

## К ВОПРОСУ НАРУШЕНИЯ ФАЗОВОЙ ОДНОРОДНОСТИ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Е. В. Кривицкий*

В рамках электромеханического рассмотрения формулируется качественная модель, на основании которой определяются основные характеристики пробоя жидкости в терминах макроскопических параметров диэлектрика и нагружающего электрического поля.

Импульсное электрическое поле, формирующее газовые включения по кавитационному механизму, приводит к образованию и скоплению элементов процесса разрушения. Локально возбужденное состояние микродефектов (пузырьков), обусловленное действием электрострикционного давления, сопровождается развитием неустойчивостей Рэлея. В предположении малости амплитуды колебаний весь процесс трактуется как возникновение и развитие неустойчивостей, приводящих в конечном счете к нарушению фазовой однородности и пробоем жидкости. Полученные приближенные аналитические выражения позволили оценить временные характеристики пробоя жидкости. Сравнение с экспериментом, на наш взгляд, дает удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных как для проводящих, так и непроводящих жидкостей.

Для анализа механизма нарушения электрической прочности жидких диэлектриков, в частности воды, принципиально важным является определение влияния растворенной или вновь образующейся под действием электрического поля газовой фазы [1]. Однако при воздействии относительно невысоких полей ( $10^6$ — $10^7$  В/м) пространственно-временные характеристики пробоя обычно не увязываются с механизмом образования и развития газовой фазы. Это вполне объясняется теми трудностями, которые возникают при сопоставлении характеристик времен развития пробоя разрядных промежутков с линейными скоростями перемещения межфазной границы жидкость—пар.

В случае газотепловой модели расчет скорости перемещения межфазной границы из уравнения Герца—Кнудсена [2] для различной степени перегрева жидкости дает значения  $0.1$ — $1$  м·с<sup>-1</sup> и соответствует времени пробоя умеренно коротких промежутков  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  с, что на несколько порядков превышает экспериментальные значения. Большая скорость развития процесса (порядка  $10^3$ — $10^5$  м·с<sup>-1</sup>) объясняется не увеличением скорости перемещения межфазной границы жидкость—пар, а резким ростом частоты образования зародышей паровой фазы при взрывном вскипании [3]. По величине перегрева, необходимого для обеспечения взрывного режима вскипания в воде [4], можно определить предельные значения электропроводностей, где реализуется еще газотепловой механизм пробоя [5–8]. Ее значение для умеренных по величине напряженностей оказывается больше  $10^{-1}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>.

В случае малых электропроводностей ( $\sigma_0 < 10^{-1}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>), когда нагревом при воздействии импульсных напряжений можно пренебречь, определяющую роль в нарушении фазовой однородности может играть хрупкое разрушение. Сходство механизмов разрыва жидкости и твердых тел при достаточно больших скоростях нагружения [9] позволяет использовать некоторые положения формирования устойчивых структур из элементов процесса разрушения [10] как начальной стадии пробоя конденсированной среды. В частности, предположение об электромеханической природе разрушения диэлектрика послужило основой для феноменологической модели катодонаправленного стримера вблизи порога пробоя, вызванного дефектами [11].

Согласно современным представлениям [10], процессу разрушения предшествует процесс образования локальных скоплений различного рода дефектов,

тип которых определяется свойствами материала и характером нагружения. Элементам процесса разрушения (ЭПР), которые в общем случае представляют собой локально возбужденное состояние, могут быть поставлены в соответствие различного типа микродефекты.

Не выходя за рамки электромеханического рассмотрения, можно сформулировать качественную модель, позволяющую определять основные характеристики пробоя жидкости в терминах макроскопических параметров диэлектрика и нагружающего электрического поля.

Импульсное электрическое поле, формирующее газовые включения по кавитационному механизму, приводит к образованию и скоплению элементов процесса разрушения. Локально возбужденное состояние микродефектов (пузырьков), обусловленное действием электрострикционного давления [12], сопровождается развитием неустойчивостей Рэлея [13]. В соответствии со структурой закона дисперсии малых колебаний свободной поверхности максимальное значение инкремента неустойчивости [14] может быть грубо оценено из выражения

$$\lambda_m^2 = \frac{8\sigma_{II}}{\rho a^3}, \quad (1)$$

где  $a$  — главный радиус кривизны в данной точке поверхности,  $\sigma_{II}$  — поверхностное натяжение жидкости,  $\rho$  — плотность.

Пренебрегая временем первичных ионизационных процессов, можно время зажигания разряда отождествить с  $1/\lambda_m$ .

