

03;10

Электризация жидкости при сонолюминесценции

© Д.А. Бирюков, Д.Н. Герасимов, О.А. Синкевич

Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва
E-mail: deniger@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 сентября 2013 г.

Представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о том, что многопузырьковая сонолюминесценция сопровождается образованием двойного электрического слоя на ультразвуковом волноводе.

Большинство существующих теорий сонолюминесценции — свечения жидкостей при ультразвуковом (УЗ) воздействии — можно разделить на две условные группы: „тепловые“ и „электрические“ [1]. Не в последнюю очередь трудности в выявлении первопричины свечения возникают из-за взаимосвязи тепловых и электрических эффектов: вообще говоря, сильный разогрев среды приводит к ее ионизации, а электрический пробой — к ее разогреву.

Если для схожего явления — так называемой гидролюминесценции (свечения без УЗ-воздействия) — определяющим является именно возникновение сильных электрических полей [2–7], то для сонолюминесценции ситуация не столь очевидна. В частности, Я.И. Френкель в своей монографии [8, с. 366] высказывал гипотезу о том, что причиной свечения может являться двойной электрический слой (ДЭС) на ультразвуковом волноводе (УЗВ): колебания зарядов приводят к образованию в „газовой линзе“ полей $\sim 10^7$ V/cm, что должно вызывать микроразряды при условии, что толщина слоя газа превышает длину свободного пробега электрона.

Если сонолюминесценция действительно сопровождается образованием ДЭС на погруженных в жидкость электродах, то между двумя электродами различной физической природы должно появляться электрическое напряжение. Исследованию этого явления и посвящена данная работа.

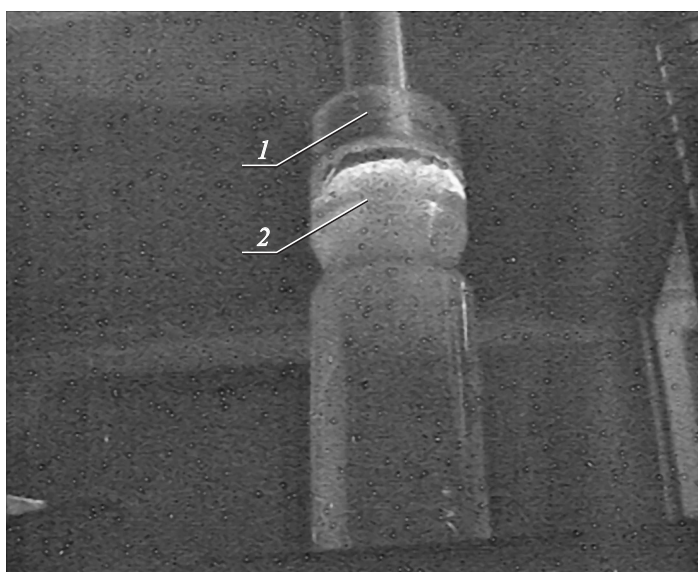


Рис. 1. Сонолюминесценция: 1 — ультразвуковой волновод, 2 — свечение в объеме жидкости.

Исследовалась многопузырьковая сонолюминесценция в глицерине. Первоначальная чистота глицерина превышала 99%, однако после длительной работы глицерин, конечно, абсорбировал значительное количество влаги из атмосферы. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовался генератор ИЛ10-2.0 (мощностью 2 kW). При работе генератора в штатном режиме наблюдалось достаточно яркое свечение на УЗВ и более тусклое свечение в объеме жидкости (рис. 1 — кадр из видео, снятого камерой ADVERT AD-9346V с чувствительностью 10^{-5} Lux). Свечение на УЗВ состоит в действительности из отдельных вспышек: это можно наблюдать при более интенсивной внешней засветке (когда видны отдельные более яркие искры) либо при небольшой отстройке частоты генератора от резонансной.

В ходе экспериментов измерялось напряжение между погруженным в глицерин медным электродом и титановым УЗВ с помощью вольтметров В7-78.1 и Fluke 17B, а также температура с помощью регистратора

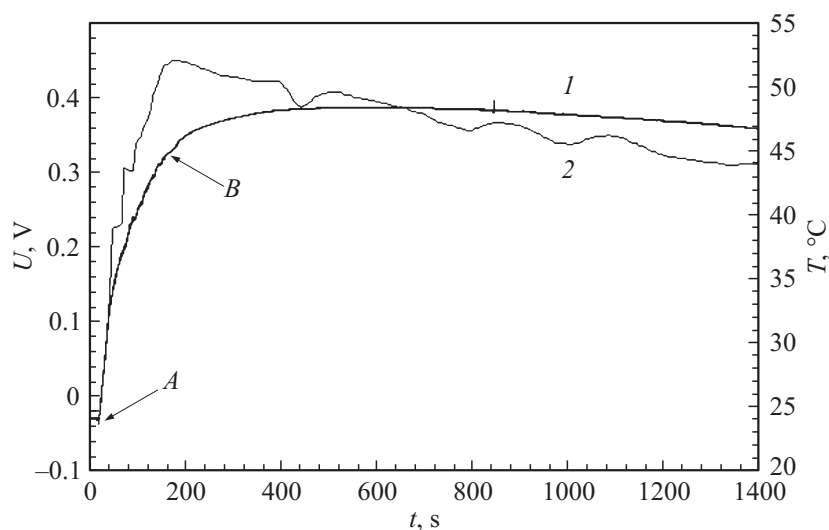


Рис. 2. Зависимость напряжения (кривая 1) и температуры (кривая 2) от времени. A и B — моменты включения и выключения УЗ-генератора соответственно.

