ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2011, том 49, № 5, с. 771–776

УДК 621.315.615.2

РАСТВОРЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ГАЗОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

© 2011 г. С. М. Коробейников, Ю. Г. Соловейчик, А. Л. Бычков, Д. В. Вагин, А. В. Мелехов, А. Ю. Рыжкина

ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет

E-mail: kor_ser_mir@ngs.ru

Поступила в редакцию 15.11.2010 г.

Работа посвящена проблеме исследования процессов распространения основных диагностических газов в маслонаполненном электрооборудовании. Экспериментально и численным моделированием растворения пузырька были определены коэффициенты диффузии трех газов: водорода, метана и этана в трансформаторном масле. Значение коэффициента диффузии водорода 3.3×10^{-9} м^2/с не является аномально большим, что имеет важное практическое значение для диагностики маслонаполненного электрооборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Хроматографический анализ газов, растворенных в масле (ХАРГ), считается самым информативным методом диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. При этом берется проба масла из работающего оборудования, из нее извлекаются газы (водород, метан, этан, этилен и ацетилен). По значениям концентраций, по скорости их нарастания и, в особенности, по соотношению концентраций определяется работоспособность устройства. Обычно в трансформаторах место, где осуществляется забор проб, располагается достаточно далеко от мест с высокими значениями напряженности поля, где и происходят процессы газообразования. Достоверность получаемых значений концентраций зависит от того, насколько однородно успевает распределяться растворенный газ и насколько соответствуют друг другу концентрации газов в областях генерации и пробоотбора. В свою очередь, распределение 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, с одной стороны, он образуется практически при любых энергетических процессах, происходящих в электрооборудовании, а с другой стороны, ввиду малого размера атома водорода интуитивно предполагается, что он легко “улетает” из образца масла на всех этапах диагностики.

Однако коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле установлен, по мнению авторов, недостаточно корректно. Коэффициент диффузии водорода в масле определялся только в работе [1], причем полученное значение 10^{-7} м^2/с является неправдоподобно высоким. Для сравнения приведем значение коэффициента самодиффузии воды в воде 2.5×10^{-9} м^2/с [2]. В масле, если учесть его повышенную вязкость, коэффициент диффузии молекул сравнимых размеров должен быть еще меньше. Даже если размер молекулы воды несколько больше размера молекулы водорода, все равно аномально большое значение коэффициента диффузии водорода в масле представляется маловероятным.

Коэффициенты диффузии других диагностических газов вообще не определялись.

Целью настоящей работы является определение коэффициентов диффузии водорода, метана и этана в трансформаторном масле.

МЕТОДИКА ПРИБЛИЖЕННОЙ ОЦЕНКИ

Ранее [3] было рассмотрено растворение газовых пузырьков в жидкости и получено выражение, описывающее зависимость радиуса уединенного неподвижного пузырька от времени в ненасыщенном газом бесконечно большом объеме жидкости:

$$\frac{dR}{dt} = kD\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\left(\pi D\left(t - t_0\right)\right)^{1/2}}\right). \qquad (1)$$

Здесь R – текущее значение радиуса растворяющегося пузырька; D – коэффициент диффузии газа в жидкости; $t - t_0$ – время, прошедшее после начала растворения; k – коэффициент растворимости газа (отношение концентрации газа в жидкости c к концентрации газа в газовой фазе в условиях равновесия между фазами). Это выражение для случая малых пузырьков (и больших коэффициентов диффузии) упрощается за счет пренебрежения вторым членом в скобке, что после несложных преобразований дает возможность получить простое выражение для определения коэффициента диффузии

$$D = \frac{R^2(t_0) - R^2(t)}{2k(t - t_0)}. \quad (2)$$

Для получения данных необходимо знать растворимость газа k, зарегистрировать радиусы микропузырька $R(t_0)$, $R(t)$ в начальный момент времени и после истечения некоторого времени $t - t_0$. Этот способ впервые был предложен и использован еще в работе [4], где определили таким способом коэффициенты диффузии газов в воде.

