметры	Эмпирическое уравнение		Опыты		Теоретические данные
		Пайпера	Фесслера	Уммен*	[24]	(1)**
Влажность, %	Р, мм рт. ст.	7	8.1	9.3	8	8
	φ, %	3.0	3.4	4	3.46	3.42
1	Р, мм рт. ст.	17.7	22.2	28	20	20
	φ, %	7.5	9.5	12	8.5	8.5
2	Р, мм рт. ст.	30.4	40	56	46.7	49
	φ, %	13	17.1	24	20	21
3	Р, мм рт. ст.	44.7	60.7	88.8	70.1	58.4
	φ, %	19.1	25.9	38	30	25

* Сорбция древесной массой ** Влагосодержание в монослое 4%.

РАСТВОРИМОСТЬ ВОДЫ В МАСЛЕ. РАВНОВЕСИЕ В СИСТЕМЕ «ЦЕЛЛЮЛОЗА – МАСЛО».

Масло является средой, способной переносить воду в трансформаторе. Вода присутствует в масле в растворимой форме, а также в форме гидрата, адсорбированного полярными продуктами старения. Волокна целлюлозы в масле также содержат некоторое количество воды. Влагосодержание масла прямо пропорционально относительной влажности воды (относительному насыщению) вплоть до максимальной растворимости. Зависимость влагосодержания масла W_s от абсолютной температуры T можно представить в виде:

$$W_s = W_0 \exp(- B / T),$$

где: W_0 и B – константы, как правило, разные для разных масел, в основном, из-за разного содержания ароматических соединений.

Величины констант и максимальная растворимость воды для некоторых масел представлены в Табл.3.

Табл.3 Параметры W_0 и B и максимальная растворимости воды

Масло [17, 18, 19]	Содержание ароматических углеводородов $C_A, \%$	W_0	B	Растворимость, г/г		
				20 °C	40 °C	70 °C
1	5	$16.97 \cdot 10^6$	3777	42.8	97.5	279
2	8	$23.08 \cdot 10^6$	3841	46.8	108	316
3	16	$22.76 \cdot 10^6$	3783	56.2	128.3	369.2
4	21	$13.16 \cdot 10^6$	3538	75	162	436
5	Силиконовое масло	$1.953 \cdot 10^6$	2733	174	314.7	675.4

Появление полярных продуктов старения увеличивает растворимость воды. Влияние старения на растворимость воды разное для разных масел, но в соответствии с имеющимися данными «полное» количество воды в состаренном масле обычно вдвое больше количества растворенной воды. При повышенной температуре некоторое количество «гидратной» воды может перейти в растворенную воду.

МИГРАЦИЯ ВЛАГИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЛАГИ И ТЕМПЕРАТУРЫ. «ПОТЕНЦИАЛ ВЛАГИ»

Имеются три движущие силы, способствующие переносу влаги:

градиент концентрации влаги, температуры и давления.

Механизм переноса воды по микрокапиллярам и маслу в микрокапиллярах, объединяющий все три движущие силы, состоит в молекулярном движении, которое подчиняется закону, подобному Закону Ома для электрического тока, где потенциал «переноса влаги» равен:

$$\varphi_w = \frac{P}{\sqrt{T}} \quad (4)$$

«Потенциал влаги» играет роль, аналогичную электрическому потенциалу. Изменение давления пара P или температуры T приводит к появлению потенциала переноса влаги и ее движению. С учетом (4), второй закон Фика можно представить в существенно упрощенной форме. Для важного с практической точки зрения одномерного случая его можно записать в следующем виде:

$$\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_w}{\partial x^2} = \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (5)$$

где: λ – влагопроводность материала, которая является его характерным параметром и не зависит от концентрации влаги ω и температуры (поэтому для определения λ необходимо выполнить измерение только при одной температуре),

ρ – плотность материала.

Коэффициент диффузии D материала с использованием уравнения (1) можно выразить следующим образом:

$$D = \frac{\lambda}{\rho \sqrt{T}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \omega} \quad (6)$$

МИГРАЦИЯ ВЛАГИ В ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Масло является теплопередающей средой. Рост температуры масла приводит к снижению относительного насыщения и возникновению разницы в концентрации влаги на поверхности раздела «масло – изоляция».

Поэтому градиент влаги в электрокартоне и температурный градиент противоположно направлены. Это явление ослабляет процесс переноса влаги при сорбции и десорбции. Неравномерное распределение воды по слоям с повышенной концентрацией вблизи поверхностных слоев несколько уравнивает выше-упомянутое препятствие для сорбции.

