

## В ы в о д ы

При тарировке пятиканальных насадков наряду с определением  $K_{\delta}^{\delta} = f(\delta)$  целесообразно также проанализировать возможности использования кривых  $K_{\delta}^{\delta}$  в соответствии с формулами (8) – (14).

Четырехканальный насадок более прост в изготовлении и удобен в работе. Однако диапазон измерений углов  $\delta$  с помощью тарировочной кривой  $K_{\delta}^{\delta}$  меньше, чем при использовании  $K_{\delta}^{\delta}$  в пятиканальном зонде.

Рабочий диапазон угла  $\delta$  между экстремумами  $K_{\delta}^{\delta} = f(\delta)$  зависит от конструктивных особенностей торцевой части насадка.

## Л и т е р а т у р а

1. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л., 1969. 2. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэродинамические измерения. Методы и приборы. М., 1964.

К.Ф. Степанчук, М.А. Трембицкий,  
В.Н. Севастьянюк

## О СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Динамика растворения газовых пузырьков в трансформаторном масле представляет большой практический интерес, так как наличие их в масле может привести к заметному снижению напряжения пробоя масляного промежутка и, следовательно, всей масло-барьерной или бумажно-масляной изоляционной конструкции. Кроме того, в воздушных включениях могут развиваться при переменном напряжении частичные разряды, разрушающие твердые компоненты комбинированной изоляции. Пузырьки в масле могут появляться вследствие частичных пробоев масляных прослоек [1], местных перегревов, вибрации [2]. При этом выделяется растворенный в масле газ и газы углеводородного ряда. Работ, посвященных динамике растворения газовых пузырей в масле, мало [3], материал их ограничен, в основном, изучением скорости растворения газовых пу-

зырьков, образующихся при частичных разрядах. Состав исходных газов в пузырьке при этом неизвестен. В данной работе приводятся результаты исследования скорости растворения пузырьков различных газов в насыщенном газом и обезгаженном трансформаторном масле.

Точное теоретическое описание процесса растворения газового пузырька в жидкости требует решения уравнения диффузии вида

$$\nabla^2 N = - D \frac{\partial N}{\partial t} \quad (1)$$

При этом

$$\frac{dG}{dt} = 4\pi r^2 k \left( p_{\Pi} + \frac{2\sigma}{r} - \alpha N \right), \quad (2)$$

где  $N$  -- концентрация газа в масле;  $G$  и  $p_{\Pi}$  -- вес и давление газа в сферическом пузырьке большого радиуса;  $r$  -- радиус пузырька;  $\sigma$  -- поверхностное натяжение;  $D, k$  и  $\alpha$  -- коэффициенты, зависящие от рода газа, масла и других факторов.

Решить эту систему уравнений с учетом подвижной стенки пузырька трудно. Поэтому в первом приближении примем  $\frac{\partial N}{\partial t} = 0$  и  $\alpha N = p_M$ , т.е. процесс растворения -- квазистационарный и концентрация газа в масле у стенки пузырька пропорциональна давлению растворенного в масле газа ( $p_M$ ). При таких допущениях задача описывается соотношениями:

$$\frac{dG}{dt} = 4\pi r^2 k \left( p_{\Pi} + \frac{2\sigma}{r} \right); \quad (3)$$

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{M \left( p_{\Pi} + \frac{2\sigma}{r} \right)}{RT}, \quad (4)$$

где  $p_{\Pi}$  -- избыточное давление газа в пузырьке бесконечного радиуса  $p_{\Pi} = p_{\Pi} - p_M$ ;  $M$  -- молекулярный вес газа;  $R$  -- универсальная газовая постоянная;  $T$  -- абсолютная температура. Решая совместно (3) и (4), получим в общем случае

$$t = A(r_0 - r) \frac{p_{\Pi}}{p_u} - A \frac{2\sigma}{p_u} \left( \frac{p_{\Pi}}{p_u} - \frac{2}{3} \right) \ln \frac{\frac{2\sigma}{r_0} + p_u}{\frac{2\sigma}{r_0} + p_u \frac{r}{r_0}}. \quad (5)$$

Здесь  $A = \frac{M}{RTk}$ ,  $r_0$  — начальный радиус пузырька.

