

03;07;12

## Лазерная диагностика ультразвуковой дегазации диэлектрической жидкости

© Ген.М. Михеев, Георг. М. Михеев, Е.Г. Фатеев, А.Ю. Попов

Институт прикладной механики УрО РАН,  
426000 Ижевск, Россия  
e-mail: mikheev@udmnet.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2002 г.)

Методом спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света с применением бигармонической накачки на основе вынужденного комбинационного рассеяния исследована эффективность выделения водорода из трансформаторного масла в вакуум и в воздух при нормальном давлении под действием фокусированного ультразвука. Ультразвук на частоте 1.76 МГц возбуждался в масле сферическим пьезокерамическим преобразователем, размещенным на дне стакана, и фокусировался на поверхности жидкости, что приводило к ее интенсивному перемешиванию с образованием фонтана. Аппроксимация экспериментальных данных теоретической зависимостью, описывающей кинетику выделения водорода в воздух, позволила найти коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле при комнатной температуре, равный  $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Показано, что включение ультразвука с плотностью мощностью  $2.2 \text{ кВт}/\text{м}^2$  приводит к ускорению диффузионных процессов в 10–15 раз.

### Введение

Хорошо известно, что извлечение различных газов, растворенных в диэлектрической жидкости (ДЖ), можно осуществить при пониженных давлениях окружающей атмосферы посредством вакуумной откачки [1]. Традиционным методом удаления из воды растворенного воздуха является термическая деаэрация, которая основана на перегреве воды выше температуры кипения, соответствующей давлению в рабочей зоне деаэратора [2]. Для удаления некоторых газов из воды применяют также химические методы. В их основе, например, в случае углекислого газа лежит его химическое связывание, достигаемое введением реактивов (аммиак, щелочь, или силикат натрия) [3]. В работе [4] предложено осуществление выделения газа за счет конвекции, создаваемой при облучении жидкости низкоинтенсивными микроволнами. Известно и применение ультразвука (УЗ) для вытеснения растворенных газов из жидкости [5].

Об эффективности дегазации обычно судят по результатам хроматографического анализа. При определении содержания растворенных газов в диэлектрической жидкости методом прямого парофазного анализа с применением хроматографа извлечение газов из жидкости осуществляется путем периодического встряхивания пробы до установления термодинамического равновесия [6]. Однако метод хроматографического анализа, основанных на разделении газовой пробы на отдельные компоненты с помощью хроматографической колонки [7], не позволяет изучать процесс дегазации жидкости в реальном масштабе времени. В связи с этим представляет определенный интерес разработка альтернативного метода, позволяющего проводить экспресс-диагностику процесса ультразвуковой дегазации жидкости.

Целью данной работы является демонстрация возможности эффективного применения метода лазерной спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) с бигармонической лазерной накачкой (БЛН) на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) для изучения процесса выделения водорода из диэлектрической жидкости под действием фокусированного ультразвука.

### Особенности ВКР–КАРС диагностики водорода

КАРС — это четырехфотонный параметрический процесс, при котором в среде, обладающей кубической нелинейной восприимчивостью  $\chi^{(3)}$ , в результате смешения двух лазерных пучков на частотах  $\omega_p$  и  $\omega_s$  генерируется когерентное направленное излучение на антистоксовой частоте  $\omega_a = 2\omega_p - \omega_s$  [8]. Сущность этого метода, применительно к диагностике водорода в газовой смеси, сводится к следующему. Среда зондируется бигармонической лазерной накачкой на частотах  $\omega_p$  и  $\omega_s$ , приблизительно удовлетворяющей условию резонанса

$$\omega_p - \omega_s \approx \Omega_\rho, \quad (1)$$

где  $\Omega_\rho$  — частота комбинационного перехода  $Q_{01}(1)$  водорода, находящегося в газовой смеси с плотностью  $\rho$ .

