

УДК 53; 621.3.015.51

«ДИФФУЗИОННЫЕ» ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Д. Д. Рютов (Новосибирск)

Предлагается метод, позволяющий исключить влияние микронеоднородностей электродов на пробой жидкости. Метод состоит в создании у поверхности каждого электрода переходного слоя с плавно спадающей в глубь жидкости проводимостью.

Пробой жидкости в не слишком толстых промежутках чаще всего начинается с поверхности одного из электродов (см., например, [1]). Причина состоит, по-видимому, в наличии на поверхности электродов различного рода микронеоднородностей, приводящих к локальному усилению электрического поля. Поэтому получаемые в соответствующих экспериментах значения пороговой напряженности электрического поля характеризуют не столько жидкость как таковую, сколько процессы, происходящие на поверхности жидкости — электрод.

Чтобы исключить влияние приэлектродных эффектов на пробой жидкости, предлагается создать у поверхности каждого электрода переходный слой с плавно спадающей в глубь жидкости проводимостью, например, путем нанесения на поверхность электрода тонкой пленки вещества, при растворении которого в жидкости последняя делается проводящей¹. С течением времени вследствие диффузии этого вещества в жидкость профиль проводимости станет гауссовским, что обеспечит плавность перехода между проводящей и непроводящей средами. Время диффузии τ_D (т. е. время между началом растворения и началом эксперимента по пробую) следует подбирать таким образом, чтобы эффективная толщина проводящего слоя $l \sim \sqrt{2 D \tau_D}$ существенно превышала высоту микронеоднородностей на поверхности металла, но была много меньше расстояния между электродами L . Отметим, что ранее Г. И. Будкером указывалось на возможность определенного увеличения электрической прочности жидкости путем введения незначительного количества примеси равномерно по объему жидкости.

Дальнейшие оценки проведем в применении к экспериментам типа [1], в которых исследовалась электрическая прочность воды. В таких экспериментах $L \sim 1$ см, так что l разумно выбрать порядка 0.1 см. Для веществ типа NaCl коэффициент диффузии в воде $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ см²/сек, так что $\tau_D \sim l^2 / 2D \sim 10^3$ сек. За это время конвекционные потоки не должны перемешать жидкость, т. е. их скорость v должна удовлетворять условию $v \lesssim l / \tau_D \sim 10^{-4}$ см/сек. Имея в виду, что кинематическая вязкость воды $\nu = 10^{-2}$ см²/сек, можно оценить время затухания конвекционных движений: $\tau_v \sim L^2 / \nu \sim 100$ сек. Это значит, что примесь следует вводить в воду не ранее, чем примерно через 10 мин после заполнения разрядного промежутка водой.

В поле тяжести конвекционные потоки могут возникать за счет неустойчивости Рэлея — Тейлора, связанной с тем, что плотность раствора отличается от плотности чистой жидкости. Для устранения этого эффекта растворяемые в жидкости вещества следует подбирать таким образом, чтобы у верхнего электрода плотность раствора была меньше плотности жидкости, а у нижнего — больше.

Приэлектродные слои могут разрушаться под действием пондеромоторных сил, возникающих при включении электрического поля. Время разрушения удовлетворяет неравенству $\tau_* \geq l (8\rho / E^2)^{1/2}$, где ρ — плотность жидкости. Для воды даже при $E \sim 10^6$ в/см эта оценка дает $\tau_* \sim 10^{-4}$ сек, тогда как время развития стримера (если он вообще возникает) по данным работы [1] не превышает 10^{-6} сек, т. е. роль пондеромоторного эффекта при исследовании электрической прочности воды незначительна.

Для получения электротехнических характеристик рассматриваемой системы найдем ее отклик на «ступенчатый» импульс напряжения

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ U_0, & t > 0 \end{cases}$$

В случае, когда электроды плоские, соответствующая задача описывается системой уравнений

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \sigma(x) E(x, t) = 0$$

¹ Фактически соответствующую примесь можно вносить в приэлектродный слой и другими способами.

$$\frac{\partial}{\partial x} \varepsilon E(x, t) = 4\pi\rho, \quad \int_0^L E(x, t) dx = -U(t)$$

$$\sigma(x) = \sigma_0 \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{l^2}\right) + \exp\left[-\frac{(x-L)^2}{l^2}\right] \right\}$$

где ε — диэлектрическая проницаемость жидкости, σ — ее проводимость, а ρ — плотность заряда. Проводимость считается не зависящей от времени (поскольку время пробоя много меньше времени диффузии). Можно показать, что при $L \gg l$ плотность тока через обкладки $j \equiv \sigma_0 E(0, t)$ определяется формулой

$$j = -\frac{U_0 \sigma_0}{L} \left[e^{-\gamma t} + \frac{2l}{L} \int_0^\infty d\xi \frac{\exp(-\gamma t e^{-\xi^2}) - \exp(-\gamma t)}{\exp \xi^2 - 1} \right]$$

где $\gamma = 4\pi\sigma_0/\varepsilon$. При $\gamma t \gg 1$

$$j \simeq -\frac{\sigma_0 U_0}{L} \frac{l}{L} \frac{1}{\gamma t \sqrt{\ln \gamma t}}$$

Происхождение этой медленно (неэкспоненциально) убывающей части тока обусловлено постепенным перемещением слоя, где сосредоточен пространственный заряд, в глубь жидкости. За время $t \gg \gamma^{-1}$ слой смещается на расстояние $\sim l \sqrt{\ln \gamma t}$ от поверхности электрода.

Помимо задач, связанных с исследованием электрической прочности жидкостей, применение диффузионных электродов может оказаться полезным в высоковольтных накопителях энергии с жидким диэлектриком.

Автор благодарит Г. И. Будкера и А. Г. Пономаренко за обсуждение результатов.

Поступила 4 II 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Алхимов А. П., Воробьев В. В., Клишкин В. Ф., Пономаренко А. Г., Солоухин Р. И. О развитии электрического разряда в воде. Докл. АН СССР, 1970, т. 194, № 5.

УДК 539.3

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ДО ДАВЛЕНИЙ ~ 1.7 МБАР

Н. Г. Калашников, Л. В. Кулешова, М. Н. Павловский

(Москва)

Изложены результаты экспериментального изучения однократной и двукратной ударной сжимаемости политетрафторэтилена (фторопласт — 4) и измерений скорости звука за фронтом волн нагружения.

Однократная ударная сжимаемость фторопласта-4 исследовалась методом отражения [1]. Измерения скорости распространения ударного фронта в образцах производились электроконтактным способом [2]. При расчете параметра сжатия за фронтом ударных волн изэнтропы расширения экранов отождествлялись с зеркальными отражениями ударных адиабат [2]. Используемые при этом динамические адиабаты меди, железа и алюминия взяты из [3,4]. Плотность исследовавшихся образцов фторопласта-4 составляла $\rho_0 = 2.19 \text{ г/см}^3$. Полученные результаты эксперимента, характеризующие однократную ударную сжимаемость фторопласта-4, приведены в табл. 1, где даны по порядку материал экрана и величина массовой скорости в нем U_* , значения волновой D и массовой U скоростей в фторопласте, давление ударного сжатия P и относительное сжатие $\sigma = \rho/\rho_0$. На фиг. 1 (кривая 1) данные табл. 1 сопоставлены с результатами аналогичных исследований других авторов [5] (кривым 2, 3, 4 соответствуют значения