

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. М. Коробейников, А. В. Мелехов, К. Б. Ганенко, Поведение пузырьков в перфтортриэтилаmine под действием сильных электрических полей, *ТВТ*, 2001, том 39, выпуск 6, 885–889

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.91

25 марта 2025 г., 21:01:48



УДК 537.528

ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВ В ПЕРФТОРТРИЭТИЛАМИНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

© 2001 г. С. М. Коробейников*, А. В. Мелехов**, К. Б. Ганенко **

*Новосибирский государственный технический университет

**Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 05.01.2001 г.

С помощью импульсно-нагреваемого проволочного электрода проведены исследования образования и поведения долгоживущих микропузырьков размером 50–100 мкм в перфтортриэтилаmine. Оптические исследования поведения пузырьков в сильном импульсном электрическом поле напряженностью до 800 кВ/см показали, что пузырьки вытягиваются в направлении поля, сжимаются в поперечном направлении, отрываются от электрода. При движении оторвавшиеся пузырьки, как правило, сплющиваются.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования поведения пузырьков в сильном электрическом поле имеют как фундаментальное значение с целью для выяснения механизма импульсного электрического пробоя жидкостей, так и практическое – применительно к разработке электрофизических и электроэнергетических устройств, содержащих жидкие диэлектрики. Ранее экспериментально изучалось поведение пузырьков в воде при импульсном воздействии напряжения [1, 2]. Импульсное электрическое поле напряженностью до 300 кВ/см приводило к удлинению пузырька в направлении поля и сжатию в поперечном направлении, возникновению неустойчивости, перетяжек, отрыву и движению со скоростями до 10 м/с. Зарегистрирован “эффект полярности” в поведении анодных и катодных пузырьков. Большая часть этих особенностей объясняется возникновением частичных разрядов в пузырьках.

Однако в пузырьках, находящихся в неполярных жидкостях, образование частичных разрядов затруднено и можно ожидать, что их поведение будет существенно иным. В данной работе такое исследование было выполнено на перфтортриэтилаmine, относящемся к классу неполярных фторорганических соединений.

Характеристики перфтортриэтиламина

Высокие электрофизические характеристики фторированных углеводородов важны для их применений. Замена атома водорода на атом фтора приводит как к новым свойствам, так и к новым возможностям их использования. Перечислим общие свойства перфторуглеродов: негорючесть; высокая термическая стойкость и химическая стабильность; инертность по отношению к

металлам, твердым диэлектрикам и резинам; нетоксичность, бесцветность и отсутствие запаха; низкое водопоглощение и высокая растворимость газов; слабая растворимость нефторорганических материалов; высокий температурный коэффициент объемного расширения.

Перфтортриэтиламин $N(C_2F_5)_3$ (триспентафтортриэтиламин) – это прозрачная бесцветная жидкость с относительной молекулярной массой 371.049. Ее температура кипения 70.35°C, температура плавления перфтортриэтиламина 145°C, критическая температура 196.25°C, критическое давление 1.81 МПа, критическая плотность 730 кг/м³; плотность жидкости и пара в точке равновесия при 27°C соответственно 1730 кг/м³ и 2.18 кг/м³, давление пара 0.01432 МПа; поверхностное натяжение 11.9 мН/м, теплота фазового перехода 88 кДж/кг. Из электрофизических характеристик отметим диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 1.9$, возможность очистки до низких значений электропроводности $\sigma \sim 10^{-16}$ См/см, возможность получения высокой электрической прочности при постоянном напряжении $E \sim 600$ кВ/см [3].

