

# Трансформация конуса Тейлора в усеченный при разрядах на вязких жидких диэлектриках

© А.М. Орлов, И.О. Явтушенко, О.Г. Рыикова

Ульяновский государственный университет,  
432000 Ульяновск, Россия  
e-mail: am-orlov@mail.ru, yavigor@mail.ru

(Поступило в Редакцию 8 декабря 2016 г.)

Исследованы особенности поведения вязких электролитов на примере глицерина при искровых разрядах, реализуемых при прямом подключении электродов и в режиме индуцированного заряда. Впервые при циклических разрядах в межэлектродном пространстве, локализованном между анодно-поляризуемым вязким жидким диэлектриком (глицерином) и нависающим катодно-поляризуемым металлическим электродом, зафиксирована трансформация конуса Тейлора в усеченный конус, стабильное существование которого определяется длительностью поляризации. Установлены критерии возникновения усеченного конуса: высокая динамическая вязкость и электрическая прочность раствора, низкая электропроводность.

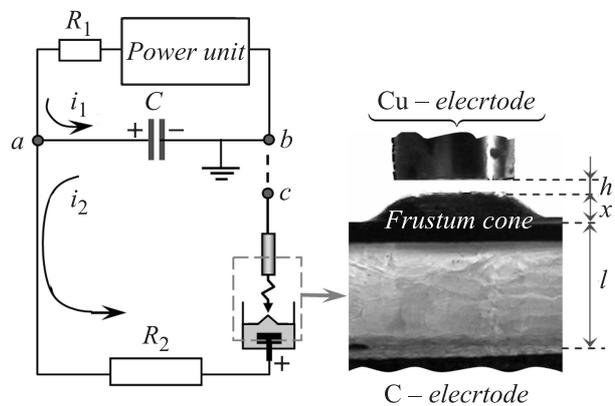
DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44688.2129

Природа циклических колебаний жидкости в электрическом поле давно находится под пристальным вниманием исследователей [1,2]. Особый интерес при этом представляют вязкие растворы, к числу которых относятся глицерин, различные виды масел, многокомпонентные магнитные жидкости и т.д. Так, активно исследуется трансформация в электрическом поле свойств вязких диэлектрических жидкостей, используемых в силовой технике или в качестве базовых составляющих композиционных магнитных жидкостей [3]. Ответная реакция подобных жидкостей на сильные электрические поля, ограниченные пробивным напряжением [4], радикально отличается от проводящих, в том числе водных, растворов [5,6], обеспечивающих иное проявление тех же самых электрогидродинамических эффектов. Поэтому в работе уделено повышенное внимание отличительным особенностям эффектов, реализуемых при циклических разрядах на жидкостях, принципиально различающихся вязкостью и электропроводностью.

Объектами исследований служили растворы глицерина марки ЧДА и водный раствор  $H_2SO_4$  (1 wt.%). Опыты проводились в стеклянной ячейке с внутренним диаметром  $\sim 63$  мм. Токоподвод к жидкому электроду осуществлялся через графитовый стержень  $\varnothing 6$  мм с навинченным графитовым цилиндром  $\varnothing 20$  мм. Вспомогательным (нависающим) электродом служил 2 см медный цилиндр  $\varnothing 7.8$  мм с впаянным Cu штоком ( $\varnothing 2$  мм и  $l = 200$  мм). Источником напряжения  $U$  являлась батарея конденсаторов общей емкостью  $C = 0.0167 \mu F$ . Зарядное устройство позволяло снимать с конденсатора напряжение в пределах 0.1–20 кВ. Электрическая схема используемой установки представлена на рис. 1. Она позволяла формировать часто сменяющие друг друга искровые разряды не только в режиме прямого подключения обоих электродов ячейки к питающему конденсатору (участок  $bc$  короткозамкнут), но и в режиме формирования индуцированных зарядов (электрическая цепь на участке  $bc$  разомкнута).

