

УДК 537.528

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

А. П. АЛХИМОВ, В. В. ВОРОБЬЕВ, В. Ф. КЛИМКИН, А. Г. ПОНОМАРЕНКО,
член-корреспондент АН СССР Р. И. СОЛОУХИН

О РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ

Практическое использование дистиллированной воды в импульсных высоковольтных накопителях и преобразователях энергии (¹) выявило необходимость всестороннего исследования физических особенностей развития электрического разряда в воде при напряженностях 100—500 кв/см. Кроме выяснения некоторых принципиальных вопросов физики пробоя воды в таких условиях, особый интерес представляло получение ряда количественных характеристик процесса — таких как время запаздывания

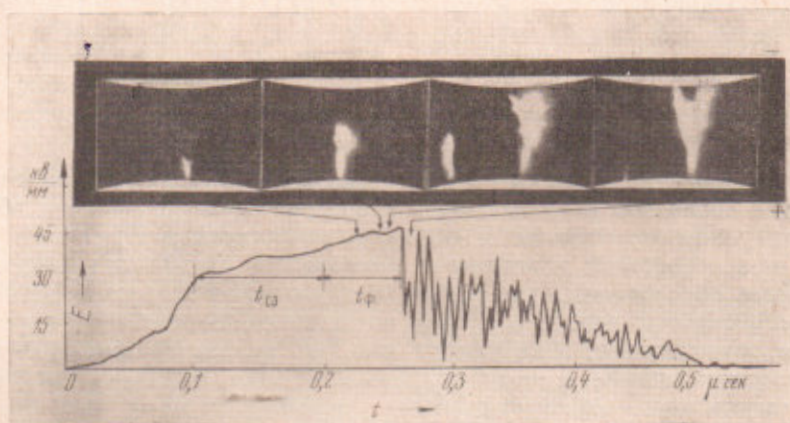


Рис. 1. Кадровые фотографии стримера, развивающегося в воде. Время экспозиции кадра 3 нсек, $\rho = 3 \cdot 10^6$ ом·см

t_2 , скорость стримера v_s и ее зависимость от напряженности поля E_0 , удельного сопротивления ρ , давления p и т. д. Эти данные могут оказаться полезными при различных оценках возможностей использования воды как диэлектрика, обеспечивающего в ряде импульсных процессов предельную плотность электрической энергии и максимальную удельную мощность, снимаемую с накопителя. Следует отметить, что характерное время работы импульсного накопителя энергии, работающего на воде, определяется прежде всего ее удельным сопротивлением ($RC \sim \rho/4\pi$) и обычно 1—10 мсек., так как даже при высокой степени очистки дистиллированной воды удельное сопротивление ограничено величиной порядка 10^7 ом·см.

В опытах производилась высокоскоростная фоторегистрация собственного свечения и теневая съемка разрядного промежутка в воде (комбинация рубиновый лазер — ЭОП с временем экспозиции 3—10 нсек. и одновременной записью напряжения на промежутке с помощью омического делителя, согласованного с импульсным осциллографом). Напряжение 100—300 кв подавалось от генератора импульсных напряжений на промежуток 5 мм между сферическими электродами диаметром 3 см. Серия однокадровых снимков собственного свечения плазменного образования (стримера), возникающего на положительном электроде, и соответствующая осциллограмма напряжения показаны на рис. 1.

Следует отметить, что примерно в течение 200 нсек. (см. рис. 1) не удается наблюдать никакого свечения на электродах в разрядном промежутке — даже с использованием усилителя света с усилением до 10^7 . Обработка большого числа фотографий и осциллограмм, подобных рис. 1, позволила выявить следующие особенности развития пробоя: а) фаза резкого уменьшения напряжения на промежутке предшествует стадия формирования плазменного образования — стримера, возникающего всегда на положительном электроде; б) длительность формирования стримерной стадии $t_{\phi 0}$ и средняя скорость движения стримера довольно сильно зависят от напряженности поля E_0 : $\bar{v}_c = l/t_{\phi 0} \approx kE^\alpha$, $\alpha = 2 \div 3$; в) фаза пробоя промежутка (резкий спад напряжения) наступает сразу же после касания стримером отрицательного электрода.



Рис. 2. Кадровые фотографии стримера, полученные тепевым методом. 1 — время до пробоя 30 нсек.; 2 — 20 нсек.; 3 — момент пробоя. $E_0 = 45$ кв/мм; $\rho = 3 \cdot 10^6$ ом·см

Интересные результаты были получены при использовании теневого метода. С помощью ЭОП типа ЗИМ-2 была проведена одновременная фоторегистрация собственного излучения стримера и теневого изображения окружающей его области. На рис. 2 приведено несколько кадров с экспозиций 5 нсек., на которых отчетливо видно, что вокруг возникшего плазменного ствола образуется газовая оболочка, на которой рассеивается параллельный световой пучок лазерной подсветки. Дальнейшее движение стримера в глубь промежутка и прорастание боковых ветвей всегда сопровождается предварительным образованием газовой полости, в которой собственно и продолжает свое движение плазменный канал.

