

03;04

Оценка энергии электрического пробоя воздушного промежутка между поверхностью электролита и металлическим противоэлектродом

© А.М. Орлов, И.О. Явтушенко, М.В. Чурилов

Ульяновский государственный университет
E-mail: OrlovAM@ulsu.ru

Поступило в Редакцию 16 февраля 2010 г.

Рассмотрено влияние индуцированного заряда (локализованного на поверхности медного образца) на формирование выступа (конуса Тейлора) индуцирующей водной поверхности. При $U \leq 12 \text{ kV}$ на водной поверхности формируется выступ, высота подъема которого в диапазоне допробойных напряжений ($U < U_p$) ограничивается напряженностью электрического поля. При $U > U_p$ рост выступа пресекается электрическим разрядом, вынуждающим колебаться жидкость в широком диапазоне U с практически постоянной частотой $f = f_0 n$, резонансно сменяемой при фиксированных U . По испарению жидкости проведена количественная оценка энергии ($27.8 \cdot 10^{-3} \text{ J}$) и тока (64.9 A) единичного разряда, определена электрическая емкость системы ($7.6 \cdot 10^{-10} \text{ F}$), представленной водной поверхностью и нависающим медным электродом. Дополнительное подключение емкости ($100 \mu\text{F}$) к электроду с наведенным зарядом более чем на порядок увеличивает эти параметры.

Взаимодействие электрического поля с водной поверхностью представляет большой практический [1–5] и теоретический [6–8] интерес в связи с разнообразием явлений [9–11], фиксируемых при этом. Повышенное внимание при этом уделяется физике электрического пробоя над жидкой поверхностью. Однако электрогидродинамические колебательные эффекты, провоцируемые индуцированным зарядом, как и энергетические параметры искры, формируемой индуцированным зарядом, остаются практически не изученными.

Объектом исследований служил 1%-ный водный раствор серной кислоты. Источником напряжения U являлась конденсаторная батарея

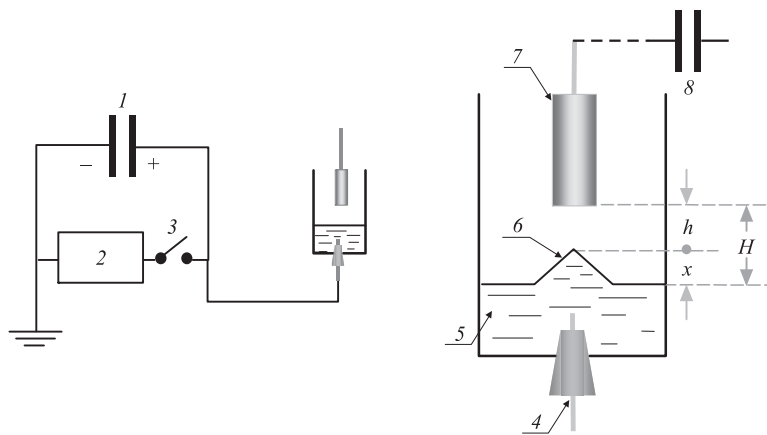


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки, используемой при исследовании низкочастотных колебаний выступов водной поверхности в электростатическом поле: 1 — батарея конденсаторов, 2 — зарядное устройство, 3 — выключатель, 4 — медный электрод в резиновой пробке, 5 — водный раствор, 6 — выступ, сформированный в электростатическом поле на водной поверхности, 7 — медный цилиндр со штоком, 8 — конденсатор $100\ \mu\text{F}$, $3\ \text{kV}$.

общей емкостью $4\ \mu\text{F}$ (в дальнейшем — конденсатор). Зарядное устройство позволяло снимать с конденсатора любое напряжение в пределах $100\text{--}12\ 000\ \text{V}$.

