

## Определение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле

© А.Л. Бычков, С.М. Коробейников, А.Ю. Рыжкина

Новосибирский государственный технический университет,  
630092 Новосибирск, Россия  
e-mail: kor\_ser\_mir@ngs.ru

(Поступило в Редакцию 15 апреля 2010 г.)

Коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле был определен путем оптической регистрации динамики растворения пузырьков водорода в чистом обезгаженном масле. Показано, что значения коэффициента диффузии примерно на два порядка меньше определенных ранее. Полученный результат важен для хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле, поскольку дает основания утверждать, что водород не столь летуч, как неявно предполагалось в ряде работ. Это повышает достоверность диагностических заключений при обследованиях высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Одним из основных методов диагностики дорогостоящего высоковольтного маслонаполненного электрооборудования является хроматографический анализ газов, растворенных в масле. При этом распространение газов по объему масла осуществляется за счет диффузии и возникновения течений. Кроме этого, диффузия играет важную роль при сохранении газов в пробоотборниках, а также при извлечении их для анализа. Наиболее информативным и проблемным газом при анализе является водород, поскольку он образуется практически при любых энергетических процессах, происходящих в электрооборудовании. При этом интуитивно предполагается, ввиду малого размера атома водорода, что он легко „улетает“ из образца масла на всех этапах диагностики. Однако коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле определен, на наш взгляд, недостаточно корректно.

Коэффициент диффузии водорода в масле определялся только в работе [1]. Газ извлекали из жидкости с помощью устройства, представляющего собой цилиндрический сосуд, частично заполненный маслом. Толщина слоя масла составляла 8 см. До начала опытов воздух из верхней части цилиндра либо удалялся посредством вакуумирования, либо водород диффундировал в воздушную среду. В первом случае происходило почти полное выделение газа из масла примерно за 0.5 h. Во втором случае концентрация водорода в газовой фазе за полчаса не достигала и пяти процентов. Обработку данных проводили в предположении, что процесс диффузии квазистационарен.

Однако существуют несколько моментов, которые заставляют усомниться в корректности определения этого коэффициента. Во-первых, он оказался аномально высоким —  $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Для сравнения приведем значение коэффициента самодиффузии воды в воде  $2.5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  [2]. В масле с учетом его вязкости коэффициент диффузии любых молекул должен быть еще меньше. Во-вторых, диффузии в предварительно

откачанный объем и в объем с газом должны идти с одинаковыми скоростями. А в работе [1] значения скорости различаются почти на два порядка (без использования ультразвука). В-третьих, в анализируемой работе предполагается квазистационарное распределение водорода в трансформаторном масле (когда поток определяется делением концентрации на размер области). А на самом деле так должен происходить глубоко нестационарный процесс.

В нашей работе используется наиболее простой, понятный и близкий по характеру происходящих процессов к процессам в маслонаполненном электрооборудовании способ определения коэффициентов диффузии газов за счет растворения микропузырьков газа в ненасыщенной газом жидкости [3]. Для получения данных необходимо знать растворимость газа  $C$ , зарегистрировать зависимость радиуса микропузырька  $R$  от времени  $t$ .

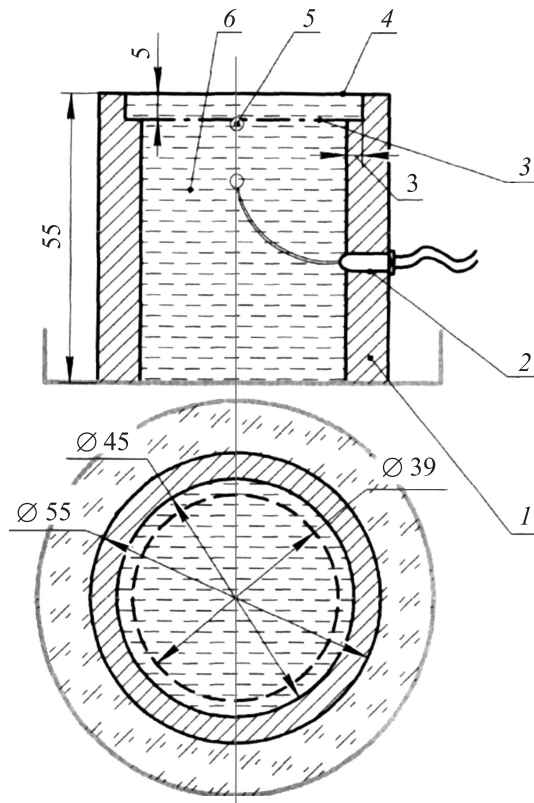
Основываясь на выражениях, приведенных в [3], для полного растворения пузырька у стенки, можно получить приближенное выражение, описывающее динамику растворения идеально сферического пузырька, из которого, решив квадратное уравнение, несложно определить коэффициент диффузии:

$$\frac{dR}{dt} = CD \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{(\pi D t)^{1/2}} \right). \quad (1)$$

