

## ВОДА И ИЗОЛЯЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Б. В. Ванин, В. В.Соколов

Рассмотрена физическая сторона явлений, обусловленных наличием воды в жидкой внутренней изоляции трансформаторов.

### СОСТОЯНИЕ ВОДЫ В ИЗОЛЯЦИОННОМ МАСЛЕ

Вода в изоляционном масле может быть в двух видах:

1) растворенная вода;

2) эмульгированная вода.

Первая в форме динамического равновесия распределяется в полях, создаваемых активными центрами молекул масла и в полях, создаваемых молекулами активных примесей в масле, ввиду чего для нее укоренились два разных названия: "растворенная вода" и так называемая "связанная вода", второе из которых не вполне правильно.

Кроме того, вода концентрируется в механических примесях, содержащихся в масле, в частности, в волокнах целлюлозы.

### РАСТВОРЕННАЯ ВОДА

Рассмотрим сначала воду, растворенную в масле, как если бы оно было лишено примесных активных веществ.

Растворенная в масле вода находится в виде отдельных молекул, движущихся между молекулами масла, которые также совершают тепловые движения. Движения молекул воды не вполне свободны из-за их притяжения к активным участкам молекул масла ("водородные связи"), но нет и полной заторможенности молекул воды, так как любые движения на молекулярном уровне прекращаются лишь при нулевой абсолютной температуре. Из-за наличия упомянутых сил притяжения для удаления растворенной воды из масла необходимо затратить некоторую энергию, примерно вчетверо большую, чем нужно для нагрева такого же количества воды от 0°C до 100°C.

Растворимость воды в углеводородных маслах подчиняется закону Генри. То есть, концентрация воды при данной температуре в равновесном состоянии пропорциональна относительной влажности воздуха.

Температурная зависимость максимальной растворимости воды может быть аппроксимирована выражением

$$W_m = W_0 \cdot e^{-B/T}, \text{ где } W_0 \text{ и } B - \text{ константы.}$$

В таблице 1 приведены значения параметров  $W_0$  и  $B$  для некоторых масел по данным *Bitsch, Ootmen, Paul Griffin*.

### Параметры температурной зависимости растворимости водяных паров в различных трансформаторных маслах

| Автор         | Тип масла                          | Параметры растворимости |          | Максимальная растворимость при t °С |      |     |     |
|---------------|------------------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------------|------|-----|-----|
|               |                                    | $W_0 \cdot 10^{-7}$     | <i>B</i> | 0                                   | 20   | 50  | 80  |
| <b>Bitsch</b> | 1) Трансформаторное<br>$C_A = 5\%$ | 1,697                   | 3777     | 16,6                                | 42,8 | 142 | 383 |
|               | 2) То же $C_A = 8\%$               | 2,308                   | 3841     | 17,9                                | 46,8 | 158 | 434 |
|               | 3) То же $C_A = 16\%$              | 2,276                   | 3783     | 21,8                                | 56,2 | 186 | 505 |
| <b>Oommen</b> | Трансформаторное                   | 2,6302                  | 3845     | 20,1                                | 525  | 178 | 489 |
| Paul          | Трансформаторное                   | 1,2288                  | 3608     | 22,3                                | 55   | 173 | 447 |
| Griffin       | Силиконовое                        | 1,9525                  | 2733     | 87,7                                | 174  | 413 | 848 |

## ГИДРАТНАЯ (СВЯЗАННАЯ) ВОДА

Вода, растворенная в масле вблизи растворенных в масле молекул некоторых активных веществ, в качественном отношении находится в таком же состоянии теплового движения, как и просто растворенная в масле вода, но, ввиду более сильного поля притягивающих молекулы воды молекул активных веществ местная концентрация растворенной воды вблизи них гораздо выше, чем собственная в масле. Удаление такой растворенной воды требует энергии ("энергии активации") на два-три порядка большей, чем удаления "просто растворенной" воды собственно из масла. Активные молекулы - центры притяжения - вместе с окружающими их молекулами вещества из раствора называются сольватами, а если это окружающие молекулы воды, как в данном случае, то - гидратами. Типичными активными веществами, образующими в масле такие гидраты, являются ароматические соединения, главным образом, нафтеноароматические углеводороды.

Наличие гидратов в масле повышает его общую растворимость очень значительно, иногда на порядок и более. Это оказывается причиной повышения гигроскопичности состаренных масел, потому что в них образуются продукты старения, которые способны гидратироваться, обезвоживая остальную часть масла. С другой стороны, свежее масло, содержащее гидраты, после осушки почти полностью освобождается от внегидратной и лишь отчасти освобождается от гидратной воды. Остающаяся часть последней постепенно перераспределяется в масле, вновь повышая содержание внегидратной воды. Процессы перераспределения воды между собственно маслом и содержащимися в нем гидратами длительны по времени, сравнимы с сезонными изменениями влаги в масле, не защищенных от атмосферы трансформаторов.