Получение пузырьков

Методика получения пузырьков и проведения экспериментов аналогична описанной в [1, 2]. Пузырьки на поверхности проволочного электрода диаметром 200 мкм создавались за счет импульсного нагрева протекающим током. Получать пузырьки в перфтортриэтилаmine оказалось проще, чем в воде, так как и точка кипения ниже, и, самое главное, теплота парообразования примерно на порядок ниже, чем у воды. Действительно, токовый порог образования пузырьков в перфтортриэтилаmine примерно в 3 раза ниже, чем в воде, что видно из рис.1. При этом в чистой жид-

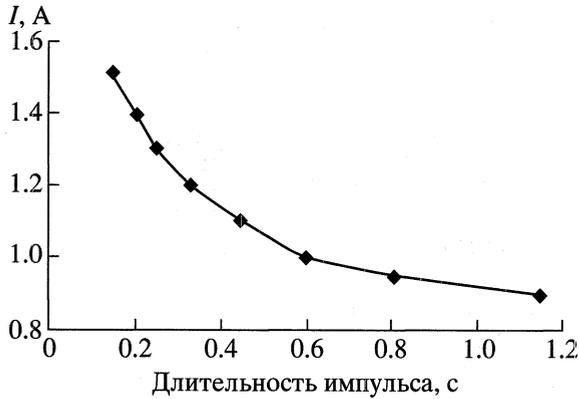


Рис. 1. Появление первых пузырьков размером 50–80 мкм в перфтортриэтиламине в зависимости от амплитуды и длительности импульса тока.

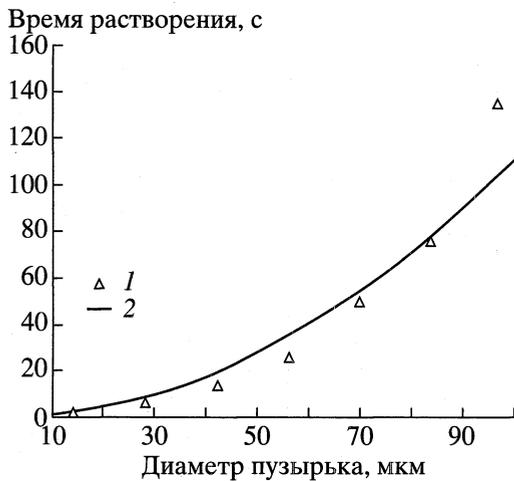


Рис. 2. Время растворения пузырьков в зависимости от их размера и вплоть до их исчезновения: 1 – экспериментальные точки, 2 – расчет по (1).

кости пузырьки быстро (менее чем за 1 с) исчезают. Причина этого достаточно очевидна: растворимость воздуха в перфтортриэтиламине значительно превышает растворимость воздуха в воде. Например, растворимость азота при 0°C составляет $3.65 \text{ г л}^{-1} \text{ Мпа}^{-1}$ [4] или в других единицах $C_s \approx 0.3 \text{ см}^3/\text{см}^3$, что в 15 раз превышает растворимость в воде $C_s \approx 10^{-2} \text{ см}^3/\text{см}^3$. Это означает, что при одинаковой степени насыщения воздухом неравновесный пузырек в перфтортриэтиламине будет растворяться в 15 раз быстрее. Растворимость второго основного компонента воздуха – кислорода в перфтортриэтиламине в полтора раза выше, чем растворимость азота [4].

Для того чтобы время жизни пузырька было достаточно большим, необходимо ввести в жидкость воздух в количестве, близком к состоянию насыщения. С этой целью в ячейке с перфтортриэтиламином создавалось небольшое избыточное

давление воздуха, которое по мере растворения воздуха периодически восстанавливалось. Образование устойчивых пузырьков осложнялось еще другими обстоятельствами. Жидкость идеально смачивала электрод, следовательно, сила, удерживающая пузырек на его поверхности и препятствующая его всплытию, практически отсутствовала. Кроме того, выталкивающая сила (сила Архимеда) была почти в 2 раза больше, чем в воде, из-за высокой плотности жидкости. Поэтому пузырьки со временем жизни более 10 с удалось получить лишь после дополнительной обработки электрода, которая была проведена с целью придания поверхности электрода шероховатости. При этом образовывался только один пузырек, причем в области максимального поля.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по времени растворения парогазовых пузырьков различного размера. Видно, что время жизни значительно меньше, чем в воде, и для пузырька диаметром 70 мкм составляет менее 1 мин. Экспериментальные данные аппроксимировали следующей зависимостью (кривая 2 на рис. 2):

