

04

О природе „эффекта Воробьевых“ в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков

© Г.А. Месяц

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
E-mail: isakov@sci.lebedev.ru, mesyats@nsc.gpi.ru

Поступило в Редакцию 12 августа 2005 г.

„Эффект Воробьевых“ заключается в особенностях разряда при помещении в среду жидкого диэлектрика диэлектрика из твердого тела, с поверхностью которого контактируют два штыревых электрода. Если к электроду прикладывается импульс напряжения с нарастающим фронтом, то при малой крутизне фронта разряд происходит в жидкости по поверхности твердого диэлектрика, а при большой — внедряется в глубь твердого диэлектрика и откалывает часть его поверхности. При большой крутизне фронта ток смещения за счет движения плазмы поверхностного разряда, проходящий через микровыступ на электроде в контакте, приводит к его взрыву, образованию струи металлической плазмы, которая внедряется в твердый диэлектрик, и приводит к разряду внутри него. При малой же крутизне фронта плазма поверхностного разряда переключает электроды и внедрения разряда не происходит.

При исследовании импульсной электрической прочности жидких и твердых диэлектриков на косоугольной волне импульсного напряжения было установлено, что их вольт-секундные характеристики по-разному меняют свой наклон. С увеличением крутизны фронта импульса напряжения или времени его воздействия прочность жидких диэлектриков становится выше, чем твердых [1]. Если при статическом напряжении U_s электрическая прочность твердых диэлектриков обычно превышает прочность жидких диэлектриков, то при импульсном напряжении U_p длительностью 10^{-6} с и менее и амплитудах порядка 10^5 V электрическая прочность диэлектрической жидкости и даже воды становится выше прочности твердых диэлектриков, включая горные породы. Крутизну фронта импульса напряжения $A = \frac{dU}{dt}$, когда наступает этот эффект, называют критической крутизной и обозначают A_c [2]. Этот эффект,

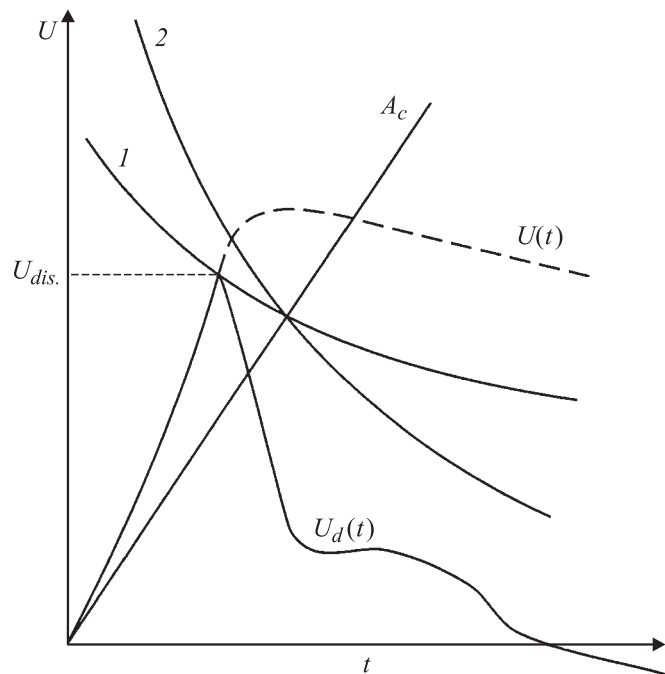


Рис. 1. Диаграммы, характеризующие „эффект Воробьевых“. $U(t)$ — импульс воздействующего напряжения, U_{dis} — напряжение, при котором наступает пробой твердого диэлектрика, $U_d(t)$ — напряжение на диэлектрике в процессе разряда в нем, 1 и 2 — вольт-секундные характеристики соответственно твердого (ТД) и жидкого (ЖД) диэлектриков, A_c — критическая крутизна напряжения на фронте импульса напряжения, выше которой проявляется „эффект Воробьевых“.

открытый группой А.А. Воробьева и Г.А. Воробьева [1], мы назвали „эффектом Воробьевых“.