При этом интенсивность излучения  $I_a$  на частоте  $\omega_a$  определяется соотношением

$$I_a \sim \left| \chi^{(3)R} + \chi^{(3)NR} \right|^2 I_p^2 I_s, \quad (2)$$

где  $I_p, I_s$  — интенсивность излучения на частотах  $\omega_p$  и  $\omega_s$  соответственно;  $\chi^{(3)R}$  — кубическая резонансная восприимчивость молекул исследуемого газа;  $\chi^{(3)NR}$  —

кубическая нерезонансная восприимчивость, обусловленная электронным вкладом и связанная главным образом с участием в акте рассеяния молекул буферного газа;  $\chi^{(3)NR} = c_{BG}\gamma_{nr}$ ;  $\chi^{(3)R} = c_{H_2}\gamma_r$ ;  $\gamma_r, \gamma_{nr}$  — кубические гиперполяризуемости молекул исследуемого и буферного газов соответственно;  $c_{H_2}, c_{BG}$  — концентрации молекул для детектируемой примеси и буферного газа соответственно.

Кубическая резонансная восприимчивость  $\chi^{(3)R}$  определяется следующим выражением [9]:

$$\chi^{(3)R} = \frac{1}{3} \Delta_k^n \frac{2\pi c_{H_2} c^4}{\pi \Gamma \omega_s^4} \frac{d\sigma}{do} \frac{\Gamma}{\Omega_\rho - (\omega_p - \omega_s) - i\Gamma}, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  — полуширина линии комбинационно-активного перехода, определяемая на половинном уровне;  $\Delta_k^n$  — разность населенностей уровней;  $d\sigma/do$  — молекулярное сечение спонтанного комбинационного рассеяния света (СКР) на указанном переходе.

Из выражения (3) следует, что при  $|\Omega_\rho - (\omega_p - \omega_s)| \gg \Gamma$  значение  $|\chi^{(3)R}|$  существенно уменьшается. Это означает, что при условии (1) интенсивность  $I_a$  в основном определяется рассеянием на молекулах детектируемой примеси.

В [10] показано, что при определении малых концентраций  $c_{H_2}$  водорода в газовых смесях фиксированной плотности  $\rho$  методом КАРС, когда выполняется условие (1) и можно пренебречь нерезонансным рассеянием на молекулах буферного газа, справедливо следующее выражение:

$$c_{H_2} = \frac{1}{b_a} \left( \frac{I_a}{I_p^2 \cdot I_s} \right)^{1/2} (\Gamma_\rho^2 + \Delta\omega_\rho^2)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $b_a$  — размерный коэффициент,  $\Gamma_\rho$  — полуширина линии перехода молекулы водорода при плотности газовой смеси  $\rho$ ,  $\Delta\omega_\rho = (\omega_p - \omega_s) - \Omega_\rho = \Omega_g - \Omega_\rho$ .

В газовых смесях полуширина линии  $\Gamma_\rho$  детектируемых молекул водорода определяется столкновительным сужением Дике [10], а  $\Delta\omega_\rho$  может изменяться в зависимости от  $\rho$ . Однако при постоянной плотности  $\rho$  значения  $\Gamma_\rho$  и  $\Delta\omega_\rho$  фиксированы, следовательно, концентрацию  $c_{H_2}$  можно определить, измеряя значения интенсивности излучения на частотах  $\omega_a, \omega_p$  и  $\omega_s$ . Одновременно удовлетворяющую условиям (1) и  $\Delta\omega_\rho = \text{const}$  БЛН можно получить методом ВКР в сжатом водороде, например, на колебательном переходе  $Q_{01}(1)$  [11–15]. Лазерная часть установки при этом существенно упрощается [15].