## ЭМУЛЬГИРОВАННАЯ ВОДА

В эмульгированном состоянии часть растворенной воды оказывается при понижении температуры масла до "точки росы" (которая при термодинамическом равновесии одинакова с точкой росы контактирующего с маслом воздуха) или ниже этой точки. Эмульсия представляет собой глобулы воды, висащие в масле. Размер глобул зависит от точки росы и фактической температуры заэмульгированного водомасла. При этом для более низких точек росы размеры глобул меньше. При наличии в масле поверхностно-активных веществ (например, нафтеноатов металлов) эмульсия более устойчива.

Образование эмульсии воды в масле неизбежно при понижении температуры масла, так как для любого, даже малого, содержания воды существует такая, достаточно низкая, температура масла, при которой в нем выпадает роса.

В таблице 2 приведены данные о температуре точки росы масла *Shell Diala* примерно соответствующего по содержанию ароматических углеводородов маслу ГК.

Влагосодержание масла

Таблица 2

|                |     |    |   |   |    |    |    |
|----------------|-----|----|---|---|----|----|----|
| Точка росы, °С | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|----------------|-----|----|---|---|----|----|----|

|                                |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Абсолютная влажность масла, г/ | 10 | 13 | 17 | 21 | 27 | 34 | 43 |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|

Это явление, вообще говоря, нежелательно, так как глобулы воды концентрируются в напряженных участках поля, могут понизить электрическую прочность масла. Однако выпадение росы при небольших количествах растворенной воды не является катастрофой. Глобулы малого размера поляризуются в электрическом, притом слабонеоднородном поле, каким оно создается при разработке конструкции трансформатора, настолько мало, что действующей в результате поляризации на глобулы силы недостаточно для перемещения ее на участки с повышенной напряженностью поля и создания опасности понижения электрической прочности масла.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИМЕСИ И ВОДА

Содержание воды в гигроскопических механических примесях, взвешенных в масле, зависит от относительной влажности масла. Увлажнение волокон целлюлозы, взвешенных в масле, происходит аналогично увлажнению деталей целлюлозной изоляции обмотки.

Изотерма влагопоглощения целлюлозы характеризуется тремя участками:

- 1) "участок Лэнгмюра", соответствующий содержанию воды примерно (0-3)% по массе, который приближенно можно характеризовать как область мономолекулярной адсорбции;
- 2) "участок полимолекулярной адсорбции" с пределами по влажности (3-7)%;
- 3) область капиллярной конденсации с влажностью более 7 %.

Ю. Калентьев показал, что влажность (более 6%) волокна целлюлозы могут снижать электрическую прочность масла практически в такой же степени, как и металлические проводящие частицы.

Вода в количествах, соответствующих "участку Ленгмюра" не способна существенно вредно влиять на электрические свойства материала, что в частности проявляется в том, что электрическими методами увлажнения материала в этом случае обнаруживается плохо.

## ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В МАСЛЕ

Наличие в масле гидратной и просто растворенной воды обуславливает и различие в результатах измерения содержания воды в масле разными методами. Так, измерение хроматографическим методом с предварительным испарением пробы масла дает суммарное содержание гидратной и растворенной воды ("полную воду"); измерения, использующие равновесный способ извлечения водяного пара из масла в газовый объем, независимо от принципа самого измерения и используемого прибора (например, *Panametrics*, хроматограф) дают содержание растворенной воды; измеренной с предварительным экстрагированием воды из масла активным растворителем, как это делается при использовании реактивов Фишера, дает суммарное содержание растворенной воды и части гидратной. Вопрос о том, нужно ли контролировать содержание воды в масле трансформаторов и каким способом, будет рассмотрен ниже.

Обычно содержание гидратной и растворенной воды в трансформаторном масле сравнимы между собой.

Таким образом, применяемые методы измерений растворенной воды дают лишь ограниченную информацию о степени и опасности увлажненного масла в трансформаторах особенно после длительной их эксплуатации (старение, загрязнение и т.п.).

В то же время измерения влажности, ведущие к определению "полно воды", "растворенной воды" (хроматографический, экстракционный) упомянутые выше, также не дают нужную информацию в полном объеме, так как служат цели измерения абсолютного содержания воды, а не ее способности образовывать эмульсию или увлажнять и увеличивать проводимость взвешенных в масле механических примесей. Такие средства представляют интерес, прежде всего, для исследовательских целей, в том числе для оценки состояния трансформатора с целью продления его срока службы.

Необходима разработка достаточно простого и удобного средства для опытного контроля этой концентрации в трансформаторном масле применительно к условиям эксплуатации трансформаторов.

Таким средством может быть определение относительной влажности масла и (или) прямое определение точки росы в жидкостях, например, нефелометрическим методом.

Важно отметить, что такой контроль воды в масле может быть устроен без необходимости отбора проб масла, непосредственно под напряжением.