Однако в общем случае не всегда можно пренебрегать нестационарным членом в выражении (1). При этом для измерения коэффициентов диффузии газов в трансформаторном масле следует решать квадратное уравнение относительно D, в которое подставлять измеренные значения времени, радиуса и производной радиуса по времени.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ

Нестационарное уравнение диффузии в сферически-симметричной среде имеет вид

$$\frac{d}{dt}c(r,t) = \operatorname{div}\left(D\operatorname{grad}\left(c(r,t)\right)\right), \quad (3)$$

где концентрация c зависит от текущего радиуса r и времени t. Так как по условию задачи пузырек в любой момент времени отличается лишь объемом, нет необходимости включать его в расчетную область. В этом случае задача должна решаться как краевая задача с подвижной границей (пузырька) с соответствующими краевыми условиями

$$\left.\frac{\partial}{\partial n}c(r,t)\right|_{r=L} = 0, \quad (4)$$

$$c(r,t)\big|_{r=R(t)} = kC, \quad (5)$$

где L – достаточно удаленная граница, $R(t)$ – радиус пузырька, k – коэффициент растворимости, C – концентрация газа в пузырьке. Очевидно, что в процессе диффузии объем пузырька уменьшается и жидкость, окружающая пузырек, движется вслед за границей пузырька. Следовательно, производная $\frac{d}{dt}c(r,t)$ в (3) должна пониматься как субстанциональная. Также очевидна необходимость выполнения следующего интегробалансного соотношения

$$CV(t) + 4\pi\int_{R(t)}^{L} c(r,t)r^2dr = CV^0, \quad (6)$$

выражающего закон сохранения массы в любой момент времени. В (6) $V(t) = \frac{4\pi}{3}R^3(t)$ и $V^0 = \frac{4\pi}{3}R^3(t^0)$ – соответственно текущий и начальный объемы пузырька.

Для решения уравнения (3) с краевыми условиями (4), (5) воспользуемся методом конечных элементов [5].

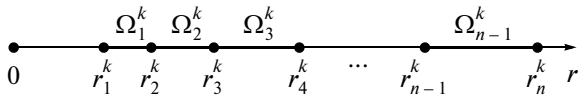

Рис. 1. Вид расчетной области.

Эквивалентная вариационная постановка в форме Галеркина для уравнения (3) с краевыми условиями (4), (5) будет иметь вид

$$\int_{R(t)}^{L} D\cdot\frac{\partial c(r,t)}{\partial r}\cdot\frac{d}{dr}\psi\cdot r^2dr + \int_{R(t)}^{L}\frac{\partial c(r,t)}{\partial t}\cdot\psi\cdot r^2dr = 0, \quad (7)$$

где $\psi = \psi(r)$ – пробная функция.

Разобьем расчетную область на конечные элементы (отрезки) $\Omega_i = [r_i, r_{i+1}]$. После дискретизации уравнения (3) по времени (для этого воспользуемся двухслойной неявной схемой) на некотором k-м временном слое ($t = t^k$) расчетная область будет иметь вид, показанный на рис. 1, где $L = r_n^k$, $R(t^k) = r_1^k$. Свяжем с каждым узлом r_i^k базисную функцию ψ_i^k, определенную как

$$\psi_1^k(r) = \begin{cases} \dfrac{r_2^k - r}{r_2^k - r_1^k}, & r_1^k \le r \le r_2^k \\ 0, & r < r_1^k,\ r > r_2^k \end{cases},$$

$$\psi_n^k(r) = \begin{cases} \dfrac{r - r_{n-1}^k}{r_n^k - r_{n-1}^k}, & r_{n-1}^k \le r \le r_n^k \\ 0, & r < r_{n-1}^k,\ r > r_n^k \end{cases},$$

$$\psi_i^k(r) = \begin{cases} \dfrac{r - r_{i-1}^k}{r_i^k - r_{i-1}^k}, & r_{i-1}^k \le r \le r_i^k \\ \dfrac{r_{i+1}^k - r}{r_{i+1}^k - r_i^k}, & r_i^k \le r \le r_{i+1}^k, \\ 0, & r < r_{i-1}^k,\ r > r_{i+1}^k \end{cases}$$

для $i = 2, ..., n - 1$.

