

03;04;05;12

Эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик, погруженный в изолирующую жидкость

© Г.А. Воробьев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050 Томск, Россия
e-mail: office@tusur.ru

(Поступило в Редакцию 14 мая 2004 г.)

При помещении твердого диэлектрика в изолирующую жидкость и при наложении на поверхность диэлектрика электродов, обуславливающих неоднородное электрическое поле, и при подаче на электроды высоковольтного импульса с длительностью фронта в несколько микросекунд полный пробой происходит в твердом диэлектрике.

Суть явления следует считать важной, если конечно твердый диэлектрик непористый и нерыхлый и имеет электрическую прочность E порядка 10^8 В/м. Явление признано научным открытием [1].

Поводом для его появления послужили неоднократные предложения А.А. Воробьева, сделанные в 50-х годах прошлого столетия о разрушении горных пород высоковольтными импульсами. Это могли быть дробление, резание горных пород, бурение скважин в горных породах и др. Для практической реализации этих предложений не хватало того существенного факта, чтобы второй электрод был расположен близко к первому электроду, но чтобы при этом разряд происходил не в окружающей среде (обычно жидкость, также воздух), а в твердом диэлектрике. Мы рассмотрим две среды: твердый диэлектрик и изолирующую жидкость.

Надо было найти подходящую характеристику пробоя этих сред. Такой характеристикой оказались вольт-секундные характеристики [2–4]. На рис. 1 представлены вольт-секундные характеристики двух твердых диэлектриков и трансформаторного масла [5, рис. 6.26] в случае электродов острие-плоскость при положительной полярности электрода-острия. При этом пробивное напряжение для твердых диэлектриков ниже, чем при отрицательной полярности острейного электрода. Для трансформаторного масла эффект полярности слабо проявляется и одинаков при любой полярности электрода-острия [5]. Величины пробивных напряжений были пересчитаны на межэлектродное расстояние 4 см, так как наименьший диаметр скважин составляет 8 см. Как видно из рис. 1, вольт-секундные характеристики твердых диэлектриков и трансформаторного масла пересекаются (точки a и b). Это значит, что при экспозициях, меньших, чем те, которые соответствуют точкам a и b , пробивное напряжение трансформаторного масла становится выше пробивных напряжений твердых диэлектриков.

Представляло, конечно, интерес проверить этот эффект экспериментально, что проделал А.Т. Чепиков [3]. На поверхность твердого диэлектрика, погруженного в трансформаторное масло, накладывался металлический

электрод в виде кольца с внутренним диаметром 8 см. Кольцо заземлялось. К поверхности твердого диэлектрика приставлялся электрод-острие, на который подавался высоковольтный импульс положительной полярности. При длительности импульса 10^{-5} с и более разряд, видимо, скользил по поверхности твердого диэлектрика и были видны нити углерода, образовавшегося за счет разложения масла под действием электрических разрядов. Но при длительности фронта импульса в несколько μ с разряд внедрялся в твердый диэлектрик, в качестве которого был взят фторопласт-4, так как он не растрескивался под действием разрядов в нем.