## Особенности дегазации жидкости в поле фокусированного ультразвука

Известно, что потери энергии УЗ (а следовательно, и импульса) в среде приводят к появлению так называемой радиационной силы [16]. Над фокальной областью сферического УЗ излучателя под действием этой силы

может возникать струя жидкости (фонтан), что приводит к ее интенсивному перемешиванию и последующей дегазации. Кроме этого, при фокусировке УЗ амплитуда акустического давления является пространственно неоднородной (градиентной). В поле такой акустической волны на газовые пузырьки действует сила Бьеркнеса [17,18], которая определяется следующим выражением:

$$\mathbf{F}_B = -\langle V \nabla P \rangle, \quad (5)$$

где  $V$  и  $P$  — мгновенные значения объема пузырька и акустического давления, а усреднение проводится по времени за период колебаний.

Под действием этой силы происходит пространственная миграция пузырьков в зону повышенного давления, причем в случае фокусированного пучка УЗ она находится в фокальной области [19]. Следовательно, газовые включения, попадающие под действием силы Бьеркнеса в эту область, вместе с фонтаном будут выталкиваться в окружающую атмосферу. Это может приводить к еще более эффективной дегазации жидкости. Однако под действием акустических волн достаточной мощности возможно протекание различных химических реакций [5], в том числе и разложение ДЖ с образованием водорода, метана, этилена, ацетилен и др. [20]. Следовательно, дегазация ДЖ *per se* должна осуществляться при меньших мощностях УЗ.

## Техника эксперимента

Схема эксперимента, представленная в упрощенном виде, показана на рис. 1. Сферический пьезокерамический преобразователь 1, прикрепленный к проводящей оправе 2 со стеклянным стаканом 3, под действием резонансного высокочастотного напряжения ( $\sim 27$  В, 1.76 МГц), поступающего от высокочастотного генератора 4, возбуждает в жидкости 5 акустические колебания. Распространяющийся в жидкости ультразвук фокусируется на ее поверхности и вызывает образование

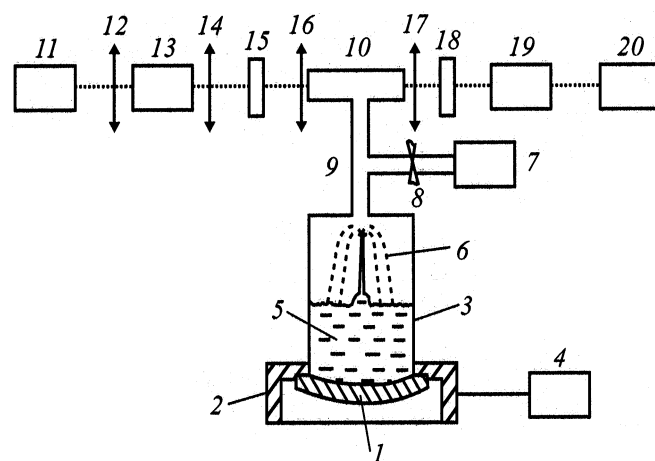


Рис. 1. Схема эксперимента.

фонтана 6, распадающегося впоследствии на мелкие капли. Схема предусматривала возможность создания разрежения над поверхностью жидкости до включения ультразвука, для чего использовался форвакуумный насос 7. Вентиль 8 позволяет отсоединить форвакуумный насос от разрежаемой полости во время проведения измерений. Выделяющийся из жидкости водород через соединительную трубу 9 поступал в оптическую измерительную кювету 10 с оптическими окнами и регистрировался через определенные промежутки времени методом ВКР-КАРС. Для этого использовалось излучение второй гармоники одночастотного YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера 11, выполненного на одном активном элементе [21]. Максимальная энергия в импульсе на длине волны 532 nm составляла 40 мДж, длительность импульса по полувысоте  $\tau_p = 7$  ns, а расходимость — около 0.6 mrad. Эксперименты проводились при энергии импульсов 15–20 мДж. Выходное излучение лазера с помощью линзы 12 ( $F_1 = 0.66$  m) фокусировалось в ВКР кювету 13 ( $L_1 = 0.86$  m) со сжатым молекулярным водородом при плотности 2.8 Амага. Возникающая в кювете 13 БЛН в результате ВКР на колебательном переходе  $Q_{01}(1)$  после коллимирования линзой 14 отделялась от других компонент ВКР с помощью набора фильтров 15 (18) и фокусировалась в измерительную кювету 10 ( $L_2 = 0.21$  m) объективом 16 ( $F_2 = 0.13$  m). Антистоксова компонента, возникающая в кювете 10 в результате КАРС, с помощью линзы 17 направлялась на вход монохроматора 19. Далее сигнал регистрировался с многократным усреднением с помощью ФЭУ и многоканальной системы регистрации энергии лазерных импульсов 20, сопряженной с персональным компьютером IBM. Для измерения произведения  $I_p^2 I_s$ , входящего в формулу (4), использовалась дополнительная оптическая ветвь (на рис. 1 не показана), включающая опорную измерительную кювету со сжатым водородом при плотности 2.8 Амага, и дополнительную систему регистрации антистоксовой компоненты [10].