Электрическая схема и общий вид установки представлены на рис. 1. Опыты проводились в стеклянной емкости с внутренним диаметром $\varnothing 63$ и высотой $115\ \text{mm}$. В днище емкости по центру просверливалось отверстие $\varnothing 12\ \text{mm}$. Положительный полюс конденсатора соединялся с запрессованным в резиновую пробку медным электродом $\varnothing 2\ \text{mm}$, который возвышался над торцом резиновой пробки на $5 \pm 0.5\ \text{mm}$. Пробка с электродом герметично фиксировалась в отверстии стеклянной емкости. Отрицательный полюс конденсатора заземлялся. Емкость заполнялась электролитом ($\sim 62\ \text{cm}^3$). Над раствором вертикально размещался не заземленный медный цилиндр $\varnothing 7.8$ и высотой $25\ \text{mm}$, совмещенный резьбовым соединением с 200-mm Cu-штоком $\varnothing 2\ \text{mm}$. Шток жестко фиксировался в текстолитовом изоляторе. При подаче положительного потенциала $U \geq (3\text{--}4) \cdot 10^3\ \text{V}$ от заряженного конденсатора к нижнему

электроду на свободной водной поверхности под нависающим медным цилиндром начинал расти водяной выступ конической формы. При подъеме выступа на определенную высоту $x(U, H)$ из его вершины происходило истечение мелкодисперсных заряженных капелек, завершающееся искровым разрядом между нависающим торцом медного цилиндра и вершиной конуса. Пробой приводил к быстрому проседанию выступа и появлению на водной поверхности бегущей от центра волны. Угол при вершине конуса в предпробойном состоянии приблизительно соответствовал углу Тейлора $98-99^\circ$ [12]. Сразу после провала выступ начинал расти вновь. Спровоцированный разрядом колебательный процесс мог продолжаться сколько угодно долго. Частота колебаний при этом оставалась практически неизменной¹ в диапазоне нескольких сотен и даже тысяч² вольт (рис. 2). Переход к другому более высокому диапазону напряжений сопровождался резонансным переходом к иной частоте $f = f_0 n$, где $n = 1, 2, \dots$ — номера площадок, а f_0 — частота колебания выступа первой площадки. Подобные изменения свидетельствуют о резонансном характере смены частот, которая происходила при строго фиксированных потенциалах и зависела лишь от истинных значений H .

Каждый разряд регистрировался через антенну на цифровом запоминающем осциллографе. По числу одиночных или сгруппированных разрядных импульсов (за контролируемый промежуток времени) определяли частоту f колебаний выступов.

Величина потенциала радикально влияет на глубину проседания выступа после пробоя. При малых напряжениях (до 4 kV) выступы после каждого искрового разряда успевают совершить несколько быстро затухающих колебаний, число которых сокращается с увеличением U . При потенциалах первых площадок ($f \approx 2.7$ Hz) вспученная область после каждого пробоя почти не погружается ниже уровня электролита и вынужденная частота колебаний жидкости в точности соответствует частоте спаренных (реже одиночных) искровых разрядов. При потенциалах следующих площадок глубина проседания выступов после разряда уменьшается: она оказывается тем меньше, чем больше U .

¹ В пределах площадки f монотонно возрастала с ростом потенциала не более чем на 5–6%.

² Если к штоку медного цилиндра последовательно подключить конденсатор большой емкости.

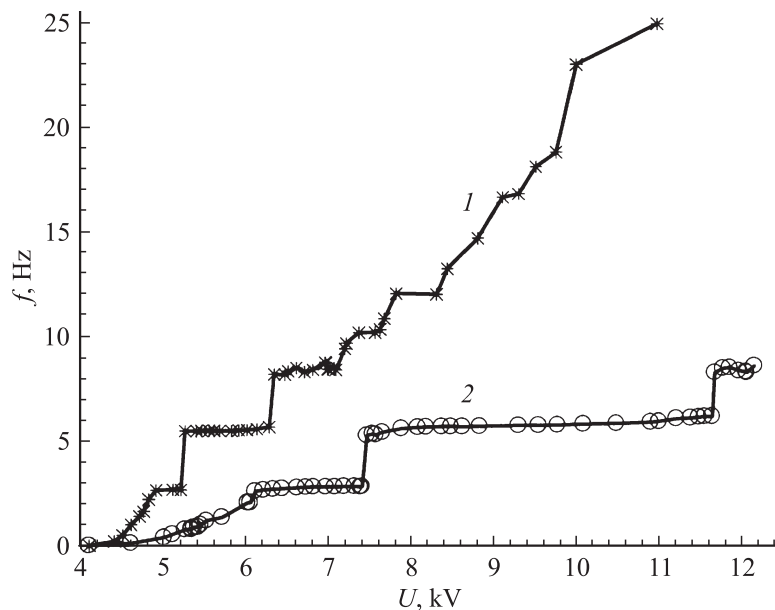


Рис. 2. Резонансный характер колебания выступа в электрическом поле индуцированного заряда: 1 — верхний электрод со штоком ($H = 3.13$ mm); 2 — к штоку медного цилиндра подключен конденсатор емкостью $100 \mu\text{F}$, 3 kV ($H = 3.13$ mm).