## Прямое подключение электродов

В электрическом поле большой напряженности  $E$  жидкий электрод всегда вытягивается к противозлектроду, приобретая конфигурацию конуса Тейлора. При достижении предельных значений  $E$  происходит электрический пробой межэлектродного газового промежутка с локализацией искрового разряда на вершине растущего конуса. Однако последствия этого пробоя, несмотря на идентичность установочных параметров, оказываются различными для вязких жидких диэлектриков и проводящих водных растворов. Так, искровой разряд над конусом проводящего раствора (1 wt.%  $H_2SO_4$ ) для варианта прямого подключения электродов сопровождается яркой вспышкой с характерным акустическим откликом. Любой электрический разряд над такой жидкостью обеспечивает проседание конуса с последующим



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки с двумя вариантами подключения электродов. На вставке изображение усеченного конуса, формирующегося во время прямых искровых разрядов на глицерине ( $l$  — толщина слоя глицерина между электродами,  $x$  — высота поднятия конуса,  $h$  — расстояние между верхним и жидким электродами).

его подъемом в возрастающем электрическом поле межэлектродного промежутка. Частота электрических разрядов при фиксированном  $U$  неизменна, но зависит от прикладываемого потенциала, разрядной емкости, конфигурации нависающего электрода и формируемого конуса, геометрия которого определяется отличительными особенностями исследуемой жидкости. Фиксируемая здесь электрогидродинамическая неустойчивость конуса контролируется разрядным циклом, детально рассмотренным в ряде работ [7–9].

Однако и формирование конуса в допробойном состоянии не отличается монотонностью: вытягиваемый выступ постоянно пульсирует, из вершины формирующегося выступа происходит вырывание заряженных микрокапель, фиксируемых и другими авторами [10,11]. Условия возникновения на поверхности заряженного электролита этого вида электрогидродинамических неустойчивостей имеет другую природу, определяемую дисперсионным соотношением [8]:

$$\omega^2 = gk + \frac{\alpha}{\rho} k^3 - \frac{E^2}{4\pi\rho} k^2, \quad (1)$$

являющимся результатом решения уравнения движения жидкости. Здесь  $\omega$  — частота,  $k$  — волновой вектор,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность жидкости,  $E$  — напряженность внешнего электрического поля. Уравнение (1) определяет контролируемую роль гравитационного, капиллярного или электродинамического эффекта на формирование конуса. На завершающей стадии его образования, когда  $4\pi\rho g/E^2 \ll |k| \ll E^2/(4\pi\alpha)$ , напряженность электрического поля  $E$  достигает такого критического значения, при котором электростатические силы и поверхностное давление сильно возрастают [10], способствуя появлению острия. С учетом  $k = 2\pi/\lambda$  длина волны колебаний при этом ограничивается диапазоном

$$E^2/2\rho g \ll \lambda \ll 8\pi^2\alpha/E^2. \quad (2)$$

Это, в свою очередь, позволяет оценить характерные времена собственных колебаний среды между разрядами, представленные гравитационным

$$\tau_g = \sqrt{\lambda/2\pi \cdot g}, \quad (3)$$

капиллярным

$$\tau_c = \lambda\sqrt{\lambda\rho/2\pi\alpha} \quad (4)$$

и время релаксации объемного заряда [12]

$$\tau_e = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma_e, \quad (5)$$

стекающего в атмосферу через вершину возникающего конуса. Здесь  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  — электрическая и диэлектрическая постоянные,  $\sigma_e$  — проводимость. Именно с этими явлениями мы связываем пульсацию растущего выступа на этапе роста потенциала, усиленную электрическим разрядом. Характерно, что устойчивый выступ проводящего электролита пульсирует и в стационарном режиме

Параметры используемых растворов

	$\varepsilon$	$\varepsilon$ , g/cm <sup>3</sup>	$\alpha$ , N/m	$\sigma$ , S/m	$\eta$ , Pa·s
Глицерин	56	1.26	0.0657	$0.855 \cdot 10^{-4}$	1.09
Дистиллированная вода	81	1	0.0727	$4 \cdot 10^{-4}$	0.001
1% р-р H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	—	1	—	8.575	0.001