По-прежнему считая амплитуду колебаний малой по сравнению с линейным размером радиуса кривизны, определим последний, исходя из уравнения движения межфазной границы под действием электрического поля

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{2}{a} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2(0)}{2\sigma_{II}}. \quad (2)$$

Поскольку до начала роста ветви пробоя в глубь промежутка границей раздела является поверхность сферической оконечности электрода, то из (1) и (2) получаем значение инкремента неустойчивостей у поверхности электрода

$$\lambda_E = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2(0)}{\sqrt{2}\sigma_{II} a}. \quad (3)$$

В представленной модели, так же как и в случае модели механизма газотеплового пробоя жидкости [7], время зажигания разряда определяется временами появления и роста газовой фазы до размеров, соответствующих напряжению  $U_{пр}(d)$  пробоя газового промежутка с линейными размерами  $d$ . Постоянная времени развития электромеханических неустойчивостей  $1/\lambda_E$  должна в соответствии с качественной моделью соразмеряться с длительностью зажигания разряда, которая в исследованиях электрических характеристик и пространственного временного развития пробоя соответствует длительности долидерного времени  $\tau_{д.т}$  [5].

Описание начальной стадии разряда в проводящей жидкости, основанное на представлении о развитии перегретой неустойчивости в ее объеме под действием электрического поля, определяет величину инкремента нарастания перегретой неустойчивости как

$$\lambda_T = \frac{1}{\rho c_p} E^2(0) \frac{d\sigma}{dT} \lambda^*, \quad (4)$$

где  $E(0)$  — начальная напряженность поля, определяемая  $U(0)$  и геометрией электродной системы;  $d\sigma/dT$  — величина температурной зависимости электропроводности;  $\lambda^*$  — безразмерный инкремент;  $\rho$  — плотность;  $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении. Величина производной электропроводности по температуре оказывается величиной постоянной и равной  $\alpha = d\sigma/dT = 2 \cdot 10^{-2}$ .

Поскольку каждый из указанных механизмов передачи энергии вносит аддитивный вклад в энергию образованная свободной поверхности, то постоянная

времени развития газовой фазы, отождествляемая с временем зажигания разряда в жидкости, согласно (3) и (4), может быть представлена в виде

$$\tau_s^! = \frac{\rho/E^2(0)}{\frac{\epsilon\epsilon_0\sqrt{\rho}}{\sqrt{\sigma_{дa}}} + \frac{a}{c_p}} \quad (5)$$

Сопоставление расчетных данных с экспериментальными [5, 7] для времени зажигания разряда в проводящей жидкости с различными начальными напряжениями заряда  $U(0)$  и электропроводностями воды приведено в табл. 1. Выбранный диапазон электропроводностей соответствует переходу от электро-теплого к электромеханическому механизму зажигания разряда. Начальная напряженность, приведенная в табл. 1, соответствует напряженности непосредственно у поверхности электрода (стержня) в системе электродов стержень—плоскость и определяется как  $E(0) = U(0)/a$ , где  $a$  — радиус скругления оконечности электрода.

Т а б л и ц а 1

| Исходные данные эксперимента                     |                                   | Результаты эксперимента   |                                   | Расчетные данные      |
|--|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| $\sigma_0, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$ | $E(0) \cdot 10^{-6}, \text{ В/м}$ | $\tau_{д.л}, \text{ мкс}$ | $\Delta[\tau_{д.л}], \text{ мкс}$ | $\tau_s, \text{ мкс}$ |
| $10^{-3}$  | 5                                 | 74                        | 66.5                              | 47.6                  |
|  | 6                                 | 33.5                      | 20.0                              | 33.0                  |
|  | 7                                 | 22.0                      | 16.5                              | 24.5                  |
|  | 8                                 | 12.3                      | 6.6                               | 18.3                  |
| $10^{-2}$  | 5                                 | 86.2                      | 51.5                              | 45.0                  |
|  | 6                                 | 42.6                      | 22.3                              | 41.4                  |
|  | 7                                 | 27.8                      | 13.4                              | 23.0                  |
|  | 8                                 | 11.3                      | 9.4                               | 17.5                  |
| $10^{-1}$  | 5                                 | 57.8                      | 27.1                              | 30.0                  |
|  | 6                                 | 23.8                      | 11.2                              | 20.8                  |
|  | 7                                 | 16.5                      | 7.1                               | 15.3                  |
|  | 8                                 | 9.4                       | 7.1                               | 11.7                  |

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что для жидкости с электропроводностью  $10^{-3}—10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$  в пределах статического разброса  $\Delta[\tau_{д.л}]$  некоторое расхождение между расчетными и экспериментальными данными наблюдается в случае малых начальных напряжений заряда  $U(0)$ , что вполне объяснимо использованием конденсаторной батареи, емкость которой конечна. Кроме того, следует учитывать, что напряженность  $E(0) = 5 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ , при которой наблюдается наибольшее расхождение данных, оказывается близкой по величине к критической напряженности ( $3.6 \times 10^6 \text{ В/м}$ ) [3].