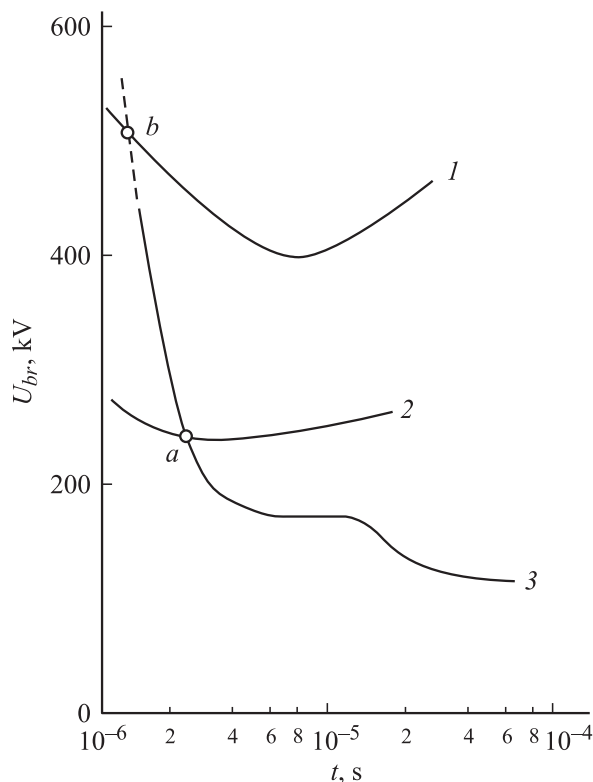


Рис. 1. Вольт-секундные характеристики органического стекла (1), льда (2) и трансформаторного масла (3).

На рис. 2 показан канал разряда во фторопласте-4 (не пробитая часть твердого диэлектрика удалена). Для сравнения на рис. 2 показана обычная спичка (3) длиной 46 мм.

Длина канала разряда по горизонтали составляла 32 мм. Следовательно, разряд прошел 14 мм в масле, а затем внедрился в твердый диэлектрик. Этот вопрос будет обсуждаться ниже. Здесь мы попытаемся установить причину внедрения разряда в твердый диэлектрик [2].

При приложении импульса напряжения к электроду-острию разряды, естественно, начинаются в жидкости. При этом образуется пучок каналов разряда, окончания которых образуют поверхность, близкую к сферической (рис. 3), т.е. электрическое поле в жидкости выравнивается и дальнейшее продвижение разряда прекращается. У поверхности твердого диэлектрика напряженность поля, наоборот, усиливается, и здесь происходит внедрение разряда.

На то, что внедрение разряда происходит не под электродом-острием, указывают также данные, приведенные на рис. 4 [6]. Точки внедрения расположены в основном около положительного электрода-острия. Это связано с вышеуказанным эффектом полярности при пробое твердых диэлектриков.

Представляло интерес определить, при каком наименьшем значении электрической прочности жидкости

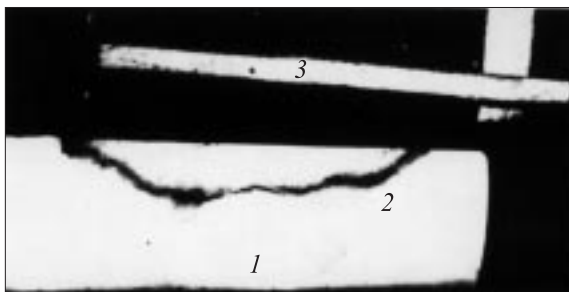


Рис. 2. Разряд (1) во фторопласте-4 (2). 3 — обычная спичка. Темное пространство — трансформаторное масло.

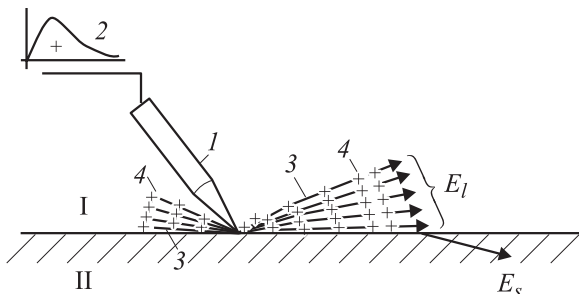


Рис. 3. Схема разрядных процессов в трансформаторном масле I и твердом диэлектрике II. 1 — электрод-острие; 2 — импульс высокого напряжения; 3, 4 — заряды в разрядных каналах в трансформаторном масле; E_l — напряженность поля в трансформаторном масле; E_s — напряженность поля в твердом диэлектрике.

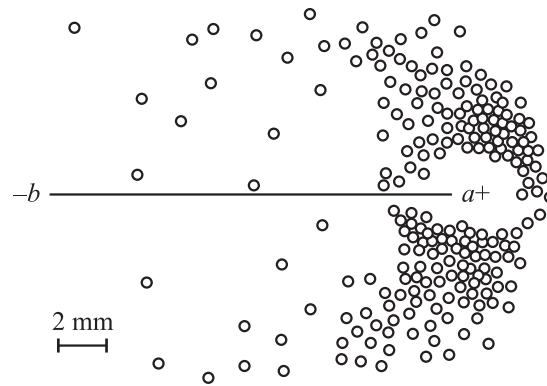


Рис. 4. Распределение точек внедрения разряда в твердый диэлектрик (маленькие кругляшки). Электроды — 2 острия; a, b — точки касания остриевых электродов (a — положительного острия, b — отрицательного острия).