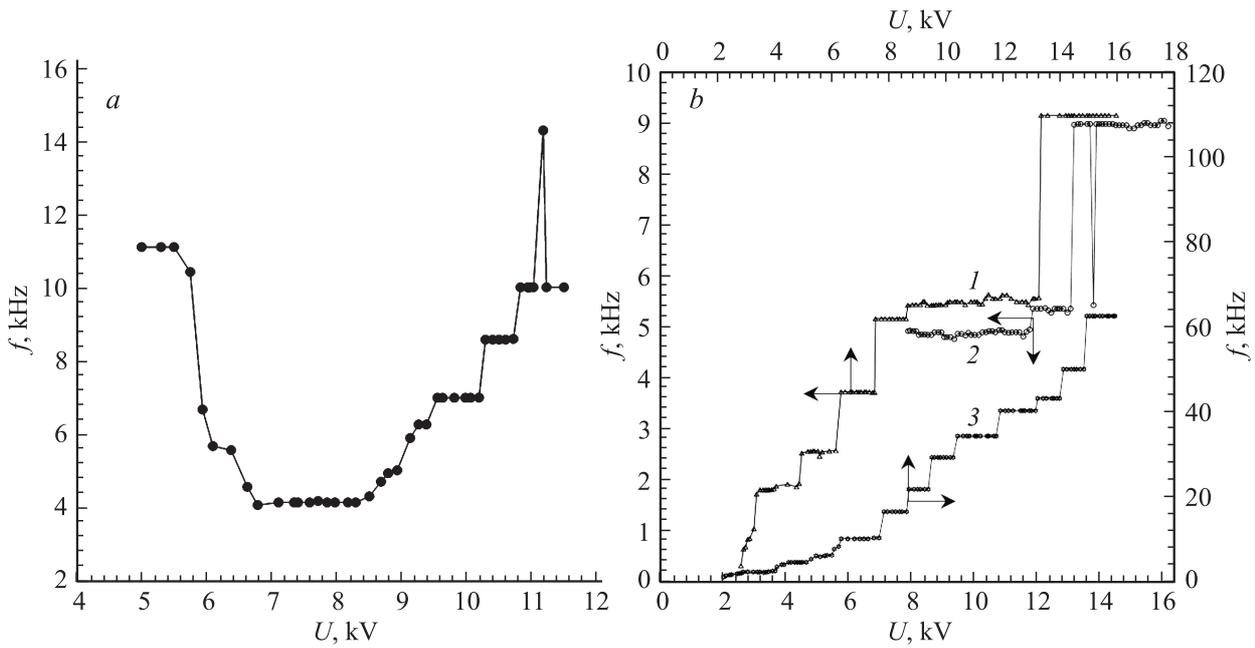
( $U = \text{const}$ ), если потенциал не достигает пробойного значения. Фиксируемый здесь результат подтверждается и расчетами. Так, для проводящего водного электролита (1 wt.% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) время релаксации  $\tau_e$  много меньше наименьшего из характерных времен собственных колебаний среды  $\tau_g$  и  $\tau_c$ , контролирующих процесс. Такой тип электролита можно отнести к приближению идеального проводника, что и определяет наблюдаемую кинетику жидкого электрода.

В противоположность водному раствору на непроводящем вязком электроде (100% глицерин) наблюдается иное соотношение  $\tau_i$ . Расчетное время релаксации заряда  $\tau_e \sim 5.8 \cdot 10^{-6}$  s (уравнение (5), таблица) при коротковолновых колебаниях  $\lambda \leq 10 \mu\text{m}$  [12] становится сопоставимым с собственным временем  $\tau_c \leq 5.2 \cdot 10^{-6}$  s, что приводит к необходимости учитывать и  $\tau_e$  наряду с гравитационной ( $\tau_g \leq 5.7 \cdot 10^{-4}$  s (4)) и капиллярной составляющими. Таким образом, колебательный процесс такой системы определяется более протяженным во времени перераспределением зарядов на поверхности электролита, что с учетом большой вязкости исследуемого раствора предопределяет кинетику поверхностных неустойчивостей в электрическом поле.