В отличие от хроматографического метода такой способ регистрации водорода в газовой смеси в значительной мере является селективным и позволяет в реальном масштабе времени наблюдать за кинетикой выделения газа из жидкой фазы.

Ультразвуковая мощность  $N$ , вводимая в жидкость, оценивалась исходя из закона сохранения энергии. При этом пренебрегалось работой, совершаемой на преодоление сил поверхностного натяжения. Считалось, что энергия ультразвука полностью переходит в энергию струи жидкости. В этом случае можно получить следующее выражение для  $N$  [22]:

$$N = (\pi/8)\rho_{\text{liq}}d^2(2gh)^{3/2}, \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{liq}}$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h$  — высота фонтана над жидкостью в вакууме (рис. 1),  $d$  — средний диаметр струи фонтана.

Отсюда при  $d = 1.5$  mm,  $h = 0.15$  m,  $\rho_{\text{liq}} = 880$  kg/m<sup>3</sup> получаем, что  $N = 4$  mW. При этом в фокусе преобразователя 1 плотность мощности УЗ составляет 2.2 kW/m<sup>2</sup>.

Такая мощность УЗ не вызывает химических реакций разложения диэлектрической жидкости [22].

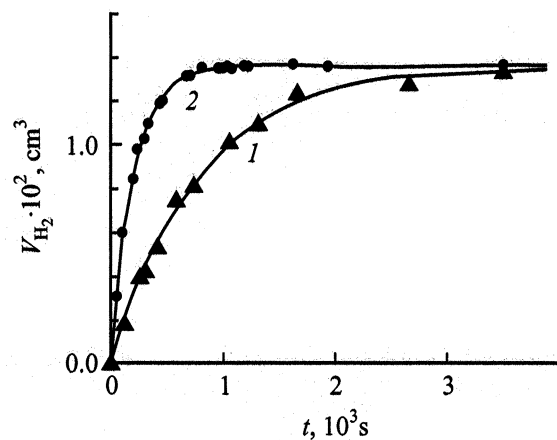
Для проведения исследований десорбции водорода из трансформаторного масла под действием ультразвука необходимо было иметь порции масла, насыщенные водородом. Насыщение осуществлялось следующим образом. Сначала в вакуумированную камеру с маслом вводилась порция водорода. Затем включался УЗ на 30 min. Под воздействием ультразвука жидкость интенсивно перемешивалась с водородом, находящимся в газовой фазе. Далее, ультразвук отключался. Через некоторый промежуток времени, в течение которого происходила полная релаксация колебаний жидкости, водород, находящийся в газовой фазе, удалялся из камеры кратковременным включением форвакуумного насоса.