Вполне допустимо использовать постоянное значение для коэффициента диффузии D и примерно оценить количество адсорбированной воды, используя решение второго закона Фика [7]

$$\Delta W_a \cong (W_e - W_o) \cdot [1 - F(Z)] \quad \% \quad (6)$$

где W_e и W_o – содержание равновесной и остаточной воды,

Z – параметр диффузии, равный:

$$Z = \frac{D \cdot t}{d^2} \quad (7)$$

D – коэффициент диффузии, m^2/c

d – толщина изоляции, м.

Функцию диффузии $F(Z)$ можно представить в форме прогрессии. Процесс количественно можно выразить суммой экспонент с различными постоянными времени. Однако если необходимо достичь достаточно высокого влагосодержания ($W / W_e > 0.5$), то функцию можно упростить до одной экспоненты с одной постоянной:

$$T = \frac{d^2}{\pi^2 D} \quad (8)$$

Это уравнение можно использовать для приблизительной оценки процесса. Подобным образом можно определить количество десорбированной воды:

$$\Delta W_d \cong (W - W_e) \{ [1 - F_z] \}, \% \quad (9)$$

Уравнения (6) и (9) дают заниженную и завышенную оценку соответственно количество адсорбированной и десорбированной воды в системе «масло - целлюлоза», так как концентрация влаги и величина W_e уменьшаются при сорбции и увеличиваются при десорбции.

Коэффициент диффузии D зависит от структуры целлюлозы, температуры и влагосодержания. Есть несколько эмпирических зависимостей [16, 15]. Для практического применения необходимо использовать общепринятые величины. Например, НИЦ «ЗТЗ-Сервис» использует следующие величины [19]:

$D = 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ для оценки увлажнения изоляции, находящейся в не-посредственном контакте с воздухом (при монтажных и ремонтных работах),

$D = 2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ для оценки процесса миграции влаги в работающем трансформаторе. Величина D удваивается при росте температуры на $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Время установления равновесного распределения влаги в первом приближении можно оценить (с занижением) при интерпретации процесса одной экспонентой по уравнению (8).

Если $D = 8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ при $60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, имеем $T_o = \frac{9 \cdot 10^{-6}}{\pi^2 \cdot 8 \cdot 10^{-14}} \cong 132$ дня. При более тонком электрокартоне ($d = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) и $D = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ при $80 \text{ }^\circ\text{C}$ постоянную времени можно уменьшить до ≈ 7.3 дней.

В замкнутой системе трансформатора можно рассматривать лишь приближение к равновесию и установлению некоторого установившегося состояния.

Для инициирования десорбции влаги в масло, концентрация равновесной влаги на поверхности (W_e) должна быть значительно ниже, чем проблематичное (W).

МИГРАЦИЯ ВЛАГИ И СТАЦИОНАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГИ В ИЗОЛЯЦИИ ВИТКОВ И КАТУШЕК ОБМОТОК ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Градиенты влаги и температуры совпадают в изоляции проводника. Целлюлозная изоляция витков и катушек может быть представлена как стенка, отделяющая медь катушки от масла. Когда трансформатор находится под нагрузкой, на этой стенке происходит падение температуры, что приводит к падению потенциала влаги в изоляционной стенке, в слоях которой первоначально было равно-мерное распределение влаги. Затем молекулы воды начинают мигрировать от внутренних слоев к внешним до выравнивания потенциала влаги во всех слоях. Это явление приводит к неравномерному распределению влаги в слоях.

Используя уравнение (1), можно рассчитать такое распределение для данного падения температуры, первоначальное влагосодержание и максимальную температуру. На Рис.7 показано, что неравномерность имеет место даже при до-вольно низком уровне среднего влагосодержания.