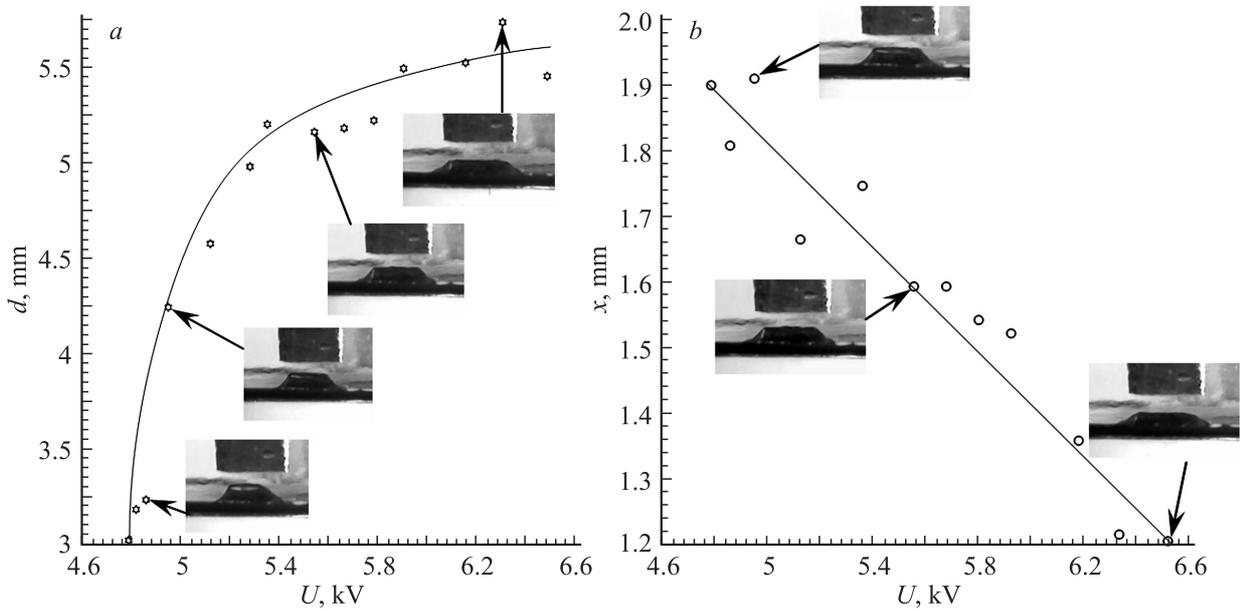
Низкая проводимость глицерина увеличивает длительность разрядного цикла и уменьшает величину сбрасываемого заряда. При каждом электрическом пробое межэлектродный потенциал снижается всего на  $\sim 10\%$  относительно разрядного напряжения ( $\sim 5$  kV). Фиксируемые при этом (рис. 2, а) высокочастотные<sup>1</sup> искровые разряды не способствуют полному проседанию конуса, а быстро, в пределах 4 ms с момента первого пробоя, преобразуют в усеченный конус путем трансформации его вершины в верхнее плато (фотоизображения на рис. 1 и 3). Старт этого преобразования сопровождается  $\sim 40\%$  проседанием выступа только в пределах первого послеразрядного цикла. Последующие многочисленные разряды, обеспечивающие стационарное существование усеченного конуса, не изменяют его геометрических параметров.

Как отмечалось выше, большое электрическое сопротивление глицерина растягивает во времени разрядный цикл, а сбрасываемый заряд к моменту гашения плазмы оказывается незначительным. Это в отличие от водного раствора в значительной степени ограничивает мощ-

<sup>1</sup> Частота колебаний сильно зависит от количества H<sub>2</sub>O, поглощенного глицерином из воздушной атмосферы. Поэтому, даже в процессе опыта с обезвоженным глицерином отчетливо фиксируется начальное снижение  $f$  по мере его насыщения парами воды (рис. 2, а).