При продвижении поверхности разрыва (первичного канала), а затем и зоны ионизации в глубь межэлектродного промежутка следует учитывать следующее: существует область с линейными размерами  $d$  [15], прилегающая к электроду или к головке прорастающего лидера, значение напряженности поля в которой больше или равно критической; напряженность у головки лидера оказывается выше начальной напряженности вследствие малых размеров радиуса кривизны головки лидера; источником неустойчивостей является поверхность газовых пузырьков в жидкости (для воды максимальный размер газовых пузырьков при нормальных условиях принят равным  $10^{-4} \text{ м}$ ).

Так как радиус головки лидера намного меньше радиуса скругления электрода, то для грубых оценок увеличение напряженности у головки лидера по сравнению с величиной  $E(0)$  можно учесть введением простого коэффициента усиления поля, равного 1.5, как это сделано в [16] ( $E_s \approx 1.5 E(0)$ ).

Область критической напряженности в начальный момент роста лидерной ветви может быть определена [15] из выражения

$$d \approx \frac{a_0}{1 - \frac{a_0}{l_{p, \pi}}} \frac{E_r - E_{r, p}}{E_{l, p}}. \quad (6)$$

Соответственно скорость роста лидера

$$v_{\pi} = d(\lambda_T + \lambda_E). \quad (7)$$

Используя выражения (5)–(7), можно получить грубую оценку начальной скорости роста лидера. Оценка велась для диапазона напряженностей  $5-8 \times 10^6$  В/м и электропроводностей  $10^{-3}-10^{-1}$  Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ , для которых имеются экспериментально определенные средние скорости развития процесса [16]. Скорость лидерной ветви при фиксированной длине разрядного промежутка ( $l_{p, \pi} = 8 \cdot 10^{-2}$  м) определялась в опытах при одновременном измерении электрических характеристик и скоростной съемки процесса. Экспериментальные и расчетные данные приведены в табл. 2. Помимо средних значений лидерного времени приводятся также средние квадратичные отклонения.

Т а б л и ц а 2

| Исходные данные эксперимента       |                          |                           | Результаты эксперимента |                     |                           | Результаты расчета         |  |                           |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|--|---------------------------|
| $\sigma_0$ , Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ | $U(0) \cdot 10^{-3}$ , В | $E_r \cdot 10^{-6}$ , мкс | $t_d$ , мкс             | $\Delta[t_d]$ , мкс | $v_d \cdot 10^{-3}$ , м/с | $\sigma \cdot 10^{-3}$ , м | $(\lambda_{\pi} + \lambda_E) \times 10^{-3}$ , с $^{-1}$ | $v_d \cdot 10^{-3}$ , м/с |
| $10^{-3}$                          | 25                       | 7.5                       | 157.0                   | 63.2                | 0.5                       | 5.4                        | 3.31   | 1.8                       |
|                                    | 30                       | 9.0                       | 43.7                    | 12.2                | 1.8                       | 7.5                        | 4.80   | 3.6                       |
|                                    | 35                       | 10.5                      | 23.4                    | 6.7                 | 3.4                       | 9.6                        | 6.62   | 6.3                       |
|                                    | 40                       | 12.0                      | 6.5                     | 2.4                 | 12.3                      | 11.7                       | 8.64   | 10.1                      |
| $10^{-2}$                          | 25                       | 7.5                       | 12.0                    | 31.0                | 0.66                      | 5.4                        | 3.37   | 1.8                       |
|                                    | 30                       | 9.0                       | 50.0                    | 26.0                | 1.6                       | 7.5                        | 4.82   | 3.7                       |
|                                    | 35                       | 10.5                      | 13.4                    | 10.2                | 6.0                       | 9.6                        | 6.73   | 6.4                       |
|                                    | 40                       | 12.0                      | 4.8                     | 3.0                 | 16.7                      | 11.7                       | 8.78   | 10.2                      |
| $5 \cdot 10^{-2}$                  | 25                       | 7.5                       | 27.2                    | 14.9                | 1.5                       | 5.4                        | 3.46   | 1.9                       |
|                                    | 30                       | 9.0                       | 10.4                    | 8.1                 | 5.3                       | 7.5                        | 5.02   | 3.8                       |
|                                    | 35                       | 10.5                      | 5.4                     | 1.3                 | 13.3                      | 9.6                        | 0.98   | 6.7                       |
|                                    | 40                       | 12.0                      | 3.4                     | 0.8                 | 24.5                      | 11.7                       | 9.08   | 10.6                      |
| $1 \cdot 10^{-1}$                  | 35                       | 10.5                      | —                       | —                   | —                         | 9.6                        | 7.17   | 6.9                       |
|                                    | 40                       | 12.0                      | 42.5                    | 8.0                 | 2.0                       | 11.7                       | 9.36   | 10.95                     |