Тогда решение $c^k(r) = c(r, t^k)$ может быть представлено как $c^k(r) = \sum_{i=1}^n q_i^k\psi_i^k(r)$. Полагая $\left.\frac{\partial c}{\partial t}\right|_{t=t^k} \approx \frac{c^k(r) - c^{k-1}(r)}{t^k - t^{k-1}}$, $c^{k-1}(r) \approx \sum_{i=1}^n q_i^{k-1}\psi_i^k(r)$, выбирая в качестве функций ψ функции ψ_i^k и подставляя в (7) выражения для $c^k(r)$ и $\left.\frac{\partial c}{\partial t}\right|_{t=t^k}$, без учета краевого условия (5) после элементарных преобразований получаем матричное уравнение

$$\left(\mathbf{S}^k + \frac{1}{\Delta t^k}\mathbf{M}^k\right)\mathbf{q} = -\frac{1}{\Delta t^k}\mathbf{M}^k\mathbf{q}^{k-1},$$

в котором $\Delta t^k = t^k - t^{k-1}$, а глобальные матрицы $\mathbf{S}^k$ и $\mathbf{M}^k$ составлены из локальных матриц отдельных элементов Ω_i^k вида (для удобства без индекса шага по времени k)

$$S_i = \frac{r_{i+1}^2 + r_{i+1}r_i + r_i^2}{3\Delta r}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_i = \frac{\Delta r}{60}\begin{pmatrix} 2r_{i+1}^2 + 6r_{i+1}r_i + 12r_i^2 & 3r_{i+1}^2 + 4r_{i+1}r_i + 3r_i^2 \\ 3r_{i+1}^2 + 4r_{i+1}r_i + 3r_i^2 & 12r_{i+1}^2 + 6r_{i+1}r_i + 2r_i^2 \end{pmatrix},$$

где $\Delta r = r_{i+1} - r_i$. Для учета краевого условия (3) достаточно зафиксировать вес q_1^k и соответствующим образом изменить матрицу СЛАУ.

После нахождения весов q_i^k (решения СЛАУ), требуя выполнения соотношения (6), которое после дискретизации принимает вид

$$CV\left(t^k\right) + 4\pi\sum_{i=1}^{n-1}\int_{r_i^k}^{r_{i+1}^k}\left(q_i^k\psi_i^k + q_{i+1}^k\psi_{i+1}^k\right)r^2dr = CV^0,$$

находим $V^k = V\left(t^k\right)$ и через него новую границу пузырька $R^k = r_1^k = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}V^k}$. Координаты r_i^k, $i = 2\ldots n-1$, изменяются по формуле

$$r_i^k = r_i^{k-1} - \left(R^{k-1} - R^k\right)\frac{\left(R^{k-1}\right)^2}{\left(r_i^{k-1}\right)^2},$$

что соответствует движению окружающей пузырек жидкости [6].

Данная процедура, включающая сборку и решение СЛАУ, а также изменение сетки, выполняется до полной стабилизации границы пузырька R^k, после этого происходит переход на следующий временной слой.

В математической модели в качестве исходного значения D используется значение, определенное согласно (1). Потом производится сравнение расчетных графиков с графиками, построенными согласно экспериментальным данным, и значение коэффициента диффузии уточняется. Если после расчета с уточненным значением D графики удовлетворительно совпадают, оно принимается за измеренное значение коэффициента диффузии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения измерений была разработана экспериментальная установка, общий вид которой представлен на рис. 2. Ячейка экспериментальной установки представляет собой вертикальный цилиндр (рис. 2, 3), с вмонтированной в стенку иглой для подвода диагностируемого газа. Дно и крышка ячейки изготовлены из стекла, что дает возможность регистрации динамики растворения микропузырька газа. Объем заполняется дегазированным трансформаторным маслом и закрывается крышкой, которая препятствует проникновению воздуха в систему. Подготовленная ячейка с маслом ставится под микроскоп и по газоподводящей трубке в объем масла, через иглу вводится пузырек диагностируемого газа, который задерживается на сетке. Сетка является необходимым элементом в системе, так как она позволяет считать растворяющийся пузырек неподвижным и сферическим. Динамика растворения микропузырька водорода регистрируется с помощью видеокамеры, вмонтированной вместо одного из окуляров микроскопа и подключенной к персональному компьютеру.