$$\tau_s = \frac{r^2}{2D(C_s - C)}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии газа в жидкости; C_s – растворимость; C – газосодержание в жидкости. Коэффициент диффузии неизвестен. Если положить по порядку величины $D \sim 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, то наилучшее согласие с экспериментом достигается при $(C_s - C) \times 10^{-2} \text{ см}^3/\text{см}^3$. При растворимости воздуха в нормальных условиях $C_s \times 0.3 \text{ см}^3/\text{см}^3$ [4]. Это означает, что перфтортриэтиламин был насыщен более чем на 95%, т.е. пузырьки находились в состоянии, близком к равновесному.

Высоковольтные эксперименты

В данной работе установка была идентичной используемой ранее в [1, 2], за исключением лазера. Вместо рубинового лазера ОГМ-40 использовался полупроводниковый лазер с электронной накачкой ПЛЭН-1, дающий более короткие световые импульсы длительностью ~3 нс с периодичностью всего в несколько секунд. Это позволяло работать с пузырьками, время растворения которых составляло менее 1 мин.

Эксперименты проводились при двух напряжениях, соответствующих максимальной напряженности в ячейке 300 и 800 кВ/см.

Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены фотографии микропузырьков диаметром примерно 70 мкм на поверхности электрода до подачи напряжения и через 48, 87, 120 мкс после этого. Напряжение состав-

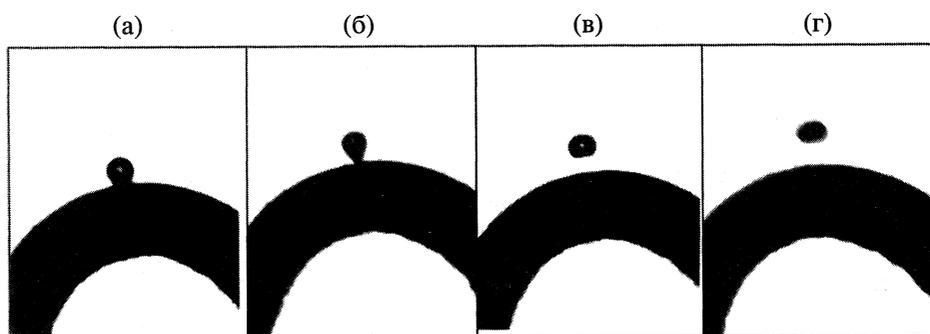


Рис. 3. Конфигурация пузырьков на поверхности электрода до воздействия электрического поля (а), а также через 48 (б), 87 (в), 120 мкс (г) после начала воздействия. Максимальная напряженность 300 кВ/см. Видны удлинение пузырьков, отрыв и движение сплюснутых пузырьков.

ляло 30 кВ, соответственно напряженность поля вблизи электрода, где расположены пузырьки, около 300 кВ/см. Кадры взяты из разных серий, на втором и четвертом – анод, на третьем – катод. Видно, что на катоде и аноде процесс отрыва пузырьков протекает одинаково. Вначале пузырьки удлиняются в направлении электрического поля и сжимаются в поперечном направлении. Перед отрывом пузырьки имеют форму капли. Отрыв пузырьков от поверхности электрода при напряжении 30 кВ происходит через 50–60 мкс. На поздних стадиях движения оторвавшиеся пузырьки сплюснуты в направлении движения.

При воздействии более высокого напряжения 80–85 кВ поведение пузырьков имеет тот же характер, но отрываются они раньше, через 15–20 мкс после начала воздействия. Форма движущихся пузырьков меняется в процессе движения, зарегистрированы как сплюснутые, так и круглые пузырьки, причем разброс расстояний, на которые они успевают пройти, весьма значителен. Оценка скорости движения оторвавшихся пузырьков дает значения порядка 2–3 м/с.