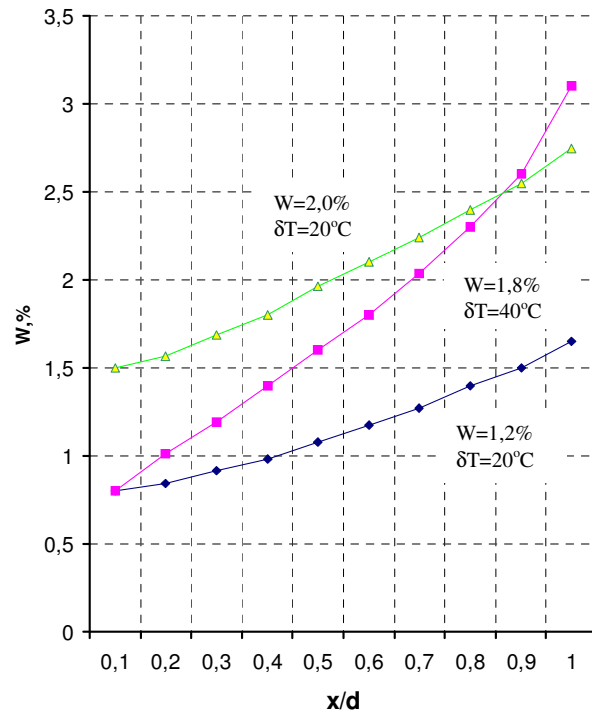


Рис. 7. Распределение влаги в изоляции витков под воздействием температуры

МЕХАНИЗМ И КРИТЕРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ

Вода перемещается по микрокапиллярам, когда влагосодержание, температура и давление пара достаточно низкие. Стремительный рост температуры приводит к интенсивному испарению абсорбированной воды, после чего следует быстрое повышение давления пара во внутренних слоях, которое может достичь уровня, достаточного для того, чтобы выдавить масло из микрокапилляров изоляции. Это явление может изменить механизм движения воды с молекулярного потока на вязкий поток через микрокапилляры, что приведет к двум опасным последствиям:

- Появление полостей, заполненных паром, на поверхности изоляции (образование так называемых «пузырьков»),
- Частичная или полная депропитка витковой изоляции.

Макропоры в изоляции – это плоские капилляры между соседними волокнами целлюлозы. Выдавливание масла происходит, если:

$$P \geq \frac{2\sigma}{d}, \quad (10)$$

где σ - межфазное натяжение между маслом и включениями пара в плоском капилляре, d – диаметр капилляра.

Предельное (минимальное) давление можно найти по уравнению сорбции (1),

а критерии образования пузырьков выразить в виде функции влагосодержания и температуры:

$$\frac{\varpi}{W_o} \cong \frac{2KB}{(B+2)[2k-(B+2)]} \quad (11)$$

$$B = \frac{4\sigma(K-1)}{P_s d}$$

где P_s – давление насыщенного пара воды, $K = \exp(678/T)$,

d – это некоторая функция плотности материала (исследования [20] показали, что диаметр капилляра может варьироваться в пределах от 0.01 до 7 μm),

σ - межфазное натяжение (это функция температуры и наличия полярных примесей, как правило, продуктов старения масла).

Таким образом, условия образования пузырьков зависят не только от температуры, но также от структуры целлюлозы и качества масла.

На Рис.8 показана важность влияния состояния масла и размера пор. Если масло состарено, а изоляционный материал имеет крупные макрокапилляры, можно ожидать образования пузырьков при более низких температуре и влагосодержании [3]. В [3] также показано, что насыщение изоляции азотом стимулирует образование пузырьков. Действительно, любая посторонняя молекула вблизи активного центра в молекуле целлюлозы оказывает некоторое экранирующее влияние на ее поле, ослабляя влияние на молекулы воды и посторонние молекулы.

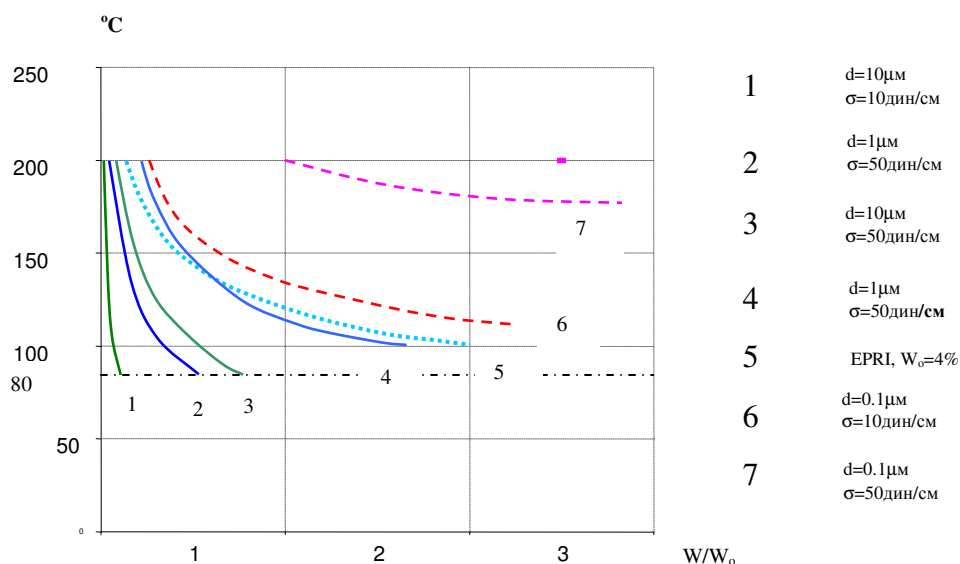


Рис.8 Условия образования пузырьков

ОПАСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОДЫ. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ПРАКТИКА