## Изучение кинетики выделения водорода

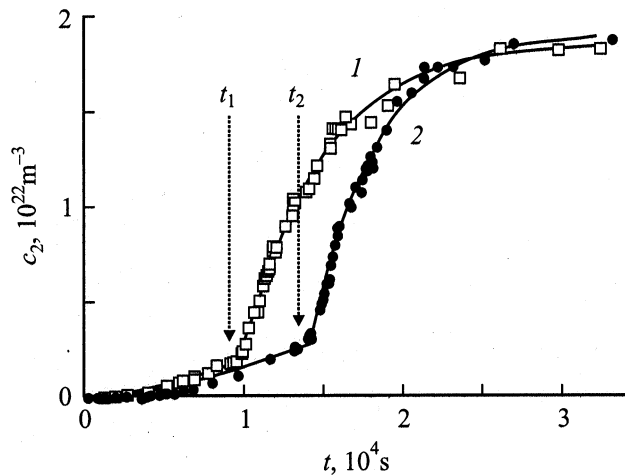
Полученные результаты кинетики выделения водорода из трансформаторного масла представлены на рис. 2 и 3. Рис. 2 соответствует десорбции газа в условиях вакуума. Результаты, представленные на рис. 3, получены в воздухе при нормальном давлении. Видно, что в вакууме (рис. 2, кривая 1) возможна самопроизвольная десорбция газа в течение некоторого времени. В этих же условиях действие УЗ приводит к значительному ускорению процесса выделения газа (рис. 2, кривая 2). Экспериментальные зависимости газовыделения  $V_{\text{H}_2}(t)$ , представленные на рис. 2 в виде серии точек, хорошо описываются следующей функцией:

$$V_{\text{H}_2} = V_{\text{H}_2}^{(0)} [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (7)$$

где  $V_{\text{H}_2}^{(0)}$  — приведенный к нормальным условиям объем первоначального содержания водорода в пробе масла,  $\tau$  — характерное время газовыделения.



**Рис. 2.** Зависимости объема  $V_{\text{H}_2}$  выделившегося водорода из предварительно насыщенного водородом трансформаторного масла марки ГК в измерительную кювету в вакууме с остаточным давлением 100 Па. 1 — самопроизвольная десорбция, 2 — десорбция под действием ультразвука.



**Рис. 3.** Зависимости изменения концентрации  $c_2$  водорода в измерительной кювете от времени  $t$  при десорбции водорода из предварительно насыщенного водородом трансформаторного масла марки ГК в измерительную кювету в воздухе при нормальном давлении ( $t_1, t_2$  — моменты включения УЗ для экспериментов 1 и 2 соответственно; сплошные кривые — аппроксимирующие функции газовыделения).

Эксперименты показали, что после включения УЗ характерное время  $\tau$  уменьшается в 3.9 раза.

При нормальном давлении в воздухе процесс десорбции водорода из масла существенно замедлен (рис. 3, начальный участок экспериментальной зависимости 1). Однако после включения при  $t = t_1$  УЗ через некоторое время происходит резкое возрастание концентрации  $c_2$  водорода в измерительной кювете. Задержка времени включения УЗ до  $t_2$  ведет к соответствующему сдвигу зависимости  $c_2(t)$  вправо по шкале времени (рис. 3, экспериментальная зависимость 2). Значительное изменение скорости роста  $c_2(t)$  в воздухе наступает с некоторой задержкой после включения УЗ. Эксперименты показали, что это объясняется конечным временем диффузии  $t_D$  водорода в воздухе по соединительной трубе 9 в оптическую измерительную кювету 10 (рис. 1). При уменьшении давления воздуха  $t_D$  стремится к времени пролета молекул через трубу.

### Определение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле

Представляет интерес рассмотрение задачи диффузии водорода из масла с целью описания экспериментальных зависимостей, показанных на рис. 3. Смоделируем объемы, содержащие диэлектрическую жидкость и измерительную кювету, в виде цилиндра с площадью сечения  $S$  (рис. 4), причем часть объема высотой  $L$  занята жидкостью. Поскольку из эксперимента известна средняя концентрация водорода  $c_2$  в измерительной кювете, то для определения коэффициентов диффузии водорода в жидкости поступим следующим образом.