Что касается зажигания разряда при наличии пузырьков на поверхности, то напряженность поля была недостаточной для стабильного зажигания. Имело место лишь несколько случаев зажигания разряда. Единственный вывод, который может быть сделан: зажигание разряда происходит в месте расположения пузырька.

Обсуждение экспериментальных данных

При анализе экспериментов в первую очередь встает вопрос о причинах движения пузырьков. Из анализа [2] следует, что наиболее вероятны два источника деформации и движения пузырьков: частичные разряды и диэлектрфоретическая сила.

Частичные разряды. Ввиду того, что перфтортриэтиламин является легкокипящей жидкостью, пузырек в своем составе имеет два газа: воздух и

пары перфтортриэтиламина, причем при комнатной температуре воздух составляет примерно 86%, а перфтортриэтиламин – 14%. Частичные разряды в пузырьках размером около 80 мкм описываются правой ветвью кривой Пашена. При этом пробивное напряжение складывается из пробивных напряжений двух газов $U_{пр} \approx U(p_1d) + U(p_2d)$ [5]. Для воздуха $U(p_1d) \approx 800$ В, для паров перфтортриэтиламина напряжение пробоя неизвестно, известно лишь, что электрическая прочность паров всех перфторуглеродов значительно (в 3–10 раз) выше электрической прочности воздуха [6]. Если для оценки взять данные по пробоем элегаза при соответствующих давлении и размере, то $U(p_2d) \approx 700$ В, т.е. пробивное напряжение пузырька должно составить примерно 1.5 кВ. При напряжении между электродами ячейки 30 кВ падение напряжения на пузырьке составит около 2 кВ. Это означает, что после разряда в пузырьке заряд на его поверхности незначителен, а скорость роста пузырька за счет действия этого фактора составит примерно 0.1 м/с. Зарегистрированные скорости движения лежат в диапазоне 0.2–0.4 м/с. Что касается экспериментов при напряжении 80–85 кВ, то падение напряжения на пузырьке должно составлять 5.5 кВ, что много больше, чем 1.5 кВ.

Диэлектрфорез и движение пузырьков в неоднородном поле. Этот фактор может стать основным в ряде случаев. Так, при напряжении 30 кВ диэлектрфоретическая сила, действующая на сферический пузырек радиусом 40 мкм, примерно на порядок выше кулоновской. В случае движущихся пузырьков этот фактор может быть еще значительнее. Дело в том, что на движущийся пузырек действуют гидродинамические силы, которые сплюсывают его в направлении движения и тем самым увеличивают его дипольный момент и выталкивающую силу. Когда выталкивающая сила совпадает по направлению с напряженностью поля, электрические и гидродинамические силы конкурируют между собой. Электрическое поле

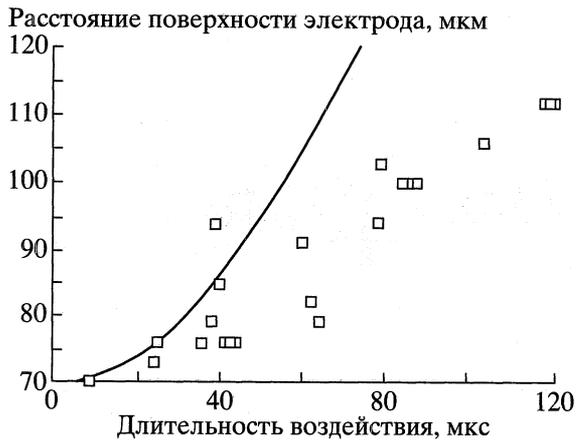


Рис. 4. Расчетные (кривая) и экспериментальные данные (точки) по движению наиболее удаленной от поверхности электрода точки на поверхности пузырька. Максимальная напряженность 300 кВ/см.