Исследование моделей изоляции трансформатора [12, 21] показало, что запас электрической прочности как главной, так и межвитковой увлажненной изоляции определяется электрической прочностью масла. Опасное воздействие растворенной воды заключается в резком снижении электрической прочности масла, сопровождающемся ростом его относительной влажности из-за роста проводимости мехпримесей или образования эмульсии вблизи поверхностно-активных веществ [19].

Растворенная вода – это проблема «холодного» трансформатора. Большое количество повреждений происходило после включения увлажненных трансформаторов в зимнее время [21].

Наличие свободной воды в масле является – это, по существу, проблема «замерзшего» трансформатора.

Несмотря на то, что плотность масла меньше плотности льда, принудительный или даже конвекционный поток масла способен поднять лед в критическую зону. Подобное явление часто являлось причиной пробоя изоляции РПН [19]. Более того, капля воды в вязком потоке может оказаться генератором частиц и привести к взрыву под воздействием электрического поля. Отмечалось снижение электрической прочности до 0.2 - 0.4 кВ/мм.

Любое внезапное проникновение свободной воды может привести к мгновенному аварийному повреждению трансформатора. Например, трансформатор 400 МВА 220 кВ повредился из-за пробоя масляного промежутка между вводом и баком после резкого охлаждения под воздействием дождя и проникновения около 500 г воды через поврежденное уплотнение ввода протяжной конструкции.

Образование пузырьков – это проблема «горячего» трансформатора. По нашему опыту, это гипотетическая опасность, так как серьезных повреждений не наблюдалось. Но эта проблема связана не только с высоким влагосодержанием, но также и с продуктами старения масла.

Вода ускоряет разложение целлюлозы при ее старении, и деполимеризация целлюлозы пропорциональна влагосодержанию. Однако этот процесс становится гораздо более опасным в присутствии кислот.

Поэтому при контроле состояния увлажненного трансформатора необходимо учитывать загрязнение масла частицами и продуктами старения. Желательно (хоть это и не всегда осуществимо) измерять содержание воды в компонентах твердой изоляции. Это необходимо для прогнозирования состояния, при котором относительная влажность масла может значительно возрасти, а также для выявления дефектного состояния трансформатора, при котором «свободная» вода может проникнуть в бак.

КЛАССЫ УВЛАЖНЕНИЯ

Основным назначением введения классов увлажнения - это определение дефектного состояния трансформатора, при котором имеет место критическое снижение электрической прочности, вызванное накоплением воды в масле при высокой температуре и последующем охлаждении, приводящим к увеличению относительной влажности масла.

Рекомендуется следующая классификация, подтвержденная опытным путем:

КЛАСС I: «хороший» – сухой трансформатор, влагосодержание в изоляции 0.5 - 1.0% или менее. Существенного изменения влагосодержания при изменении температуры не происходит (как правило, остается на уровне 15 мкл/л). Влагосодержание масла уменьшается экспоненциально в зависимости от температуры и составляет примерно 3% или менее при 60 – 70 °С.

КЛАСС II: «удовлетворительный» – нормальное состояние трансформатора, при котором сохраняется относительно низкое влагосодержание масла (40-50%) при наиболее низких эксплуатационных температурах.

Характерные параметры такого состояния: максимальное влагосодержание изоляции 1-1.5%, и незначительное увеличение влагосодержания масла (обычно менее чем в два раза) после прогрева и поддержания температуры испытания.

Ожидаемое относительное влагосодержание масла при температуре 60-70 °С на уровне около 5%.

КЛАСС III: «возможно увлажненный» – состояние трансформатора, которое может привести к увеличению относительного влагосодержания масла до уровня более 50% при эксплуатационных температурах.