Принцип действия этого эффекта убедительно демонстрируется кривыми на рис. 1. Здесь условно показаны зависимости напряжения пробоя от времени его воздействия (вольт-секундные характеристики) на твердый и жидкий диэлектрики при пробое на косоугольном импульсе напряжения. Точка пересечения этих характеристик определяет

критическую крутизну роста напряжения на фронте импульса A_c . Здесь же показана зависимость напряжения на фронте импульса до и после пробоя твердого диэлектрика. Этот эффект позволил разработать электроимпульсный способ разрушения диэлектрических сред, таких, как бурение скважин, дробление и измельчение материалов, резание, сепарация и т.д. Однако его природа до сих пор остается нераскрытой. Мы считаем, что ее можно понять на основе идеи о микровзрывах на поверхности электродов и эктонных процессов, развитых нами для объяснения физики вакуумных разрядов [3,4].

Теперь рассмотрим простейшую схему реализации этого эффекта. Пусть имеется твердый диэлектрик в среде жидкого. Жидкий диэлектрик расположен в металлической заземленной ванне. Поверхности твердого диэлектрика касаются два электрода штыревой формы с острыми краями (катод и анод), к которым прикладывается импульс с нарастающим напряжением на фронте $U(t)$ (схема *a* на рис. 2). При крутизне нарастания напряжения меньшей критической $A < A_c$ разряд между электродами происходит в жидкости по поверхности твердого диэлектрика. При большей крутизне $A > A_c$ он внедряется внутрь диэлектрика. Это приводит к образованию разряда между катодом и анодом, но уже внутри твердого диэлектрика (схема *b* на рис. 2). Для различных комбинаций твердых и жидких диэлектриков, а также материала электродов величина $A_c = 10^{10} \div 10^{11}$ V/s [2]. Если в канале разряда будет выделено достаточно быстро необходимое количество энергии от импульсного генератора, то произойдет взрыв внутри твердого диэлектрика с образованием воронки на поверхности твердого тела (схема *c* на рис. 2).

За счет чего происходит внедрение разряда в твердый диэлектрик? За счет большой концентрации энергии в микрообъеме электрода (10^4 J/g) происходит взрыв этого объема, который сопровождается выбросом порции плазмы в виде узкой струи, движущейся со скоростью $\sim 10^6$ cm/s. Проникая внутрь твердого диэлектрика, она инициирует в нем пробой. Большая концентрация энергии в микрообъеме катода происходит за счет джоулева разогрева микровыступов на катоде током автоэлектронной эмиссии при разрядах в вакууме, в нашем же случае за счет эффекта „тройной точки“ на катоде или аноде [5]. Действительно, поверхность электрода всегда неоднородна. На ней имеется много микровыступов [3–5]. Поэтому реально контакт диэлектрика и металла электрода происходит в отдельных точках. Так как в точке контакта

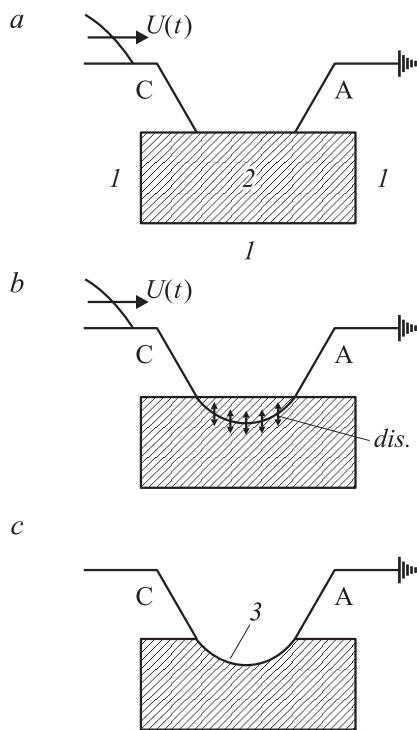


Рис. 2. Принцип электроимпульсного разрушения, основанный на „эффекте Воробьевых“. *A* и *C* — анод и катод штывревой формы, *2* — твердый диэлектрик, который находится в среде жидкого диэлектрика *I*, *dis* — разрядный канал, *3* — откол на поверхности твердого диэлектрика.

присутствуют одновременно три среды металл—твердый диэлектрик—жидкий диэлектрик, то ее называют тройной точкой. На поверхности микровыступа электрическое поле усиливается во много раз по сравнению с внешним приложенным полем. Это приводит к электрическому разряду в жидкости на поверхности твердого диэлектрика. Плазма этого разряда, двигаясь по поверхности диэлектрика, создает ток смещения. Этот ток проходит через микровыступ и создает в нем большую плотность тока (до 10^8 – 10^9 А/см²). За счет этого и происходит электрический взрыв микровыступа на поверхности электрода.