Забор и нагнетание газа производится пробоотборником Элхром [7], который представляет собой комбинацию специального цельностеклянного шприца с поршнем индивидуальной притирки и вакуумного трехходового крана. Один выход подключается к игле ячейки, а второй к баллону с диагностируемым газом. Во избежание резких скачков давления в системе на 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 воздуха в полости трубок.

После регистрации растворения микропузырька газа видео раскладывается на кадры (рис. 4) с определенным интервалом времени. Разбивка на кадры позволяет провести необходимые измерения и построить зависимость от времени радиуса и производной радиуса по времени (рис. 4).

Определение масштаба проводилось с помощью замера диаметров пузырька и проволочки сетки (диаметр проволочки составил 0.11 ± 0.01 мм). На рис. 4 приведены типичные фотографии пузырьков для двух моментов времени. При обработке данных использовались следующие значения коэффициентов растворимости: для водорода – 0.049, для метана – 0.409, для этана – 2.925. Все данные взяты из работы [8].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Обработка данных с помощью выражений (1), (2) для серии измерений позволила получить оценку коэффициента диффузии в первом приближении. На рис. 5 приведены результаты расчета коэффициента диффузии водорода в случае растворения пузырьков различных размеров. Можно отметить, что для малых пузырьков выражение (2) дает заниженные значения, а для больших – завышенные по сравнению со значениями, полученными с учетом нестационарности. При этом в случае более простой формулы наблюдается тенденция роста расчетного значения коэффициента диффузии с ростом радиуса пузырька. Этот факт указывает на неприменимость упрощенной формулы (2) для расчета. В дальнейшем

