

03;08;12

## Выделение водорода из диэлектрической жидкости под действием ультразвука

© Г.М. Михеев, Гр.М. Михеев, Г.П. Некряченко, И.П. Готлиб

Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск  
АО "Чувашэнерго", Чебоксары

Поступило в Редакцию 5 июня 1998 г.

Методом спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света исследовано выделение водорода из диэлектрической жидкости под действием сфокусированного ультразвука, вызывающего перемешивание жидкой среды с образованием фонтана. Показано, что ультразвуковое воздействие на диэлектрическую жидкость, находящуюся в вакуумированном объеме или в воздухе при нормальном давлении, существенно ускоряет процесс десорбции водорода в газовую фазу.

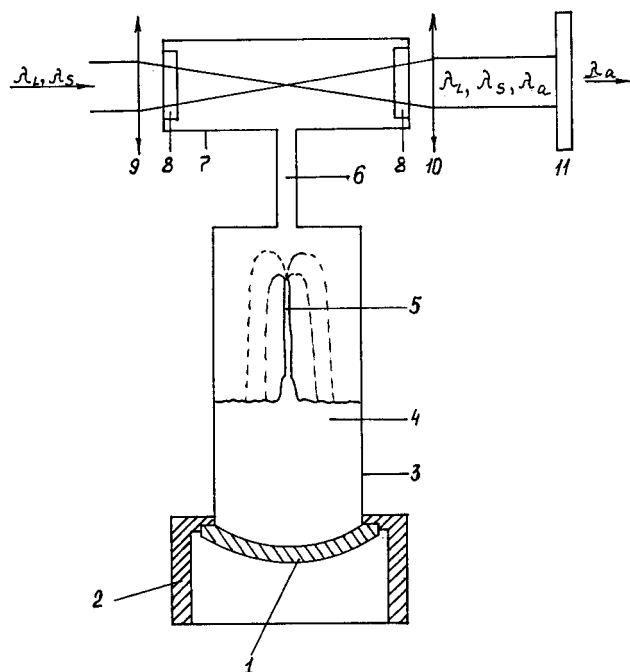
Измерение количества водорода в твердых телах возможно методом его экстракции в газовую фазу при нагреве и плавлении [1–3]. Определение содержания газов, включая водород, в жидкостях можно осуществить выделением растворенных газов из жидкой фазы в газообразную при пониженных давлениях окружающей атмосферы [4]. В [5] предложено извлечение газа из жидкости за счет конвекции, создаваемой при облучении жидкости микроволнами. Обычно при диагностике силовых трансформаторов содержание газов в пробе диэлектрической жидкости (трансформаторного масла) исследуется методом прямого парофазного анализа. Этот способ заключается в переводе части растворенного газа в инертную атмосферу над жидкостью путем периодического встряхивания [6] до установления термодинамического равновесия и в последующем анализе полученной газовой смеси хроматографом.

Целью данной работы является демонстрация возможности значительного ускорения процесса выделения водорода из диэлектрической жидкости под действием сфокусированного ультразвука. Это представляет интерес для развития методов экспресс-анализа содержания газов, например в трансформаторных маслах.

Известно, что потери ультразвуковой энергии в среде приводят к появлению так называемой радиационной силы [7]. Под действием