О характере изменения U и индуцированного заряда на медном электроде мы судили по осциллограммам, отражающим изменение потенциала во времени (измеренного относительно земли), и показанию электрометра. Установлено, что перераспределение индуцированного заряда (как и потенциала) после каждого разряда завершается через $7\text{--}14$ ms, что на $1\text{--}2$ порядка меньше периода колебания выступов при потенциалах первых трех площадок. При этом в заряженном состоянии потенциал медного электрода практически соответствует потенциалу Земли, а стрелка электрометра остается неподвижной. В момент пробоя напряжение на медном электроде мгновенно ($\leq 10^{-7}$ s) вырастает до напряжения зарядки конденсатора, непрерывно подпитываемого зарядным устройством. Электрометр при этом регистрирует появление значитель-

ного заряда, быстро спадающего при малых U практически до нуля³. Таким образом, пробивное напряжение между водной поверхностью и торцом цилиндра с индуцированным зарядом в первом приближении можно считать соответствующим напряжению зарядки конденсатора.

Очевидно, частота электрического пробоя, обеспечивающая вынужденные колебания, синхронизирована не только со скоростью поднятия и опускания выступа в электрическом поле, но и с собственной частотой его колебания в матричной жидкости. Действительно, значение разрядного потенциала U_p согласовано с высотой поднятия выступа x (рис. 1) очевидным уравнением

$$x = H - \frac{U_p}{E_{ph}}, \quad (1)$$

разрядный промежуток h_p в котором представлен отношением потенциала к пробивной напряженности электрического поля E_{ph} . Тогда масса выступа m , определяющая частоту собственных колебаний $f_0 = (k/m)^{0.5}$, может быть представлена через его объем и связанные с ним геометрические параметры как:

$$m = \frac{1}{3} \pi \rho \left(H - \frac{U}{E_{ph}} \right)^3 \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (2)$$

где $k \approx 0.000024 \text{ kg/s}^2$ — постоянная, связанная с вязким сопротивлением жидкости, ρ — плотность раствора, $2\alpha = 98.6^\circ$ — угол при вершине выступа, называемый углом Тейлора [8,12]. Так что

$$f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{3k}{\pi \rho \left(H - \frac{U}{E_{ph}} \right)^3 \operatorname{tg}^2 \alpha}}. \quad (3)$$

Видно (рис. 3), что при пробое f_0 определяется только шириной исходного воздушного зазора H и потенциалом U . При этом все зависимости $f_0(U)$ отчетливо представлены протяженными зонами с монотонно меняющимися частотами собственных колебаний и областей резкого всплеска f_0 в очень узком интервале напряжений. Сопоставляя этот результат с экспериментом, можно полагать, что фиксируемые

³ Численное значение избыточного положительного заряда возрастает с увеличением U .

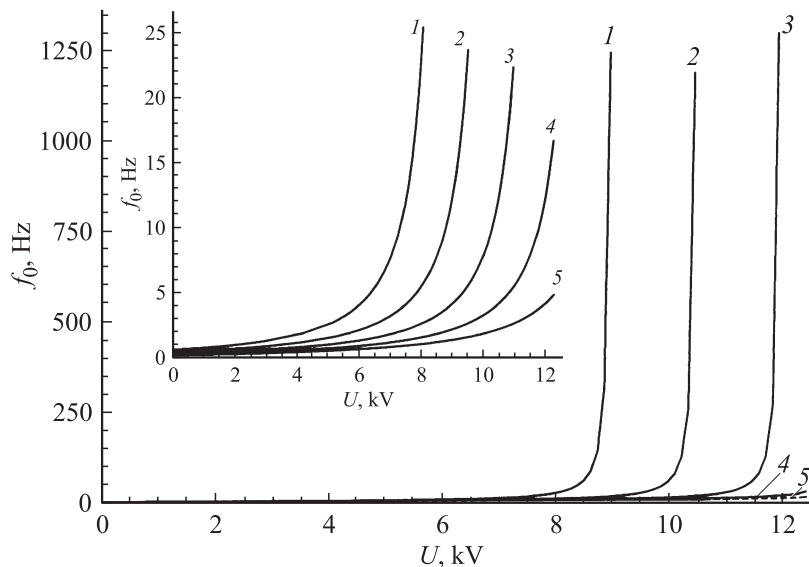


Рис. 3. Собственная частота колебания выступа: 1 — $H = 3$ mm; 2 — 3.5 mm; 3 — 4 mm; 4 — 4.5 mm; 5 — 5 mm. На вставке начальный участок этих же кривых.