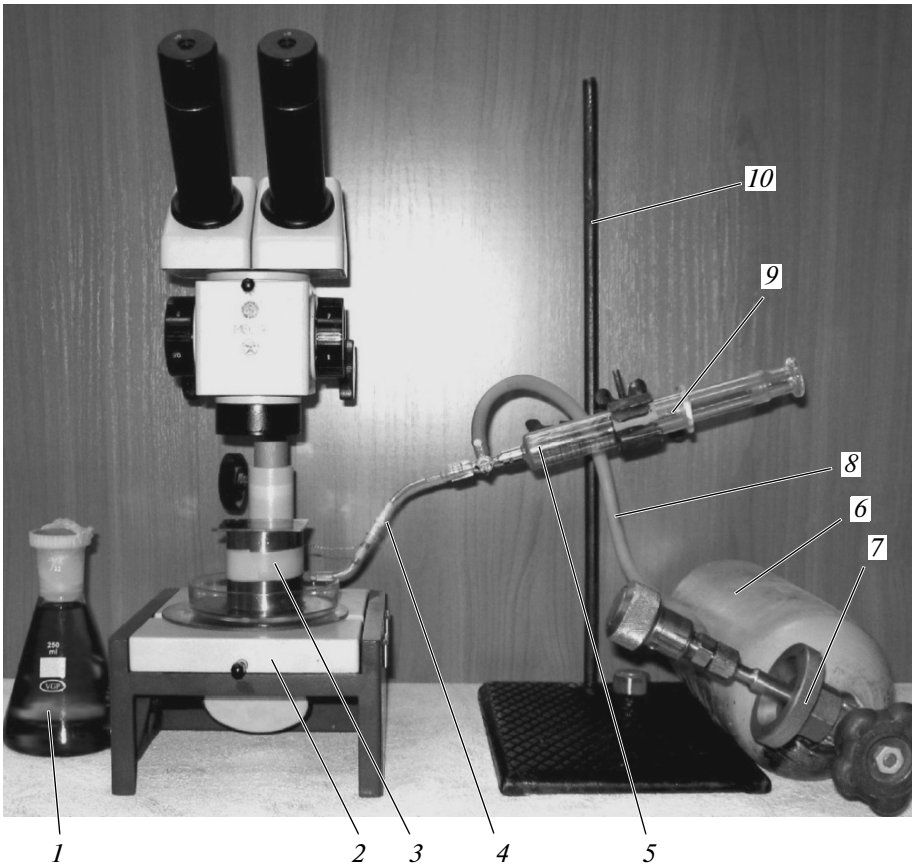

Рис. 2. Экспериментальная установка: *1* – колба коническая, *2* – стол предметный микроскопа МБС-12, *3* – экспериментальная ячейка, *4* – газоподводящая трубка (в ячейку), *5* – пробоотборник Элхром с поршнем индивидуальной притирки, *6* – баллон с диагностическим газом, *7* – вентиль тонкой регулировки, *8* – соединительная трубка, *9* – поршень пробоотборника, *10* – лабораторный штатив.

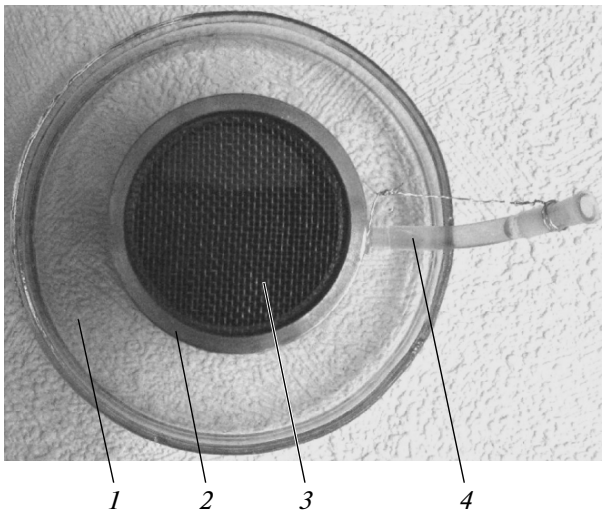

Рис. 3. Ячейка, вид сверху: *1* – чашка Петри, *2* – корпус экспериментальной ячейки, *3* – металлическая сетка, *4* – газоподводящая трубка.

для численных расчетов в качестве начального приближения использовались значения, полученные с помощью выражения (1).

Экспериментальные данные, а также результаты численного расчета растворения водородного, метанового и этанового пузырьков приведены на рис. 6–8.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных данных следует, что использование упрощенного выражения (2) для расчета коэффициентов диффузии является слишком грубым и его можно применять только для оценки, преимущественно в случае малых пузырьков. Выражение (1) получено также без учета движения жидкости, и оно дает правдоподобные оценки при рассмотрении растворения пузырьков водорода, но при растворении других газов ошибка значительна. Это связано с малым коэффициентом растворимости водорода и большими коэффициентами растворимости других газов. Поэтому движение жидкости малозначимо в

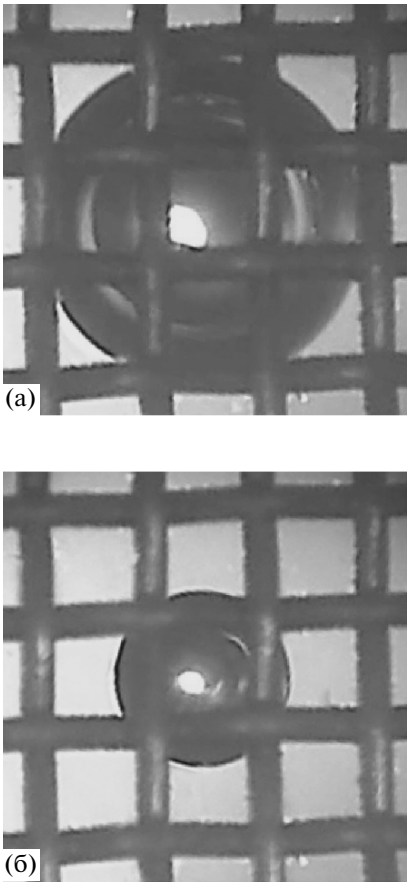

Рис. 4. Пузырек водорода в начальный (а) и в конечный (б) моменты регистрации.