Из приведенных данных видно, что наибольшее расхождение расчетных и экспериментальных значений наблюдается для случая начальных напряженностей, близких к критической. Здесь естественным является отличие средних скоростей от оцененных в начальный момент времени, так как в расчетах не учитывались падение напряжения и приближение напряженности к критической. Следует обратить внимание на то, что при  $\sigma_0 = 10^{-1}$  Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$  наблюдается эффект резкого снижения скорости роста лидера по сравнению с расчетной.

Контроль электрических и пространственно-временных характеристик указывает, что, кроме заметного снижения скорости в период предшествующий пробую, наблюдается значительное увеличение числа лидеров лидерной ветви. Естественно, что в этом случае в результате выравнивания поля на головке каждого лидера также уменьшается и величина  $E_r$ .

Результаты проведенных исследований также показывают, что на стадии активного роста лидерной ветви в глубь длинных разрядных промежутков скорость практически не зависит от  $\sigma_0$ . Противоречивость выводов о влиянии на временные характеристики пробоя электропроводности исследуемых жидкостей многих работ можно, по-видимому, объяснить тем, что при проведении экспериментов обычно определяют суммарное время пробоя, не разделяя его на стадии. Результаты расчета, по порядку величины совпадающие с экспериментальными значениями, а в ряде случаев дающие и более точное совпадение, описывают квадратичную зависимость скорости развития процесса от напря-

женности поля. Для более адекватного описания ситуации, по-видимому, необходимо проводить оценки с учетом переходного процесса в разрядной цепи и определять напряженность поля на головке лидера с учетом ветвления лидеров.

#### Список литературы

- [1] Ушаков В. Я. Электрический пробой жидкостей. Томск, 1975. 258 с.
- [2] Хирс Ж., Паунд Г. Испарение и конденсация. М.: Металлургия, 1966. 194 с.
- [3] Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 151 с.
- [4] Скрипов В. П., Павлов П. А. // ТВТ. 1970. Т. 8. № 4. С. 833.
- [5] Жекул В. Г., Мурзаев А. В., Хаскина Л. С. // Физические основы электрического взрыва. Киев: Наукова думка, 1983. С. 19—25.
- [6] Раковский Г. Б., Хайнацкий С. А., Жекул В. Г. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 368—370.
- [7] Жекул В. Г., Раковский Г. Б. // ЖТФ. 1982. Т. 53. Вып. 1. С. 8—14. Теория эксперимент—практика разрядноимпульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1987. С. 93—103.
- [8] Раковский Г. Б., Кривицкий Е. В. // Теория эксперимент—практика разрядноимпульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1987. С. 93—103.
- [9] Механика в СССР за 50 лет. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1973. Т. 4. С. 480.
- [10] Кушниренко А. Е., Псахье С. Г., Глузман С. Г., Панин В. В. // Изв. вузов. Физика. 1987. № 7. С. 3—120.
- [11] Уваров В. Л. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 2004—2008.
- [12] Коробейников С. М., Яшник Э. В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 10. С. 1889—2104.
- [13] Назин С. С., Изотов А. Н., Шикин В. Б. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 1. С. 121—125.
- [14] Бадан В. Е., Владимиров В. В., Парицкий В. Я. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 6. С. 1197—1198.
- [15] Кривицкий Е. В. Динамика электрического взрыва. Киев.: Наукова думка, 1986. 203 с.
- [16] Стефанов К. С. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1967. 496 с.

Проектно-конструкторское бюро  
электрогидравлики АН СССР  
Николаев

Поступило в Редакцию  
1 сентября 1988 г.  
В окончательной редакции  
17 августа 1989 г.