плато на кривых рис. 2 могут проявляться только в том интервале напряжений, которые ограничены монотонным изменением f_0 (рис. 3). Следовательно, колебания выступов в этом интервале напряжений (плато на кривых) находятся под контролем собственных частот колебаний с энергетически обоснованными резонансными переходами.

Последовательное подключение емкости ($100 \mu\text{F}$, 3 kV) к штоку нависающего электрода не меняет качественной картины электрического разряда, но растягивает кривые относительно неизменного для данного H стартового потенциала возбуждения плазмы вдоль оси ординат (сравни 1 и 2, рис. 2).

В результате уверенно фиксируются не только начальные плавно возрастающие участки кривых, контролируемых вынужденными колебаниями выступа (искровым разрядом), но из-за общего удлинения вся ступенчатая кривая смещается в область более высоких напряжений,

ограничиваясь незавершенным построением третьей площадки. Причина такого смещения связана с избыточным положительным зарядом, появляющимся на медном электроде после каждого пробоя. Создаваемая этим зарядом напряженность электрического поля направлена против основных силовых линий, образующих индуцированный заряд. С увеличением напряжения на зарядном устройстве возрастает и величина избыточного заряда⁴. В результате падение напряжения в интересующем нас межэлектродном пространстве снижается, а все процессы, связанные с этим напряжением, смещаются вдоль оси абсцисс тем больше, чем выше потенциал на конденсаторной батарее. Следовательно, в рассматриваемом варианте с конденсатором падение напряжения в межэлектродном газовом пространстве нельзя идентифицировать с напряжением на конденсаторной батарее. Более того, становится очевидным и заметное влияние избыточного положительного заряда на протяженность площадок $f(U)$ кривых (рис. 2).

Каждый искровой разряд несет в себе энергию, накопленную за определенный период индуцированным зарядом. Эта энергия, наряду с током единичного разряда и электрической емкостью, может быть определена по массе испарившейся воды в процессе электрического пробоя. Для ее оценки мы воспользовались высокой чувствительностью резонансного перехода колебания выступа к ширине исходного межэлектродного пространства H , численное значение которого рассчитывалось по потенциалу первого (\sim с 3 до 6 Hz) или второго (\sim с 6 до 9 Hz) резонансного перехода ($U, \text{kV}, H, \text{mm}$):

$$U_{3 \rightarrow 6} = 2.09289 \cdot H - 1.40742; \quad U_{6 \rightarrow 9} = 2.62572 \cdot H - 1.75588.$$

Сущность опыта заключалась в следующем. После предварительной установки H определялось напряжение 1-го или 2-го резонансного перехода с последующим снижением напряжения до середины соответствующей площадки, где обеспечивалась постоянная частота разряда в широком диапазоне напряжений. В режиме постоянного напряжения U_p , с периодическим контролем числа разрядных импульсов n_i в каждом периоде, система выдерживалась τ_{U_p} порядка 40 min, после чего вновь устанавливалось контрольное напряжение резонансного перехода. Из-за

⁴ При подключенном конденсаторе электрометр всегда фиксирует присутствие избыточного заряда.

испарения воды резонансный переход смещался в область более высоких U . Однако добавлением определенного количества капель n_{U_p} точно известной массы m_d мы добивались восстановления исходного уровня ($\pm 5 \mu\text{m}$), что отчетливо фиксировалось по восстановленным параметрам частоты резонансного перехода. Для оценки естественно испарившейся жидкости определялась скорость испарения воды при $U = 0$. Это число капель обозначим n_0 , а соответствующее им время как τ_0 . Так что общее количество корректирующих капель n_d , связанных лишь с пробоем, оценивалось нами по очевидной разнице

$$n_d = (n_{U_p} - n_0) \frac{\tau_{U_p}}{\tau_0}. \quad (4)$$

Энергия одного импульсного разряда ε_i , замыкающегося на воде, затрачивалась на нагрев и испарение воды. Ее оценка осуществлялась по испарившейся массе за некоторый временной интервал непрерывного электрического воздействия ($U > U_p$). О количественной оценке разрядных импульсов Σn_i судили по частоте колебания выступа f и числу разрядных импульсов n_i в одном пакете (в одном периоде колебания): $\Sigma n_i = f \tau_{U_p} n_i$. Так, что

$$\varepsilon_i = \frac{m_d n_d (\lambda + c \Delta T)}{\tau_{U_p} f n_i}, \quad (5)$$