**Рис. 2.** Частотная характеристика искровых разрядов, провоцирующих колебания выступов.  $H \approx 3$  mm. *a* — кривая  $f(U)$  для обезвоженного глицерина с прямым подключением электродов; *b* — ступенчатое изменение  $f(U)$  различных растворов: 1 — разрядные циклы в системе с водным раствором 1 wt.%  $H_2SO_4$  при прямом подключении электродов. 2, 3 — разрядные циклы на водном растворе 1 wt.%  $H_2SO_4$  и глицерине соответственно в режиме индуцированного заряда.



**Рис. 3.** Экспериментальная зависимость изменения: *a* — диаметра верхнего основания усеченного конуса  $d$  от напряжения  $U$ ; *b* — высоты усеченного конуса  $x$  от напряжения  $U$ .

ность искрового разряда на глицерине, обеспечивая тем самым незначительный сброс потенциала при каждом разряде. Подъемная сила остаточного напряжения, наряду со слабыми высокочастотными разрядами, обеспечивает устойчивое существование усеченного конуса. При этом на этапе его формирования происходит перекачка жидкости электрическим полем, обеспечивающая при

неизменной высоте увеличение его объема с соответствующим изменением размеров обоих оснований.

Проведенные нами наблюдения позволили установить еще одну особенность искрового разряда на преобразуемом конусе вязкого диэлектрика: пробивное напряжение  $U_d$  первого искрового разряда на вершине стандартного конуса Тейлора всегда оказывается значи-

тельно выше последующих  $U_d$ , реализуемых на верхнем основании быстро формирующегося усеченного конуса. При этом на усеченном конусе разряды замыкают больший межэлектродный промежуток, чем в случае первого разряда на конусе Тейлора. Причина кажущихся несоответствий была вскрыта с помощью скоростной видеосъемки [7], позволившей установить длительное ( $\sim 6.5$  ms) существование ионизированной плазмы над жидким электродом после каждого искрового разряда. В результате пробивная напряженность электрического поля межэлектродного зазора при высокочастотных разрядах оказывается существенно заниженной.

Конечный диаметр верхнего основания  $d$ , устанавливающийся после серии разрядных циклов на растущем плато, зависит от прикладываемого потенциала и с его увеличением стремится к торцевому размеру нависающего электрода  $D$ , повторяя его геометрию (рис. 3, *a*). При этом высота усеченного конуса<sup>2</sup>  $x$ , удерживаемого электрическим полем, уменьшается с увеличением напряжения (рис. 3, *b*), но остается неизменной при конкретных  $U$ , согласуясь с очевидным соотношением  $E_d = U_d/h$ . Формирование усеченного конуса происходит и на вязких глицериновых растворах разбавленных (до 92 wt.%) дистиллированной водой. Электропроводность  $\sigma$  таких растворов остается низкой, не превышающей значения  $(0.855-1) \cdot 10^{-4}$  S/m. Однако устойчивое состояние усеченного конуса на таких растворах нарушается электрическим пробоем жидкого слоя диэлектрика толщиной  $l$  (рис. 1), способствующим более интенсивному снижению потенциала, быстрому вытягиванию конуса вплоть до контакта с нависающим электродом, обеспечивающим надежное сцепление вытягиваемого фрагмента с поверхностью металлического электрода. Из-за снижения электрической прочности разбавленных глицериновых растворов усеченные конусы могут быть получены лишь на достаточно протяженных  $l$  (рис. 1), исключая их электрический пробой.

Если усеченный конус остается стабильным на протяжении всего этапа высоковольтной обработки, то отключение конденсатора от блока питания способствует быстрому его вытягиванию вплоть до прилипания к нависающему верхнему электроду. Этот рост при снижающемся разрядном потенциале сопровождается серией ослабевающих искровых разрядов, происходящих до момента физического контакта поднимаемой жидкости с нависающим электродом.