случае водорода и значимо в случае метана и, в особенности, этана.

Действительно, кривые растворения пузырька с учетом и без учета движения жидкости, полученные при компьютерном моделировании растворения, близки для водорода (по крайней мере, на начальной стадии растворения) и резко отличаются в случаях метана и этана.

На основе обработки серии экспериментов были получены следующие значения коэффициентов диффузии для трех основных диагностических газов в трансформаторном масле марки ГК при комнатной температуре:

для водорода $D = (3.3 \pm 1) \times 10^{-9}$ м^2/с,

для метана $D = (1 \pm 0.3) \times 10^{-9}$ м^2/с;

для этана $D = (4 \pm 1) \times 10^{-10}$ м^2/с.

Подчеркнем, что полученные значения коэффициента диффузии водорода почти на два порядка меньше коэффициента диффузии, определенного ранее [1]. Это важно для диагностики маслонаполненного оборудования, так как позволяет утверждать, что водород не столь летуч, как явно и неявно предполагалось при хроматографическом анализе

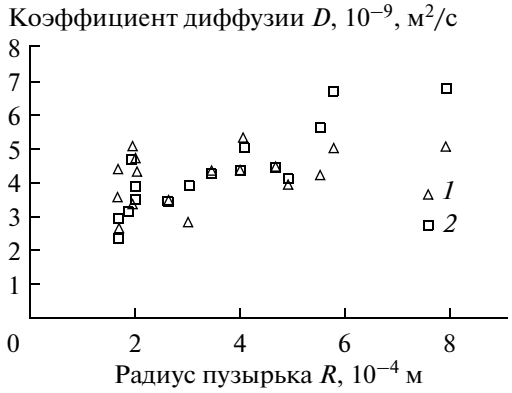

Рис. 5. Расчет коэффициента диффузии водорода по упрощенным выражениям: *1* – выражение (1), *2* – выражение (2).

продуктов разложения жидкой электрической изоляции под действием эксплуатационных факторов.

Для оценки поведения коэффициентов диффузии с изменением температуры были проведены несколько экспериментов при повышенной температуре до 50°С. Коэффициент диффузии увеличился примерно в пять раз, что не противоречит приблизительному выражению Ли–Чанга [9]

$$D = \frac{1.84 \times 10^{-3}}{\eta r},$$

где r – радиус молекулы растворенного вещества. Согласно этой оценке коэффициент диффузии связан с вязкостью обратно пропорциональной зависимостью. Поскольку вязкость масла падает при изменении температуры от 20°С до 50°С примерно в пять раз, это приводит к росту коэффициента диффузии в пять раз.

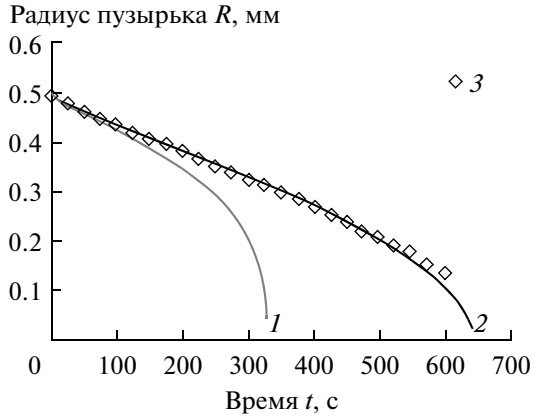

Рис. 6. Динамика растворения пузырька водорода: *1* – расчет без учета движения жидкости, *2* – с учетом, *3* – экспериментальные точки. Коэффициент диффузии при численном расчете $D = 3.3 \times 10^{-9}$ м^2/с, начальное приближение $D = 3.9 \times 10^{-9}$ м^2/с.