где m_d — масса одной корректирующей капли; c — удельная теплоемкость, λ — удельная теплота парообразования, $\Delta T = T_r - 373 \text{ K}$ — изменение температуры жидкости относительно комнатной температуры T_r в точке локализации разрядного импульса.

Подстановка данных для энергии одного импульсного разряда дает $\varepsilon_i \approx 0.0278 \text{ J}$. Это значение было использовано для приближенной оценки остальных заявленных параметров. При этом накопленную перед пробоем⁵ энергию индуцированного заряда ε_i , затраченную при разряде на нагрев и испарение потерянной массы воды, мы идентифицировали

⁵ Как показывают проведенные нами осциллографические исследования, при первичном пробое в пределах одного периода колебания выступа сбрасывается весь индуцированный заряд (как и накопленная энергия $W = \varepsilon_i$). При этом продолжающийся инерционный подъем выступа сопровождается подзарядкой металлического электрода, часто приводящей к очередному пробоем в наивысшей точке подъема выступа в пределах этого же периода колебания (если $n_i > 1$).

Параметры искрового разряда над выступом водной поверхности

Электрод с индуцированным зарядом	H , mm	U , kV	Параметры единичного (импульсного) искрового разряда			Среднее значение разрядного тока $I \approx q_i n_i f$, А	Электрическая емкость системы H_2O-Cu , F
			Энергия ε_i , J	Переносимый заряд $q_i = \frac{2\varepsilon_i}{U}$, C	Разрядный ток I_i , А		
Без дополнительной емкости	3.662	8.56	0.0278	$6.49 \cdot 10^{-6}$	64.9	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-10}$
С емкостью $C = 100 \mu F$, 3 kV	4.07	12.686	0.5522	$9.15 \cdot 10^{-5}$	915.0	$2.494 \cdot 10^{-4}$	$7.581 \cdot 10^{-9}$

с энергией плоского конденсатора W . Результаты расчетов сведены в таблицу.

Последовательное подключение емкости ($100 \mu F$) значительно повышает как энергию единичного разряда, так и других анализируемых параметров.

При расчете I_i длительность разрядного импульса τ_i принималась равной 10^{-7} s. По осциллографической оценке $\tau_i \leq 10^{-7}$ s. К сожалению, нами не найдено информации относительно единичного искрового разряда, инициированного индуцированным зарядом, в том числе над водной поверхностью. Поэтому представленная нами информация не может быть сопоставлена с независимыми данными других авторов.

Список литературы

- [1] Погребняк А.Д., Кульментьева О.П., Кобзев А.П. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 8. С. 8–15.
- [2] Francois M., Shyu W. // Progr. Aerospace Sci. 2002. V. 38. N 4–5. P. 275–304.
- [3] Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S. // Int. J. Thermophys. 2003. V. 24. N 4. P. 1121–1136.
- [4] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.: Машгиз, 1995. 356 с.
- [5] Тесленко В.С., Санкин Г.Н., Дрожжин А.П. // Динамика сплошной среды. 2005. В. 123. С. 66–70.

- [6] *Шутов А.А.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 12. С. 15–22.
- [7] *Григорьев А.И., Ширяева С.О., Белоножко Д.Ф., Климов А.В.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 2. С. 19–27.
- [8] *Петрин А.Б.* // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. В. 6 (12). С. 1409–1414.
- [9] *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Санкин Г.Н.* // ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 4. С. 24–31.
- [10] *Орлов А.М., Явтушенко И.О., Журавлева А.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 2. С. 60–65.
- [11] *Емелин С.Е., Пирозерский А.Л., Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д., Бычков В.Л.* // Сб. докл. 9-й Российской конф. по холодной трансмутации ядер химических элементов. М., 2002. С. 240–248.
- [12] *Taylor G.I.* // Proc. Roy. Soc. London. 1964. A 280. P. 383–397.