Пусть количество молекул водорода в жидкости в момент времени  $t = 0$  равно  $N_0 = c_1(0)V_1$ , где  $c_1(0)$  — первоначальная концентрация водорода в жидкости,  $V_1$  — объем жидкости. В соответствии с законом сохранения число молекул десорбированного из объема  $V_1$  газа  $N_1 = c_1V_1$  равно количеству молекул, которое прибудет в объем над жидкостью  $N_2 = c_2V_2$ . Тогда количество газа в объеме  $V_1$  в момент времени  $t$  находится из отношения

$$c_1(t)V_1 = c_1(0)V_1 - c_2(t)V_2 \quad (8)$$

и соответственно измеряемая в эксперименте средняя концентрация водорода над жидкостью определяется по формуле

$$c_2(t) = [c_1(0) - c_1(t)](V_1/V_2). \quad (9)$$

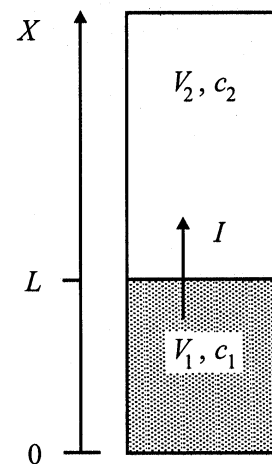
Изменение количества молекул газа в объеме  $V_1$  в течение времени  $dt$  можно записать в виде кинетического уравнения

$$d[V_1c_1(t)] = -I(t)Sdt. \quad (10)$$

Здесь  $I(t)$  — поток газа с коэффициентом диффузии  $D_1$  в жидкости через поверхность  $S$ , определяющийся из уравнения переноса (закон Фика). Поток  $I(t)$  может быть записан следующим образом

$$\begin{aligned} I(t) &= D_1(\partial c/\partial x)_{x=L} \\ &= D_1[c_1(0, t) - c_1(L, t)]/L = D_1[c_1(t)]/L. \end{aligned} \quad (11)$$

Последнее упрощение в (11) следует из существенно-го неравенства концентраций водорода на дне и в приповерхностной области жидкости  $c_1(0, t) \gg c_1(L, t)$ , что объясняется следующим. Методика перемешивания жидкости с растворенным в ней водородом приводила к его равномерному распределению в объеме  $V_1$  с некоторой средней концентрацией  $c_1(t)$ . Затем нерастворенный водород над жидкостью быстро откачивался. В результате последней процедуры некоторый приповерхностный слой жидкости существенно дегазировался.



**Рис. 4.** Геометрия эксперимента, представленная для модельной задачи.

Это обстоятельство, очевидно, и является основной причиной довольно длительного установления квази-стационарного состояния диффузионного процесса при выходе водорода из жидкости, что хорошо видно на рис. 3 для двух экспериментальных зависимостей. Далее, подставляя (11) в (10), получаем

$$d[c_1(t)]/dt = [-SD/V_1L]c_1(t). \quad (12)$$

Решение этого дифференциального уравнения при начальном условии  $c_1(t)_{t=0} = c_1(0)$  имеет вид

$$c_1(t) = c_1(0) \exp(-t/\tau), \quad (13)$$

где время релаксации

$$\tau = V_1L/SD_1. \quad (14)$$

Если в какой-то момент времени  $t_1$  включится дополнительный механизм переноса, например инициированный ультразвуком, то уравнение (11) необходимо записать в виде

$$I(t) = \{D_1 + D_2\Theta(t - t_1)\} [c_1(t)]/L, \quad (15)$$

где  $D_2$  — коэффициент диффузии при дополнительном механизме переноса;  $\Theta(t - t_1)$  — функция Хевисайда (функция включения), имеющая следующий вид:

$$\Theta(t - t_1) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_1, \\ 1 & \text{при } t \geq t_1. \end{cases} \quad (16)$$