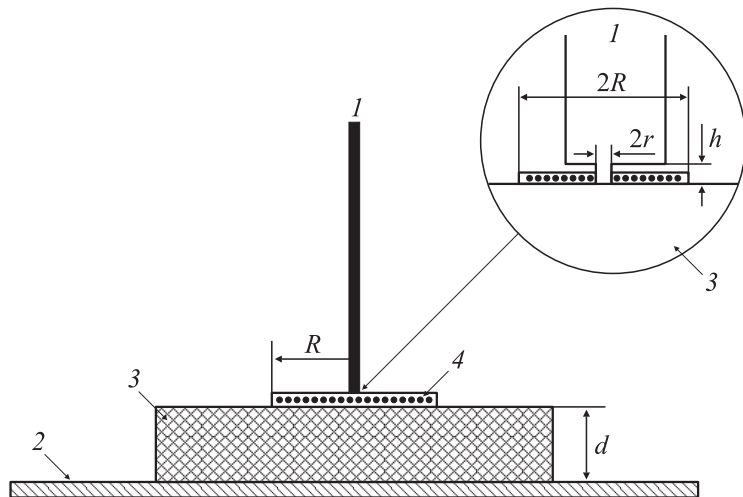


Рис. 3. Схематическое изображение электродов при пробое твердого диэлектрика. 1 — штыревой электрод, 2 — плоский заземленный электрод, 3 — диэлектрик, 4 — плазма поверхностного разряда.

Рассмотрим механизм функционирования „эффекта Воробьевых“ при помощи схемы, показанной на рис. 3. Электрод 1 штыревой, электрод 2 плоский. Пусть электрод 1 будет катодом. Диэлектрик имеет форму пластины. Вверху показана стилизованная картина контакта электрода 1 с диэлектриком 3. Микровыступ имеет форму цилиндра с радиусом r и высотой h . Далее предположим, что импульсное напряжение U , прикладываемое между электродами 1 и 2, нарастает по линейному закону

$$U = At, \quad (1)$$

где $A = \frac{U_a}{t_{fr}}$ — крутизна фронта импульса, U_a — амплитуда импульса, t_{fr} — длительность фронта. При достижении необходимой величины потенциала происходит разряд в жидкости по поверхности твердого диэлектрика. Пусть плазма этого разряда на катоде имеет форму круга

радиусом R и площадью S . В этом случае

$$\begin{aligned} R &= v_l t, \\ S &= \pi v_l^2 t^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где v_l — скорость движения плазмы в жидкости по поверхности диэлектрика. Такая геометрия плазмы реально имеет место при сравнительно коротком фронте импульса $t_{fr} \leq 10^{-7}$ s [6]. При более длинных временах на поверхности диэлектрика образуются стримеры.

Если толщина твердого диэлектрика $D \gg R$, то движущаяся плазма будет создавать динамическую емкость [7]

$$C = 4\varepsilon_0\varepsilon R = 4\varepsilon_0\varepsilon v_l t, \quad (3)$$

где ε_0 — абсолютная диэлектрическая постоянная, ε — относительная диэлектрическая постоянная твердого диэлектрика. Это приведет к появлению тока смещения, который с учетом формул (1)–(3) запишется так:

$$i = \frac{dUC}{dt} = 8\varepsilon_0\varepsilon A v_l t. \quad (4)$$

При этом мы предположили, что скорость движения плазмы v_l не зависит от времени [6]. Если принять, что этот ток протекает через торец микровыступа (рис. 3), то плотность этого тока составит

$$i = \frac{i}{\pi r^2} = \frac{8\varepsilon_0\varepsilon A v_l}{\pi r^2}. \quad (5)$$

Если длительность фронта импульса t_{fr} много больше, чем время протекания тепловых процессов в микровыступах, то [4]

$$t_{fr} \gg \frac{h^2 \rho c}{\lambda}, \quad (6)$$

где h — высота микровыступа, ρ — плотность металла электрода, c — теплоемкость, а λ — теплопроводность. В этом случае нагрев выступа происходит аналогично стационарному процессу. Тогда взрыв

микровыступа происходит при достижении некоторой критической плотности тока [4]:

$$j_0 = \frac{\pi}{2h} \left(\frac{\lambda}{\kappa_0} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Если зависимость удельного сопротивления металла κ от температуры T линейная, то величина κ_0 определяется из соотношения

$$\kappa = \kappa_0 T. \quad (8)$$

При высоте выступа $h = 1 \mu\text{m}$ для меди $j_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ A/cm}^2$ [4].