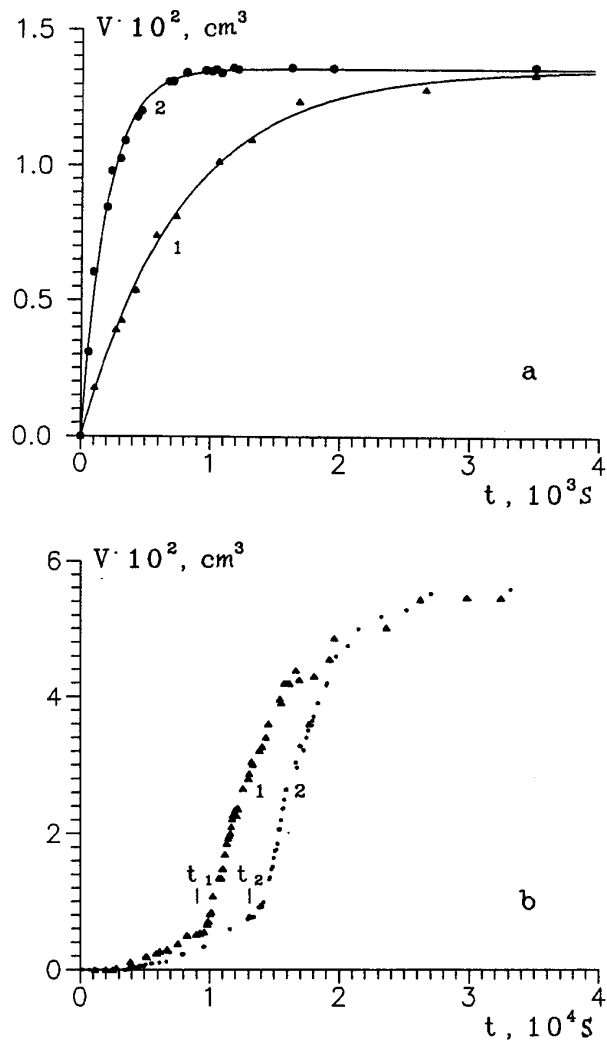
этой силы может возникать струя жидкости (фонтан) над фокальной областью сферического ультразвукового излучателя. Это приводит к интенсивному перемешиванию жидкости и ее дегазации. Кроме этого, при фокусировке ультразвука амплитуда акустического давления является пространственно неоднородной (градиентной). На газовые пузырьки в поле такой акустической волны действует сила Бьеркнеса [8], определяемая выражением  $F_B = -\langle V \nabla P \rangle$ , где  $V$  и  $P$  — мгновенные значения объема пузырька и акустического давления, а усреднение проводится по времени за период колебаний. Под действием этой силы происходит пространственное смещение (миграция) пузырьков в зоны повышенного давления [9,10]. В случае сфокусированного пучка ультразвука область повышенного давления находится в окрестности фокуса излучателя. Следовательно, газовые включения, оказывающиеся под действием силы Бьеркнеса вблизи фокуса ультразвукового излучателя, 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 звукохимических реакций [11], в том числе и разложение диэлектрической жидкости с образованием водорода, метана, этана и т. д. [12]. По этой причине дегазация диэлектрических жидкостей должна осуществляться при небольших мощностях ультразвука.

Описанный способ дегазации жидкости подвергался экспериментальной проверке. На рис. 1 показана схема эксперимента, представленная в упрощенном виде. Сферический пьезокерамический преобразователь 1, прикрепленный к проводящей оправе 2 со стеклянным стаканом 3, под действием резонансного высокочастотного напряжения ( $\sim 27$  В, 1.76 МГц) возбуждает в жидкости 4 акустические колебания. Распространяющийся в жидкости ультразвук фокусируется на ее поверхность и вызывает образование фонтана 5, распадающегося впоследствии на мелкие капли. Выделяющийся из жидкости газ через соединительную трубу 6 поступает в оптическую измерительную кювету 7 с оптическими окнами 8 и регистрируется с определенной частотой повторения методом когерентного антистоксова рассеяния света с применением резонансной бигармонической лазерной накачки на основе вынужденного комбинационного рассеяния света [13,14]. Такой способ регистрации водорода в газовой смеси является селективным и в отличие от хроматографического метода позволяет в реальном масштабе времени наблюдать за кинетикой выделения газа из жидкой фазы.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 9 — линза для фокусировки бигармонической лазерной накачки  $\lambda_L, \lambda_S$  ( $\lambda_L = 532 \text{ nm}$ ,  $\lambda_S = 683 \text{ nm}$ ), настроенной на частоту колебательного перехода  $Q_{01}$  (1) молекулярного водорода; 10 — коллимирующая линза; 11 — оптический фильтр для селекции антистоксовой компоненты рассеяния  $\lambda_a$  ( $\lambda_a = 436 \text{ nm}$ ), возникающий при когерентном антистоксовом рассеянии света, интенсивность которой позволяет судить о концентрации водорода в измерительной кювете (остальные обозначения приведены в тексте статьи).

Эффективная ультразвуковая мощность  $N$ , вводимая в жидкость, оценивалась исходя из закона сохранения энергии по следующей формуле:  $N = (\pi/8) \cdot \rho \cdot d^2 (2gh)^{3/2}$ , где  $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h$  — высота фонтана,  $d$  — средний диаметр струи. Отсюда при  $d = 1.5 \text{ mm}$ ,  $h = 0.15 \text{ m}$ ,  $\rho = 880 \text{ kg/m}^3$  получаем, что  $N = 4 \text{ mW}$ . При этом в фокусе преобразователя 1 плотность мощности



**Рис. 2.** Зависимости объема  $V$  выделившегося водорода из предварительно наводороженного трансформаторного масла марки ГК от времени  $t$  в вакууме с остаточным давлением воздуха 100 Па ( $a$ ) (1 — самопроизвольная десорбция, 2 — десорбция под действием ультразвука) и в воздухе при нормальном давлении ( $b$ ).