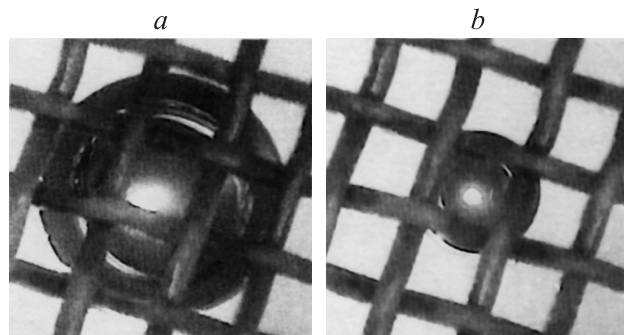
Для измерений была разработана экспериментальная ячейка в виде вертикального цилиндра  $1$  (рис. 1) с вмонтированной в стенку иглой  $2$  для подвода диагностируемого газа. Дно и крышка ячейки изготовлены из стекла, что дает возможность регистрации динамики растворения микропузырька газа. Объем заполняется дегазированным трансформаторным маслом, крышка  $4$  препятствует проникновению воздуха в систему. Подготовленная ячейка с маслом ставится под микроскоп, и по газоподводящей трубке в объем масла  $6$  через иглу вводится пузырек диагностируемого газа, который задерживается на сетке  $3$ . Сетка является необходимым

элементом в системе, так как она позволяет считать растворяющийся пузырек неподвижным и сферическим. Динамика растворения микропузырька водорода регистрируется с помощью видеокамеры-окуляра, подключенной к персональному компьютеру.

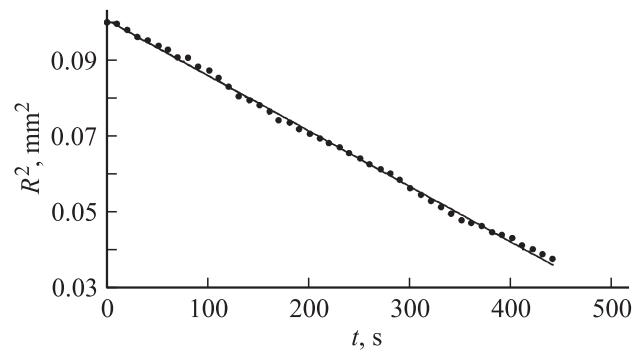
Забор и нагнетание газа производится пробоотборником Elchgom [4], который представляет собой комбинацию специального цельностеклянного шприца с поршнем индивидуальной притирки и вакуумного трехходового крана. Первый выход подключается к игле ячейки, а второй — к баллону с диагностируемым газом. Возбуждение резких скачков давления в системе на



**Рис. 1.** Эскиз экспериментальной ячейки. 1 — корпус ячейки; 2 — игла; 3 — сетка; 4 — крышка; 5 — микропузырек газа; 6 — объем масла.



**Рис. 2.** Пузырек водорода: *a* — в начальный, *b* — в конечный момент регистрации.



**Рис. 3.** Диаграмма растворения микропузырька водорода.

баллон устанавливается вентиль тонкой регулировки. Поршень шприца смазывается вакуумной смазкой, чтобы устранить утечку газа и попадание воздуха в систему. Непосредственно перед проведением эксперимента газовый тракт продувается диагностическим газом, чтобы избавиться от скопившегося в трубках воздуха.

После регистрации растворения микропузырька водорода видеоизображение раскладывается на кадры (рис. 2) с определенным интервалом времени. Разбивка на кадры позволяет провести необходимые измерения и построить зависимость  $R^2(t)$  (рис. 3).

Определение масштаба проводилось с помощью замера диаметров пузырька и проволочки сетки (диаметр сетки составил  $0.11 \pm 0.01$  mm).

С учетом линейности зависимости, зная растворимость водорода  $C = 0.05$  [5] при  $20^\circ\text{C}$ , возможно определить значение коэффициента диффузии.

Установленный, согласно выражению (1), коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле ГК при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$  составляет  $4 \cdot 10^{-9}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , что почти на два порядка меньше коэффициента, определенного ранее [1].

Авторы благодарны ООО „Чистые газы“ за предоставление образцов газов.

Работа поддержана ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры России“.

### Список литературы

- [1] Михеев Ген.М., Михеев Георг.М., Фадеев Е.Г., Попов А.Ю. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 73–78.
- [2] Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. М.; Л.: Химия, 1974. 200 с.
- [3] Kentisha S., Lee J., Davidson M., and Ashokkumar M. // Chem. Eng. Sci. 2006. Vol. 61. Is. 23. P. 7697–7705.
- [4] Дарьян Л.А. // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. 2000. Вып. 11. С. 234–236.
- [5] Бузаев В.В., Дарьян Л.А., Сапожников Ю.М. // Электрические станции. 2006. № 12. С. 58–63.