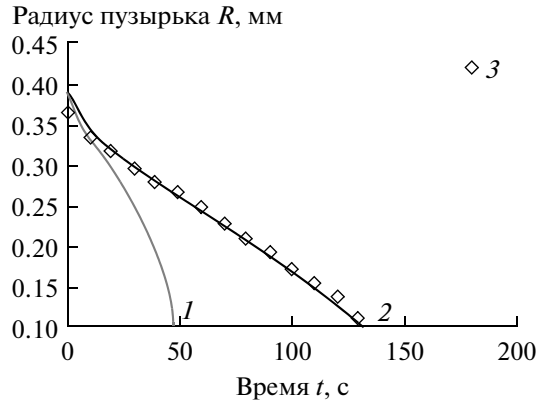

Рис. 7. Динамика растворения пузырька метана: обозначения те же, что на рис. 6. Коэффициент диффузии при численном расчете $D = 8 \times 10^{-10}$ м^2/с, начальное приближение $D = 1.6 \times 10^{-9}$ м^2/с.

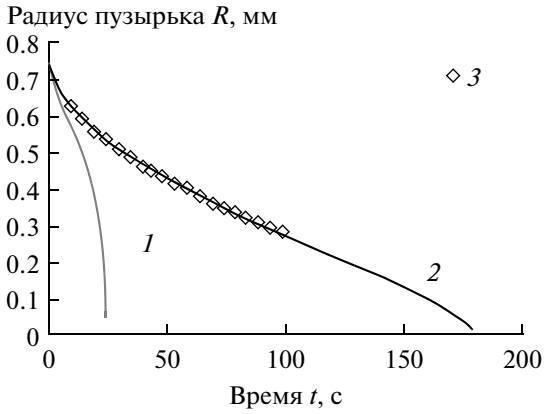

Рис. 8. Динамика растворения пузырька этана: обозначения те же, что на рис. 6. Коэффициент диффузии при численном расчете $D = 4 \times 10^{-10}$ м^2/с, начальное приближение $D = 1.9 \times 10^{-9}$ м^2/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных данных по динамике растворения газовых пузырьков можно сделать вывод о том, что коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле не является аномально высоким как по своему значению, так и по сравнению с другими газами. Получены значения коэффициентов диффузии основных диагностических газов в трансформаторном масле марки ГК при комнатной температуре водорода $D = (3.3 \pm 1) \times 10^{-9}$ м^2/с, метана $D = (1 \pm 0.3) \times 10^{-9}$ м^2/с, этана $D = (4 \pm 1) \times 10^{-10}$ м^2/с.

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

Работа проведена в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михеев Г.М., Михеев Г.М., Фадеев Е.Г., Попов А.Ю.* Лазерная диагностика ультразвуковой дегазации диэлектрической жидкости // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 73.
2. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. Мищенко К.П., Равделя А.А. М.–Л.: Химия, 1974. 200 с.
3. *Epstein P.S., Plesset M.S.* On the Stability of Gas Bubbles in Liquid–Gas Solutions // J. Chem. Phys. 1950. V. 18. № 11. P. 1505.
4. *Houghton G., Ritchie P.D., Thomson J.A.* The Rate of Solution of Small Stationary Bubbles and the Diffusion Coefficients of Gases in Liquids // Chem. Eng. Sci. 1962. V. 17. P. 221.
5. *Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г.* Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. Уч. пособие. Сер. Учебники НГТУ. Новосибирск: НГТУ, 2007. 899 с.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Уч. пособие. В 10-ти т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 736 с.
7. *Дарьян Л.А.* Пробоотборники “Элхром” для хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Сб. тр. 2000. Вып. 11. С. 234.
8. *Бузаев В.В., Дарьян Л.А., Сапожников Ю.М.* Уточнение коэффициентов растворимости содержащихся в трансформаторном масле газов // Электрические станции. 2006. № 12. С. 58.
9. *Столяров Е.А., Орлова Н.Г.* Расчет физико-химических свойств жидкостей. Л. Химия, 1976. 112 с.