Эксперименты проводились для насыщенного воздухом и насыщенного газом трансформаторного масла. Растворялись пузырьки воздуха, водорода, метана, этилена. Пузырьки вводились в герметизированный шприц объемом 20 мл, заполненный маслом. Контроль за размерами осуществлялся с помощью микроскопа. Результаты экспериментов приведены на рис. 1 и 2. На этих же рисунках приведены зависимости  $t = f(r, r_0)$ .

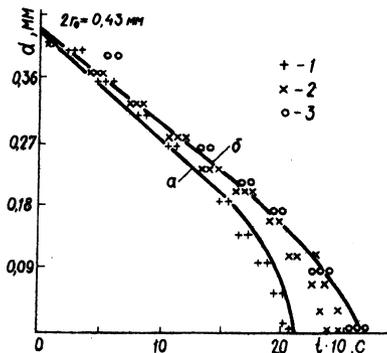


Рис. 1. Растворение газовых пузырьков в обезгаженном трансформаторном масле (ГОСТ 982—68 ТКП): 1—этилен; 2—метан; 3—воздух; а, б — кривые, построенные по соответствующим формулам.

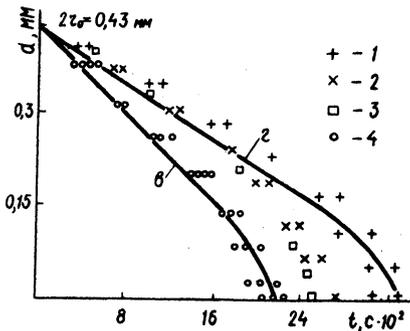


Рис. 2. Растворение газовых пузырьков в насыщенном газом трансформаторном масле: 1—водород; 2—этилен; 3—метан; 4—воздух; в, г — кривые, построенные по формулам.

соответствующие следующим аппроксимациям: для обезгаженного масла ( $p = 10 \div 20$  мм рт. ст.); а)  $t = 1340 (r_0 - r) - 80 + 18 \ln (0,5 + 10^2 \frac{r}{r_0})$  (этилен); б)  $t = 1500 (r_0 - r) - 70 + 16 \ln (0,5 + 10^2 \frac{r}{r_0})$  (метан, воздух); для насыщенного газом масла в)  $t = 13500 (r_0 - r) - 830 + 180 \ln x (0,5 + 10^2 \frac{r}{r_0})$  (воздух); г)  $t = 20000 (r_0 - r) - 1000 + 220 \ln (0,5 + 10^2 \frac{r}{r_0})$  (водород). Аналогичные аппроксимации зависимости можно получить и для других газов. Как

видим, соотношения а)—г) соответствуют выражению (5), т.е. принятые допущения приводят к качественному решению, правильно описывающему процесс растворения.

### В ы в о д ы

Скорость растворения пузырьков газа в масле незначительно зависит от рода исходного газа в пузырьке.

В обезгаженном масле пузырьки газа растворяются примерно на порядок быстрее, чем в насыщенном воздушном масле.

Полученное теоретически выражение (5) качественно правильно описывает процесс растворения пузырьков газа в масле.

### Л и т е р а т у р а

1. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. Под ред. Г.С. Кучинского. М.—Л., 1963. 2. Степанчук К.Ф., Ржевская С.П. О возможности выделения газа из трансформаторного масла при вибрации в масле твердых деталей. — "Изв. вузов. Энергетика", 1965, № 9. 3. Пинталь Ю.С. Растворение газовых включений в минеральном изоляционном масле. — "Изв. вузов СССР. Энергетика", 1964, № 7.

А.А. Полищук

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В КЛИСТРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Идеализированная теория клистронного генератора, выполненного на отражательном клистроне, рассматривает наиболее общие физические явления в этом приборе, не затрагивая тех электронных процессов, которые могут вызывать отдельные факторы реальной системы.

Увеличение угла пролета электронов через СВЧ-зазор влечет за собой значительное увеличение монотронных потерь, которые становятся сравнимыми с тепловыми потерями в резонаторе. Поэтому большой практический интерес представляет рассмотрение влияния модуляционных потерь на основные энергетические соотношения в клистронном генераторе.