На рис. 3 приведена зависимость средневзвешенного времени пробоя t_s от напряженности поля в промежутке E_0 (вольт-секундная характеристика, построенная по методу Лауэ⁽²⁾). С помощью этой характеристики было установлено, что, аналогично пробоям газовых промежутков, величина t_s может быть представлена в виде суммы временных интервалов двух различных фаз процесса: статистического времени запаздывания t_{c0} , измеряемого от момента приложения напряжения до момента появления «эффективного» электрона, и времени формирования разряда t_s , определяемого интервалом времени до образования в промежутке проводящего канала. Сравнение этих величин с временами появления световых явлений на аноде (см. рис. 1) указывает на то, что существует еще какой-то достримерный процесс, который оптически нами не зафиксирован.

На рис. 4 представлена зависимость средней скорости процесса, приводящего к пробую ($\bar{v} = l/t_{\phi}$, где t_{ϕ} определялось из вольт-секундной характеристики), от напряженности поля. Для сравнения на этом же рисунке приведены значения средней скорости стримера в промежутке, измеренные непосредственно с помощью ЭОП типа ПИМ-3, работавшего в режиме хронографии (развертки) с временным разрешением 10^{-9} сек. Как видно из рис. 4, средняя скорость $\bar{v}_c$, найденная из оптических измерений, тем сильнее отличается от скорости $\bar{v}$, чем меньше начальная напряженность

поля. Это служит еще одним свидетельством в пользу существования неизвестного пока механизма, участвующего в формировании пробоя и предшествующего появлению видимого свечения на аноде. Продолжительность этого процесса сокращается с увеличением E_0 .

Полученные результаты позволяют более наглядно представить последовательность развития пробоя в дистиллированной воде. Поскольку с

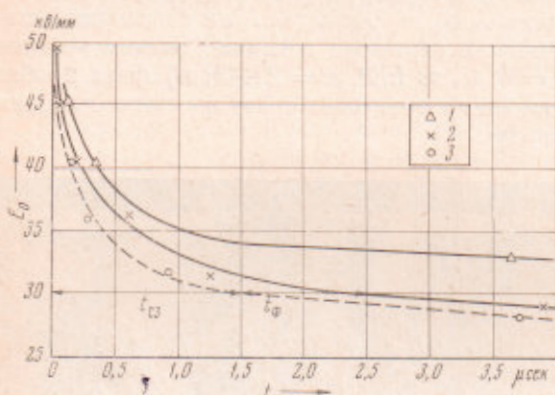


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость среднего времени пробоя от напряженности поля E_0 : 1 — $\rho = 2 \cdot 10^5$ ом·см, 2 — $\rho = 3 \cdot 10^6$ ом·см; 3 — зависимость $t_{сз}$ от E_0 , $\rho = 2 \cdot 10^5$ ом·см

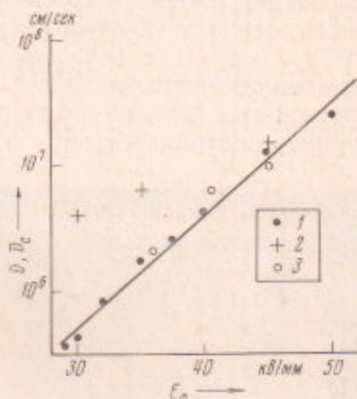


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость средней скорости формирования пробоя $\bar{v}$ (1), (3) и средней скорости стримера $\bar{v}_с$ (2) от напряженности поля E_0 ; $\rho_1 = 2 \cdot 10^5$ ом·см, $\rho_{2,3} = 3 \cdot 10^6$ ом·см

увеличением E_0 время $t_{сз}$ сильно уменьшается, то можно считать, что начальные электроны, по-видимому, возникают на катоде. Ускоряясь в приложенном поле, они приобретают энергию, достаточную для ионизации и последующего умножения в объеме жидкости. Одновременно должен эффективно протекать процесс диссоциации воды с выделением свободного водорода. Если скорость его выделения превышает скорость растворения, в жидкости начнут образовываться пузырьры. По-видимому, в опытах мы смогли зарегистрировать только конечную стадию формирования газовой полости вблизи анода и возникновение в ней электрического пробоя.

С точки зрения «пузырькового» механизма пробоя важным внешним фактором, определяющим динамику развития «пузырькового» стримера, должно быть давление в жидкости. Была обнаружена сильная зависимость электрической прочности от внешнего давления: например, при наложении давления до 150 атм. дистиллированная вода не пробивается в течение 10—15 мсек. при напряженностях поля до 700 кВ/см. Сильное влияние внешнего давления прежде всего свидетельствует о существенной роли пузырьковой стадии в развитии разряда, хотя и не исключает при этом других явлений, таких, например, как сдвиг равновесия при диссоциации воды. Этот эффект интересен также и в практическом отношении, поскольку увеличение «импульсной» электрической прочности при наложении внешнего давления позволяет работать при повышенных напряженностях.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. М. Лагунову и В. Л. Капитонову за помощь при выполнении этой работы.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
28 IV 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. А. Капитонов, В. А. Корнилов и др., Прикл. мех. и техн. физ., № 2, 29 (1970). ² Дж. Мик, Дж. Крэгс, Электрический пробой в газах, М., 1960.