удлиняет пузырек в направлении поля и сжимает в поперечном направлении, в целом уменьшая объем пузырька, тогда как гидродинамические силы сжимают пузырек в направлении поля и уширяют его в поперечном направлении. Если предположить, что шарообразный пузырек движется относительно жидкости со скоростью V , то вблизи его поверхности распределение давления определяется выражением [7]

$$P_1 = P_0 + \frac{\rho V^2}{8}(9 \cos^2 \theta - 5), \quad (2)$$

где P_0 – равновесное гидростатическое давление; θ – угол между нормалью к поверхности и направлением движения. Отметим, что это давление положительно вблизи полюсов пузырька и отрицательно вблизи экватора, т.е. оно сплюсчивает пузырек. Рассчитаем среднее давление на поверхность пузырька за счет его движения

$$P_1 = \frac{1}{S} \iint P_1 dS = -\frac{\rho V^2}{4}. \quad (3)$$

Для пузырька, движущегося в направлении поля, дополнительное давление, связанное с действием поля, определим, используя результаты [8]

$$P_2 = \frac{9\varepsilon_0\varepsilon(\varepsilon - 1)E^2}{2(2\varepsilon + 1)^2} [1 - (\varepsilon - 1)\cos^2 \theta]. \quad (4)$$

Условие, при котором пузырек не будет деформирован, можно получить из требования отсутствия зависимости $P_1 + P_2$ от θ

$$\frac{\rho V}{2} = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon(\varepsilon - 1)^2 E^2}{(2\varepsilon + 1)^2}. \quad (5)$$

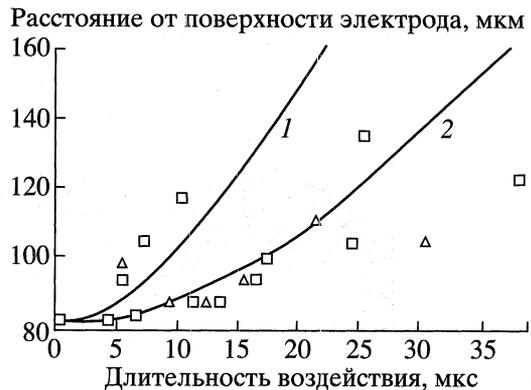


Рис. 5. Расчетные (кривые 1 и 2) и экспериментальные данные (точки, 3 – анод, 4 – катод) по движению наиболее удаленной от поверхности электрода точки на поверхности пузырька. Максимальная напряженность 800 кВ/см. Кривая 1 – пузырьки, удлинение под действием кулоновских сил, кривая 2 – движение пузырьков под действием диэлектрфоретической силы.

В отличие от полярных жидкостей равенство в этом выражении может достигаться при значительно меньших скоростях. Это означает, что движущийся пузырек предпочтительно имеет сплюснутую форму

Таким образом, если пузырек движется со скоростью, меньшей, чем скорость, определяемая выражением (5), то он является вытянутым в направлении поля, в противном случае – сплюснутым. В условиях данных экспериментов при $E_{\max} \sim 2.5 \times 10^7$ В/м условие (5) выполняется при скорости более 0.8 м/с. Движение не всегда является устойчивым, в частности, вытянутый пузырек гидродинамически неустойчив. Кроме того, при пренебрежении изменением объема пузырька дипольный момент, а следовательно и выталкивающая сила, у сплюснутого пузырька больше, чем у вытянутого, а гидродинамическое сопротивление меньше. Форма круглого движущегося пузырька также неустойчива. При сплюсывании гидродинамические силы будут значительно превышать диэлектрические. Поэтому можно наблюдать малоподвижные вытянутые и более быстрые сплюснутые пузырьки.