Однако совершенно иной результат получается при разбавлении глицерина проводящим водным раствором (1 wt.%  $H_2SO_4$ ), который слабо влияет на динамическую вязкость, но на порядок увеличивает его проводимость, сокращая тем самым время разрядки конденсатора и увеличивая разрядный ток. Такой раствор восстанавливает стандартную конфигурацию конуса при всех после-

<sup>2</sup>  $x = H - h$ , где  $H$  — воздушный зазор между электродами перед поляризацией;  $h$  — воздушный зазор между вершиной конуса (или верхним основанием усеченного конуса) и нависающим металлическим электродом.

дующих колебаниях, частота которых резко снижается по отношению к подобным глицериновым растворам сопоставимых концентраций, но разбавленных дистиллированной водой. При этом для всех исследуемых жидкостей проявляется ступенчатая зависимость частоты разрядов от напряжения (рис. 2, *a* и *b*, кривая 1).

Следовательно, для формирования усеченного конуса необходимо обеспечить три условия: высокую динамическую вязкость раствора, низкую его электропроводность и диэлектрическую прочность при исследуемых напряжениях. Только сочетание этих факторов делает возможным стабильное существование усеченного конуса при плазменных разрядах на его верхнем основании.

## Система с индуцированным зарядом

Электрический пробой воздушного зазора в системе с индуцированным зарядом (второй вариант подключения электродов) независимо от природы жидкого электрода дает несколько иной результат, характеризующийся наличием очень слабой, практически не видимой, искры и еле слышным акустическим откликом. Каждый электрический разряд при этом всегда замыкается на заостренной вершине водного или глицеринового выступа и практически всегда сопровождается полным его проседанием. Трансформации стандартного конуса Тейлора в усеченный конус, всегда фиксируемый на глицерине и его высокоомных растворах при прямом подключении электродов, здесь не происходит из-за особенностей зарядно-разрядных циклов в системе с индуцированным зарядом (рис. 2, *b*, кривые 2 и 3). По этой же причине в этой системе отсутствует и зависимость частотной характеристики от насыщения парами воды.

Таким образом, в рамках электрогидродинамических эффектов впервые обнаружена трансформация конуса Тейлора в усеченный. Необходимыми условиями этой трансформации являются прямое подключение электродов, высокая вязкость раствора, слабая его электропроводность и достаточная диэлектрическая прочность, препятствующая электрическому пробоем жидкости при исследуемых напряжениях.

## Список литературы

- [1] Parkansky N., Alterkop B., Boxman R.L., Goldsmith S., Barkay Z., Lereah Y. // Powder Technol. 2005. Vol. 150. N 1. P. 36–41.
- [2] Григорьев А.И., Ширяева С.О. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 6. С. 44–50.
- [3] Dikansky Yu.I., Veguera J.G., Suzdalev V.N., Smerek Yu.L. // Magnetohydrodynamics. 2002. Vol. 38. N 3. P. 281–285.
- [4] Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы / Учебник для вузов. 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. 65 с.
- [5] Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 24–30.

- [6] *Кибеля И.А., Кочин Н.Е., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. М.: Рипол Классик, 2013. 590 с.
- [7] *Орлов А.М., Явтушенко И.О., Рыикова О.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 5. С. 26–34.
- [8] Автореф. канд. дис. Зубарева Н.М. Формирование особенностей на свободной поверхности жидкостей в электрическом поле. Екатеринбург: Уральское отделение Института электрофизики, 2002. 208 с.
- [9] *Сихарулидзе Г.Г.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 11. С. 82–87.
- [10] *Григорьев А.И.* // СОЖ. 2000. № 6. С. 37–43.
- [11] *Гасанов И.С., Гурбанов И.И.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 12. С. 42–47.
- [12] *Жакин А.И.* // УФН. 2013. Т. 83. № 2. С. 153–177.