Тогда уравнение (12) будет иметь следующее решение:

$$c_1(t) = c_1(0) \exp[-(t/\tau_1 + (t - t_1)/\tau_2)], \quad (17)$$

где

$$\tau_1 = V_1L/SD_1, \quad \tau_2 = V_1L/[SD_2\Theta(t - t_1)]. \quad (18)$$

Окончательно имеем

$$c_2(t) = c_1(0) [1 - \exp[-(t/\tau_1 + (t - t_1)/\tau_2)]] (V_1/V_2). \quad (19)$$

Последнее уравнение использовано для процедуры нелинейной аппроксимации двух рядов экспериментальных точек (рис. 3) с включением в момент времени  $t_1$  ультразвукового ускорения диффузии из диэлектрической жидкости.

Нелинейная аппроксимационная задача решалась посредством применения открытого алгоритма поиска следующих четырех параметров: коэффициентов диффузии  $D_1$ ,  $D_2$  до включения и после включения УЗ соответственно; начальной во времени ( $t = 0$ ) средней концентрации газа в жидкости  $c_1(0)$ ; момента времени  $t_1$  включения УЗ (для уточнения периода задержки, вызванной диффузией газа до кюветы). При этом минимизировалась целевая функция — сумма квадратов отклонений экспериментальных точек, представленных

на рис. 3, от теоретической кривой. В результате аппроксимации были также найдены отношения значений коэффициентов диффузии до и после включения ультразвукового ускорения диффузии. Более того, пользуясь известными геометрическими параметрами задачи ( $S = 5.726 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $L = 0.08 \text{ m}$ ,  $V_1 = 45.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 85.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ) удается найти значения коэффициентов диффузии водорода в диэлектрической жидкости. Так, из первого ряда данных (рис. 3, экспериментальная зависимость 1) следует, что  $D_1 = 0.96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_2 = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $c_1(0) = 3.3 \cdot 10^{22} \text{ molecules/m}^3$ . Из второго ряда (рис. 3, экспериментальная зависимость 2) следует, что  $D_1 = 1.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_2 = 1.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $c_1(0) = 3.4 \cdot 10^{22} \text{ molecules/m}^3$ . Причем в соответствии с нашей моделью эти параметры не зависят от объема газа над жидкостью. Из этих результатов следует, что ультразвуковое воздействие ускоряет диффузионные процессы в жидкости в 10–15 раз.

Сравнение полученных коэффициентов диффузии водорода с известными значениями, например, для металлов [23] и водных растворов [24] показывает, что они в трансформаторном масле на два-три порядка больше. Благодаря экспрессности ВКР–КАРС метода многократно усредненные значения концентрации водорода в измерительной кювете в данной работе были получены через минутные промежутки времени. Это обстоятельство позволяет надеяться на то, что нами получено значение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле марки ГК с достаточной точностью.

Определение коэффициента диффузии водорода в диэлектрической жидкости позволяет оценить время жизни неравновесной концентрации водорода в масле. Известно, что в высоковольтном маслонаполненном оборудовании в результате разложения ДЖ возможно возникновение неравновесной концентрации водорода. Знание коэффициента диффузии для масла позволяет считать характерное время самопроизвольной десорбции образовавшегося водорода. Очевидно, что это время будет соотноситься с временем релаксации для соответствующей геометрии объема жидкости в трансформаторе. Возьмем, к примеру, следующую геометрию трансформатора:  $S = 1 \text{ m}^2$ ,  $L = 1.2 \text{ m}$ ,  $V_1 = 1.2 \text{ m}^3$ . Тогда для найденного нами коэффициента диффузии без ультразвукового воздействия получаем  $\tau_1 = V_1 \cdot L/S \cdot D_1 = 1.44/10^{-7} \approx 10^7 \text{ s}$  или 115 days. Это означает, что в отсутствие конвективных движений, а также других механизмов, стимулирующих процесс десорбции водорода, самопроизвольное рассасывание образовавшейся неравновесной концентрации водорода за счет диффузии происходит за достаточно продолжительный промежуток времени.