АКТАКОМ АТЕ-9382, снабженного термопарным датчиком K -типа; термопара находилась непосредственно под УЗВ (на расстоянии ~ 5 мм).

Зависимости напряжения и температуры показаны на рис. 2. Таким образом, УЗ-воздействие сопровождается не только сонолюминесценцией, но и генерированием внешнего напряжения на рабочем участке. Последнее не связано с напряжением, индуцируемым на волноводе при работе стриктора УЗ-генератора: измеренное относительно земли, оно не превышает ~ 0.01 V, что на порядок меньше регистрируемого при сонолюминесценции; это обстоятельство иллюстрируется также рис. 2, где в момент выключения УЗ-генератора не заметно никаких скачков напряжения. Напряжение на рабочем участке возникает, по всей видимости, действительно вследствие образования ДЭС на погруженных в жидкость электродах.

Как видно, графики изменения напряжения и температуры ведут себя несколько сходным образом, откуда можно было бы сделать вывод о том, что возникающая в сосуде ЭДС связана с увеличением

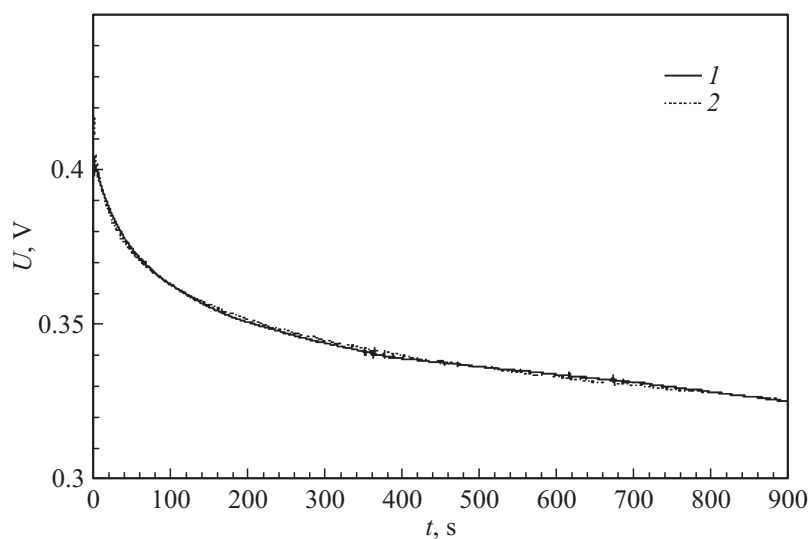


Рис. 3. Релаксация напряжения: 1 — экспериментальная кривая, 2 — аппроксимация функцией Mittag–Лефлера.

проводимости жидкости при повышении ее температуры. Это не так: при повышении температуры до 50°C с помощью погруженного в глицерин электронагревателя зарегистрированное внешнее напряжение составляло $\sim -0.05\text{ V}$, т.е. было не только в несколько раз ниже по абсолютному значению (рис. 2), но и имело другой знак, будучи близким измеряемому значению U при комнатной температуре. Следовательно, появление значительного положительного напряжения между электродами не связано однозначно с температурой, но обусловлено процессами, происходящими в УЗ-поле.

Обращает на себя внимание поведение напряжения после выключения УЗ-генератора. Как видно из рис. 2, в течение продолжительного времени — нескольких минут — оно продолжает расти и лишь затем начинает плавно спадать.

Ход релаксации напряжения, представленный на рис. 2, можно существенно изменить. После кратковременного извлечения УЗ-волновода, удаления с его поверхности глицерина и повторного погружения в

жидкость (вся операция занимает около 10 с) зависимость напряжения от времени радикально меняется: спад становится более крутым, вторая производная по времени становится положительной (рис. 3, ср. с ходом релаксации напряжения на рис. 2). Можно предположить, что удаление образовавшейся на УЗВ структуры устраняет препятствие для диффузии заряженных частиц жидкости к УЗВ, где они рекомбинируют.

Любопытно, что экспериментальная зависимость $U(t)$ неплохо аппроксимируется функцией Миттаг–Лефлера $E_\alpha(-(t/\tau)^\alpha)$ при параметрах $\tau = 7 \cdot 10^4$ с, $\alpha = 0.15$ (хотя при таком малом значении аргумента можно, конечно, ограничиться и степенным разложением). Как хорошо известно [9], подобная зависимость возникает при решениях задач релаксации, сформулированных в виде дробно-дифференциальных уравнений. В данном случае, по всей видимости, подобная функция $U(t)$ свидетельствует об аномальной диффузии ионов в жидкости.

Список литературы

- [1] Маргулис М.А. Сонолюминесценция // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 263–287.
- [2] Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 2. С. 53–57.
- [3] Бирюков Д.А., Власова М.Н., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 69–72.
- [4] Бирюков Д.А., Власова М.Н., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 5. С. 55–59.
- [5] Бирюков Д.А., Власова М.Н., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 4. С. 629–630.
- [6] Маргулис М.А., Пильгунов В.Н. // ЖФХ. 2009. Т. 83. № 8. С. 1585–1590.
- [7] Герценштейн С.Я., Монахов А.А. // Механика жидкости и газа. 2009. № 3. С. 114–119.
- [8] Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 424 с.
- [9] West B.J., Bologna M., Grigolini P. Physics of Fractal Operators. Springer, 2003. 354 p.