ультразвука составляет  $220 \text{ mW/cm}^2$ . Такая мощность ультразвука не стимулирует химические реакции разложения диэлектрической жидкости. Действительно, опыты показали, что воздействие ультразвука указанной мощности в течение 180 min на обезгаженное трансформаторное масло различных марок объемом 40 ml не сопровождалось его разложением с образованием водорода как при нормальных давлениях, так и в вакууме.

Кинетика выделения водорода из трансформаторного масла после его предварительного наводороживания представлена на рис. 2. Здесь  $V$  — объем газообразного водорода, приведенного к нормальным условиям. Результаты, показанные на рис. 2, *a*, получены при ускоренном насыщении масла водородом в условиях перемешивания, а на рис. 2, *b* — при естественной диффузии водорода низкого давления в масло в течение суток. Видно, что в вакууме (рис. 2, *a*, кривая 1) возможна самопроизвольная десорбция газа в течение некоторого времени  $t$ . В этих же условиях действие ультразвука приводит к значительному ускорению процесса выделения газа (рис. 2, *a*, кривая 2). Экспериментальные зависимости газовыделения  $V(t)$ , представленные на рис. 2, *a* в виде серии точек, хорошо описываются функцией  $V = V_0(1 - \exp(-t/\tau))$ , где  $V_0$  — приведенный объем первоначального содержания водорода в масле, а  $\tau$  — характерное время газовыделения, которое при включении ультразвука уменьшается в 3.9 раза. При нормальных давлениях в воздухе процесс десорбции водорода из масла существенно замедлен (рис. 2, *b*, начальный участок кривой 1). Однако включение ультразвука при  $t = t_1$  приводит к резкому возрастанию скорости газовыделения. Задержка времени включения ультразвука до  $t_2$  ведет к соответствующему сдвигу зависимости  $V(t)$  вправо по шкале времени (рис. 2, *b*, кривая 2). Значительное изменение скорости роста  $V(t)$  в воздухе наступает с некоторой задержкой после включения ультразвука. Эксперименты показали, что это объясняется конечным временем диффузии  $t_D$  водорода в воздухе по соединительной трубе 6 в оптическую измерительную кювету 7 (рис. 1). При уменьшении давления воздуха  $t_D$  стремится к нулю.

Таким образом, в работе экспериментально показано, что сфокусированный ультразвук малой мощности может быть с успехом применен для ускорения процесса выделения водорода и других газов из жидких диэлектриков в газообразную атмосферу.

Авторы выражают благодарность Н.Б. Кузнецову, Т.Н. Могилевой, Е.Г. Фатееву за техническую помощь, оказанную при выполнении работы.

## Список литературы

- [1] Шаповалов В.И., Трофименко В.В. Флокены и контроль водорода в стали. М.: Металлургия, 1987. 161 с.
- [2] Михеев Г.М., Малеев Д.И., Махнев Е.С. и др. // ЖПС. 1994. Т. 60. № 1–2. С. 11–18.
- [3] Коньков О.И., Капитонов И.Н., Трапезникова И.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 1. С. 3–8.
- [4] Аракелян В.Г. // Электротехника. 1994. № 2. С. 8–16.
- [5] Емец Б.Г. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 8. С. 22–24.
- [6] Иоффе Б.В., Косткина М.И., Витенберг А.Г. // ЖПХ. 1980. Т. 53. № 10. С. 2280–2285.
- [7] Руденко О.В. // Вестн. московского ун-та. Сер. 3. Физика и астрономия. 1996. № 6. С. 18–32.
- [8] Crum L.A. // J. Acoust. Soc. Amer. 1975. V. 57. N 6. P. 1363–1370.
- [9] Агрест Э.М., Кузнецов Г.Н. // Акуст. журн. 1972. Т. 18. № 2. С. 168–174.
- [10] Макарова Т.В., Губернаторова Е.А. // Акустика и ультразвуковая техника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Киев: Тэхника, 1991. № 26. С. 15–19.
- [11] Маргулис М.А. Основы звукохимии. М.: Высш. шк., 1984. 272 с.
- [12] Аракелян В.Г., Дарьян Л.А., Лоханин А.К. // Электричество. 1988. № 5. С. 33–38.
- [13] Михеев Г.М., Михеев Гр.М. // Электричество. 1996. № 6. С. 33–36.
- [14] Михеев Г.М., Могилева Т.Н. // Квант. электрон. 1996. Т. 23. № 10. С. 943–946.