Следует отметить, что движение пузырьков не является установившимся. Равенство стоковой силы вязкого трения и диэлектрфоретической силы достигается примерно при скорости 100 м/с. В случае коротких импульсов и достаточно крупных пузырьков определяющим фактором становится инерция жидкости. Эффективная присоединенная масса пузырька примерно равна массе жидкости в объеме, равном половине объема пузырька [9]. С учетом выражения для диэлектрфоретической силы [2] при пренебрежении вязкостью и кулоновскими силами уравнение движе-

ния пузырька можно записать в виде

$$\frac{2\pi r^3 \rho d^2 R}{3 dt^2} = \frac{4\pi \epsilon_0 \epsilon (\epsilon - 1) r^3 E^2(R)}{(2\epsilon + 1)R}, \quad (6)$$

откуда получим

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + \frac{6\epsilon_0 \epsilon (\epsilon - 1) E^2(R_0) t^2}{(2\epsilon + 1)\rho}}. \quad (7)$$

Расчеты движения пузырька по (7) при $E(R_0)$, соответствующем напряжению 30 кВ, приведены на рис.4. Здесь же показаны экспериментальные данные. Видно, что расчет достаточно хорошо согласуется с экспериментом, по крайней мере, до тех пор, пока пузырек не удалится на расстояние, сравнимое с радиусом электрода.

Расчеты деформации и движения пузырьков при напряжении 80 кВ проводились согласно выражению (7) и уточненной пузырьковой модели зажигания разряда [2], где основным фактором считалось действие кулоновских сил на заряд, появившийся после частичного разряда в пузырьке. Результаты расчета и экспериментальные данные показаны на рис. 5. Видно, что большую часть экспериментальных точек можно разделить на две группы, каждая из которых достаточно хорошо согласуется с одной из расчетных кривых. При этом точки, соответствующие как анодным, так и катодным пузырькам, находятся в обеих группах, т.е. эффект полярности отсутствует. По-видимому, частичные разряды в пузырьках возникают случайным образом и в тех из них, где возник интенсивный разряд, преобладающим фактором становятся кулоновские силы. Движение остальных пузырьков происходит, в основном, вследствие действия диэлектрфоретической силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано образование и поведение искусственных микропузырьков в перфтортриэтиламине под действием сильных электрических полей. Разработанная методика позволила создавать одиночные долгоживущие пузырьки размером

60–80 мкм на поверхности проволочного электрода. Воздействие импульсного электрического поля напряженностью до 800 кВ/см приводило к удлинению пузырька в направлении поля, сжатию в поперечном направлении, отрыву и движению со скоростями до 2–3 м/с. Движущиеся пузырьки, как правило, были сплюснуты в направлении движения, причиной которого явилось действие диэлектрфоретической силы или (после возникновения частичных разрядов в пузырьке) кулоновской силы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проектов 98-02-17903, 01-02-16932).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробейников С.М., Мелехов А.В., Посух В.Г. и др. Экспериментальное исследование поведения пузырьков в воде под действием сильных электрических полей. // ТВТ. 2001. Т. 39. № 2. С. 181.
2. Коробейников С.М., Мелехов А.В., Синих Ю.Н., Соловейчик Ю.Г. Влияние сильных электрических полей на поведение пузырьков в воде // ТВТ. 2001. Т. 39. № 3. С. 395.
3. Коробейников С.М., Сарин С.Г., Фурин Г.Г. Электрическая проводимость перфтортриэтиламина при постоянном напряжении // Журн. прикл. химии. 1996. Т. 69. Вып. 2. С. 321.
4. Молдавский Д.Д., Шкультецкий Л.В., Алексеенко С.В., Фурин Г.Г. О растворимости основных компонентов воздуха в перфторированных соединениях // Журн. прикл. химии. 1999. Т. 72. Вып. 5. С. 744.
5. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: ГИФМЛ, 1958. 907 с.
6. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Корицкого Ю.В. и др. 3-е изд. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1986. 368 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ, 1954. 983 с.
8. Коробейников С.М. Влияние электрического поля на точку кипения жидкостей // ИФЖ. 1981. Т. 41. № 6. С. 1131.
9. Jones T.B., Bliss G.W. Bubble Dielectrophoresis // J. Appl. Phys. 1977. V.48. № 4. P.1412.