Измерение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле позволило нам предложить адекватный способ отбора проб трансформаторного масла из высоковольтных вводов (500 ÷ 700 kV) для анализа растворенных в масле газов без отключения трансформатора [25].

## Заключение

Продемонстрирована возможность успешного применения лазерного (ВКР–КАРС) метода для мониторинга содержания водорода в атмосфере над диэлектрической жидкостью. Показано, что скорость дегазации трансформаторного масла может быть существенно увеличена как в вакууме, так и в воздухе при нормальном давлении при перемешивании масла фокусированным ультразвуком, вызывающим образование фонтана над его поверхностью. Определен коэффициент диффузии водорода в трансформаторном масле.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 01-02-96461).

## Список литературы

- [1] Аракелян В.Г. // Электротехника. 1994. № 2. С. 8–16.
- [2] Бравиков А.М. // Электрические станции. 2001. № 5. С. 25–28.
- [3] Шарапов В.И., Сивухина М.А. // Электрические станции. 2001. № 3. С. 23–27.
- [4] Емец Б.Г. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 8. С. 22–24.
- [5] Маргулис М.А. Основы звукохимии. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
- [6] Иоффе Б.В., Косткина М.И., Витенберг А.Г. // ЖПХ. 1980. Т. 53. № 10. С. 2280–2285.
- [7] Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Высшая школа, 1992. 317 с.
- [8] Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука, 1981. 543 с.
- [9] Бункин А.Ф., Иванов С.Г. // Квантовая электрон. 1982. Т. 9. № 9. С. 1821–1825.
- [10] Михеев Ген.М., Михеев Георг.М., Могилева Т.Н. и др. // Квантовая электрон. 2001. Т. 32. № 1. С. 39–44.
- [11] Bischel W.K., Duer M.J. // Phys. Rev. A. 1986. Vol. 33. N 5. P. 3113–3123.
- [12] Regnier P.R., Taran J.P.E. // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. N 5. P. 240–242.
- [13] Иванов А.А., Поляков Г.А., Воронин В.Б. // Изв. Академии наук. 1993. Т. 57. № 2. С. 165–171.
- [14] Иванов А.А. // Опт. и спектр. 1996. Т. 80. № 3. С. 362–364.
- [15] Михеев Г.М., Могилева Т.Н. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 10. С. 943–946.
- [16] Руденко О.В. // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика и Астрономия. 1996. № 6. С. 18–31.
- [17] Critt L.A. // J. Acoust. Soc. Amer. 1975. Vol. 57. N 6. P. 1363–1370.
- [18] Агрест Э.М., Кузнецов Г.Н. // Акуст. журн. 1972. Т. 18. № 2. С. 168–174.
- [19] Макарова Т.В., Губернаторова Е.А. // Акустика и ультразвуковая техника. Респ. межвед. научн.-техн. сб. Киев: Техника, 1991. № 26. С. 15–19.
- [20] Аракелян В.Г., Дарьян Л.А., Лоханин А.К. // Электричество. 1988. № 5. С. 33–38.
- [21] Михеев Г.М., Малеев Д.И., Могилева Т.Н. // Квантовая электрон. 1992. Т. 19. № 1. С. 45–47.
- [22] Михеев Ген.М., Михеев Георг.М., Некряченко Г.П., Готлиб И.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 24. Вып. 1. С. 79–84.
- [23] Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
- [24] Рид Р., Праусниц Д.Ж., Шервуд Т. Свойство газов и жидкостей. Пер. с англ. / Под ред. Б.И. Соколова. Л.: Химия, 1982.
- [25] Михеев Георг.М., Михеев Ген.М., Филиппов В.К. // Электрические станции. 2001. № 1. С. 39–42.