Приравнивая плотность тока из (5) и (7), найдем время, необходимое для взрыва выступа на электроде. Ограничимся условием, когда время задержки пробоя в жидкости на поверхности диэлектрика $t_{st} \ll t_{fr}$. Это предположение допустимо, так как из-за очень сильного увеличения напряженности поля на кончике микровыступа этот пробой инициируется уже при сравнительно низком напряжении между электродами. В этом случае время t_d , необходимое для начала разряда в твердом диэлектрике:

$$t_d = \frac{\pi j_0 r^2}{8 \epsilon_0 \epsilon A v_l}. \quad (9)$$

При электрическом взрыве микровыступа образуется тонкая струя плазмы, которая со скоростью 10^6 cm/s проникает внутрь твердого диэлектрика и приводит к началу прорастания канала в нем со скоростью v_{can} . Этот эффект напоминает электроискровую обработку металлов, когда такая же струя плазмы разрушает противоположный металлический электрод в микронных промежутках. В то же время от катодного штыря к анодному движется плазма со скоростью v_l , которая в конечном счете может привести к замыканию обоих штырей. Если принять, что разряд с анодного штыря не развивается, то время, необходимое для замыкания электродов, составит

$$t_l = \frac{l}{v_l}, \quad (10)$$

где l — расстояние между катодным и анодным штырями.

Итак, имеет место конкуренция двух разрядов в жидком и твердом диэлектриках. Сравнение скоростей развития разряда показывает, что

$v_l \sim 10^5$ cm/s [6], а $v_d \sim 10^6$ cm/s [1], т.е. $v_d \gg v_l$. Следовательно, внедрение разряда в твердый диэлектрик начнется при $t_d < t_l$, а критическая крутизна фронта импульса может быть оценена из условия $t_d = t_l$.

Поэтому критическую крутизну нарастания напряжения на фронте импульса можно найти, приравнявая время t_d и t_l из формул (9) и (10). При этом с учетом формулы (5) мы получим

$$A_c = \frac{\pi j_0 r^2}{8 \epsilon_0 \epsilon l} = \frac{\beta}{\epsilon_0 \epsilon} \sqrt{\frac{\lambda}{\kappa_0}}, \quad (11)$$

где $\beta = \frac{\pi^2 r^2}{16 h l}$ — геометрический фактор. Таким образом, в рамках принятой нами модели крутизна A_c не зависит от скоростей развития разряда в твердом и жидком диэлектриках, а зависит от диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика, теплофизических свойств электродов, геометрии контакта и расстояния между катодом и анодом. Для оценки величины A_c примем $l = 1$ см. Тогда для медного катода при $\epsilon = 2 \div 10$, а $r = (1 \div 3) \cdot 10^{-5}$ см величина $A_c = 10^{10} \div 10^{11}$ V/s, что соответствует величинам, измеренным в [2].

В заключение сделаем еще одно замечание. Хотя мы рассматривали процессы на катоде, но такие же микровзрывы могут иметь место и на аноде. Там так же будет происходить разряд в жидкости по поверхности твердого диэлектрика, протекать ток смещения за счет динамической емкости и создаваться большая концентрация энергии в микровыступе на поверхности металла. Вследствие этого будет происходить взрыв этого микровыступа с образованием тонкой струи плазмы. Она будет внедряться в твердый диэлектрик и инициировать разряд в нем со стороны анода. С другой стороны, плазма поверхностного разряда в жидкости с анода будет распространяться к катоду, стремясь замкнуть электроды. Таким образом, оба потока плазмы разряда по поверхности диэлектрика ускоряют процесс замыкания катодного и анодного штырей. Это наблюдалось визуально при исследовании „эффекта Воробьевых“ [2].

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-08240-офи_а.

Список литературы

- [1] *Воробьев А.А., Воробьев Г.А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высш. школа, 1966. 224 с.
- [2] *Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И.* Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука, 1995. 276 с.
- [3] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. В. 2. С. 88–90.
- [4] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [5] *Месяц Г.А.* // Докл. РАН. 1994. Т. 336. № 5. С. 610–612.
- [6] *Ушаков В.Я.* Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во ТГУ, 1975. 256 с.
- [7] *Говорков В.А.* Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 488 с.