еще может происходить внедрение разряда в твердый диэлектрик. Был произведен весьма ориентировочный расчет, но оказалось, что его выводы примерно соответствуют данным по разрушению горных пород, полученным не так давно.

Примем два условия. Жидкость пробивается после образования пучка разрядов около электрода-острия (рис. 4) в условиях однородного поля. Пробивное напряжение твердого диэлектрика соответствует минимальному пробивному, открытому А.Ф. Вальтером и Л.Д. Инге еще в 30-е года [7, рис. 449].

Нужно было определить минимальное значение электрической прочности E_{brl} при заданном значении электрической прочности твердого диэлектрика E_{brs} , которое можно ориентировочно принять равным $2-3 \cdot 10^8$ В/м, чтобы еще происходило внедрение разряда в твердый диэлектрик.

Введем коэффициенты k, m, l : коэффициент

$$k = \frac{V_{brs}(d)}{V_{brs \min}(d)}, \quad (1)$$

$V_{brs}(d)$ — пробивное напряжение твердого диэлектрика в однородном поле при межэлектродном расстоянии d , $V_{brs \min}(d)$ — минимальное пробивное напряжение твердого диэлектрика при этой же толщине d ; коэффициент

$$m = \frac{E_{brs}}{E_{brs}(d)}, \quad (2)$$

E_{brs} — электрическая прочность твердого диэлектрика при толщине 0.1–0.3 мм, при которой она обычно определяется; $E_{brs}(d)$ — электрическая прочность твердого диэлектрика при толщине d , при которой исследуется эффект внедрения разряда; коэффициент

$$l = \frac{E_{brl}}{E_{brl}(d)}, \quad (3)$$

E_{brl} — электрическая прочность жидкости при межэлектродном расстоянии $d = 0.1-0.2$ мм, $E_{brl}(d)$ — напряженность поля, при которой наблюдается эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик.

Учитывая (1)–(3), получим

$$\frac{E_{\text{brs}}}{E_{\text{brl}}} = \frac{k \cdot m}{l} \quad \text{или} \quad E_{\text{brl}} = E_{\text{brs}} \cdot \frac{l}{k \cdot m}. \quad (4)$$

Коэффициенты k , m , l были определены по экспериментальным данным, приведенным в [7]. Из рис. 496 $k = 25.6$, из рис. 407 $m = 1.63$, из рис. 176 $l = 2.07$.

Учитывая все это, получаем $E_{\text{brl}} = 0.099 - 0.148 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, т.е. $E_{\text{brl}} = 5\%$ от E_{brs} при экспозиции в несколько μs .

Такое значение E_{brs} нам неизвестно, но уже более 20 лет ведется разрушение горных пород в водопродонной воде, что указывает на приблизительную правильность произведенного расчета.

Указанный эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик может найти применение в высоковольтной энергетике.

Список литературы

- [1] Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Чепиков А.Г. Российская академия естественных наук. Научное открытие: Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульсного напряжения. Диплом № 107. М., 1999. Регистрационный № 122. Приоритет 14 декабря 1961 г.
- [2] Воробьев Г.А. Докт. дис. Томск, 1963. Т. II.
- [3] Воробьев А.А. Нарушение электрической прочности диэлектриков и их пробой. Томск, 1961. 108 с.
- [4] Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М., 1966. 221 с.
- [5] Техника высоких напряжений / Под ред. Л.И. Сиротинского. Ч. II. 1953. 240 с.
- [6] Семкин Б.В. Канд. дис. Томск, 1966.
- [7] Сканава Г.И. Физика диэлектриков. Область сильных полей. М.: ГИФМЛ, 1958. 907 с.