КЛАСС IV: «увлаженный» – состояние, которое может привести к образованию эмульсии при эксплуатационной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

[1] W.McNutt, A.Bassetto, P.Griffin. Tutorial on electrical-grid insulating papers in power transformers, 1993 Doble Clients Committees Fall Meeting

[2] P.J.Griffin. Water in transformers – so what. National Grid Conference on condition monitoring in high voltage substations, Dorling, May 1995

[3] T.Oommen, E.Petrie, S.Lindgren. Bubble generation in transformer windings under overload conditions, Proceedings of the 62-th annual international Conference of Doble Clients, 1995, sec. 8.5

[4] V.Davydov, O.Roizman and W.Bunwich, Transformer insulation behavior during overload, Proceedings of EPRI substation equipment diagnostics Conference, New Orleans, 1997

[5] P.Christensen and G.Ohlson, The behavior of moisture and free water in power transformer, Proceedings of the 65-th annual international Conference of Doble Clients, 1998, sec. 8-3

[6] T.Oommen, On-line moisture monitoring in transformers and oil processing systems, CIGRE Symposium, Berlin, 1993, Paper 110-03

[7] V.Sokolov, B.Vanin, P.Griffin. Tutorial on deterioration and rehabilitation of transformer insulation, CIGRE WG 12.18 «Life Management» Colloquium in Lodz, Poland, 1998

[8] J.Aubin, B.Noirhomme, Modelization of water migration in power transformers, CIGRE WG 12.18 «Life Management» Colloquium in Lodz, Poland, 1998

- [9] V.Sokolov, B.Vanin, In-service assessment of water content in power transformers, Proceedings of the 62-th annual international Conference of Doble Clients, 1995, sec. 8-6
- [10] V.Sokolov, B.Vanin, Evaluation of power transformer insulation through measurement of dielectric characteristics. Proceedings of the 63-th annual international Conference of Doble Clients, 1996, sec. 8-7
- [11] W.Lampe, E.Spicar, The oxygen-free transformer reduced aging by continuous degassing, CIGRE-1976, paper 12-05
- [12] V.Sokolov, Experience with the refurbishment and life extension of large power transformers, Minutes of the 61-th annual international Conference of Doble Clients, 1994, sec. 8-7
- [13] D.Shroff, A.Stannett, A review of paper aging in power transformers, IEEE Proceedings, vol. 132, November 1985
- [14] J.H. de Boer, The dynamical character of adsorption, Oxford at the Clarendon Press, 1953
- [15] W.Lampe, Uber des eindimensionale lineare und nichlineare diffusionproblem, Archiv fur Elektrotechnik, 1969, 53, H3
- [16] S.Foss, L.Savio, Mathematics and experimental analysis of the field drying of power transformer insulation, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, # 4, 1983
- [17] R.Bitsch, Gase und Wasserdamps in Isoileroel und ihr Ennfluss an seine elek-trische Festigkeit in inhomogenen Wechsel-feld, Thesis, The Technical University in Hanover, 1972 (in German)
- [18] P.Griffin, et al. Comparison of water equilibrium in silicon and mineral oil transformers, Minutes of the 55-th annual international Conference of Doble Clients, 1988, sec. 10-9.1
- [19] V.Sokolov, Methods to improve effectiveness of diagnostics of insulation condi-tion in large power transformers, The-sis, The Technical University in Kiev, 1982 (in Russian)
- [20] T.Suzuki, M.Takagi, Oil impregnation in transformer boards, IEEE Transaction in Electrical Insulation, vol. EI-19, # 4, 1984
- [21] V.Ryzhenko, V.Sokolov, Effect of moisture on the dielectric strength of winding insulation in power transformers, «Electrical Stations» (Moscow), 1981, # 9
- [22] T.Oommen, Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems, Electrical Electronics Conference, Chicago, October 1983
- [23] V.Davidov, O.Roizman, W.Bonwick, Evaluation of water content in transformer insulation systems, Proceedings of EPRI substation equipment diagnostic Conference, Vol.1, 1998
- [24] P.Kuts et al. Studying the moisture-transfer coefficient in dielectric cellulose ma-terial under conditions of yacuum and atmospheric Air, Engineering and Physical Journal, Vol. XXVI, # 4, April 1974 (in Russian)
- [25] Y.Du et al., «Moisture equilibrium in transformer paper-oil system», IEEE Elec-trical Insulation Magazine, Janu-ary/February 1999, Vol. 15, №1
- [26] V.Sokolov, B.Vanin, P.Griffin, «Consideration on moisture distribution in trans-formers», Proceedings of the 66-th International Conference of Doble Clients, 1999
- [27] R.Kaufman, C.Shimansky, E. McFadien. «Gas and moisture equilibrium in transformer oil», Transactions AIEE, vol.74, p.111, 1955

