АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Т.XIX 1973 Вып. 5 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР | Сентябрь Октябрь

Основан в 1955 г. | МОСКВА | *Выходит 6 раз в год*

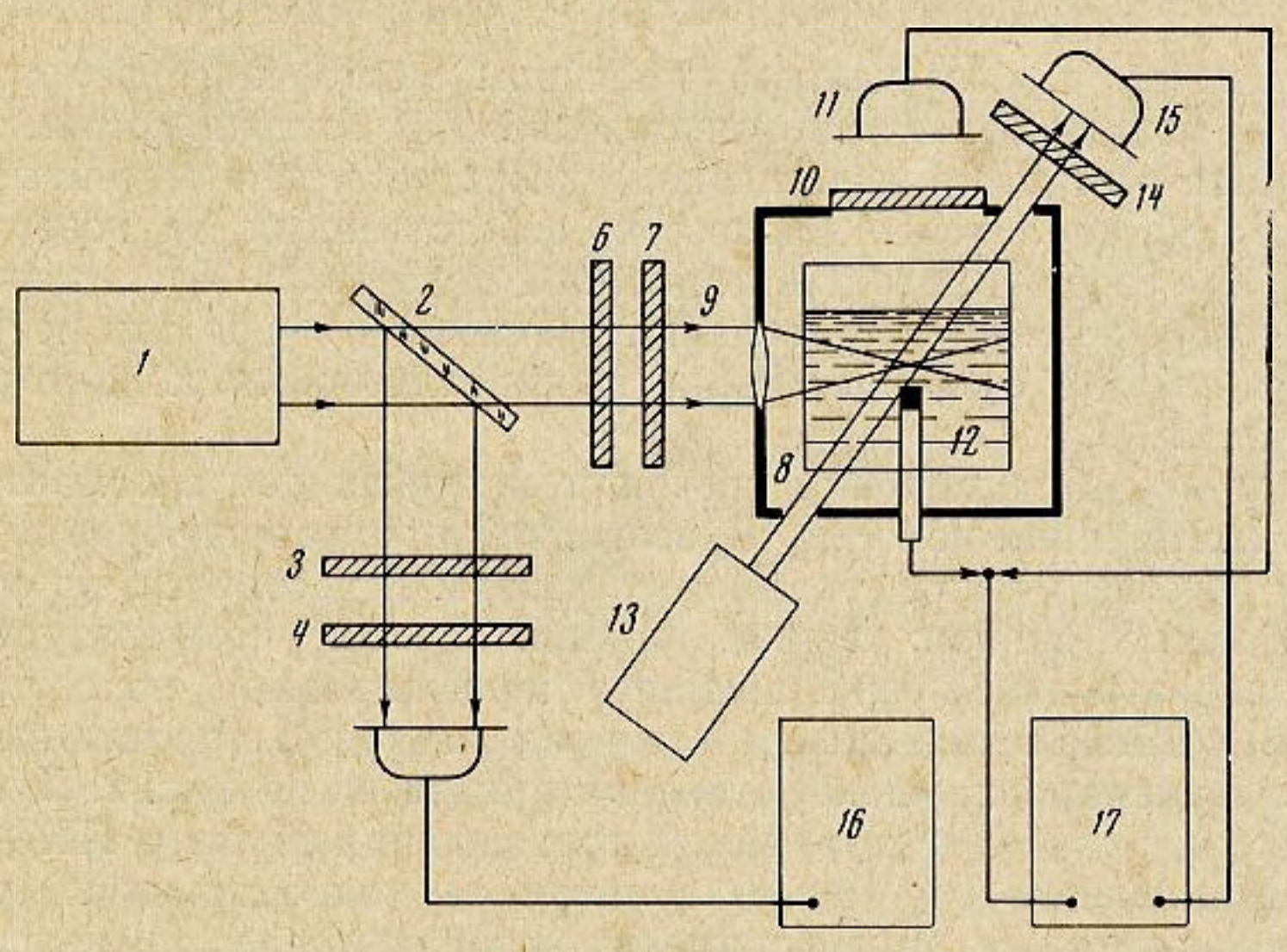
УДК 534.29:535.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ЖИДКОСТИ

А. Г. Акманов, В. Г. Беньковский, П. И. Голубничий, С. И. Масленников, В. Г. Шеманин

Приведены экспериментальные данные об абсолютной светимости вспышек сонолюминесценции, имеющей место при коллапсе одиночных кавитационных полостей, образующихся при фокусировке в дистиллированную воду излучения неодимового лазера. Для конкретного случая оценена температура, возникающая при адиабатическом схлопывании полости.

В последнее время предметом интенсивных исследований стали гетерофазные процессы, развивающиеся в жидкостях под действием мощных внешних воздействий [1–6]. Наиболее отчетливо эти процессы проявляются при различных видах кавитации в жидкости. В сравнительно не-



Фиг. 1

давно появившейся работе [7] при фокусировке в жидкости излучения рубинового лазера обнаружена гидродинамическая сонолюминесценция, являющаяся следствием кавитации, сопровождающей в таких условиях лазерный пробой жидкости. При этом время возникновения свечения сдвинуто относительно момента генерации лазерного импульса на период

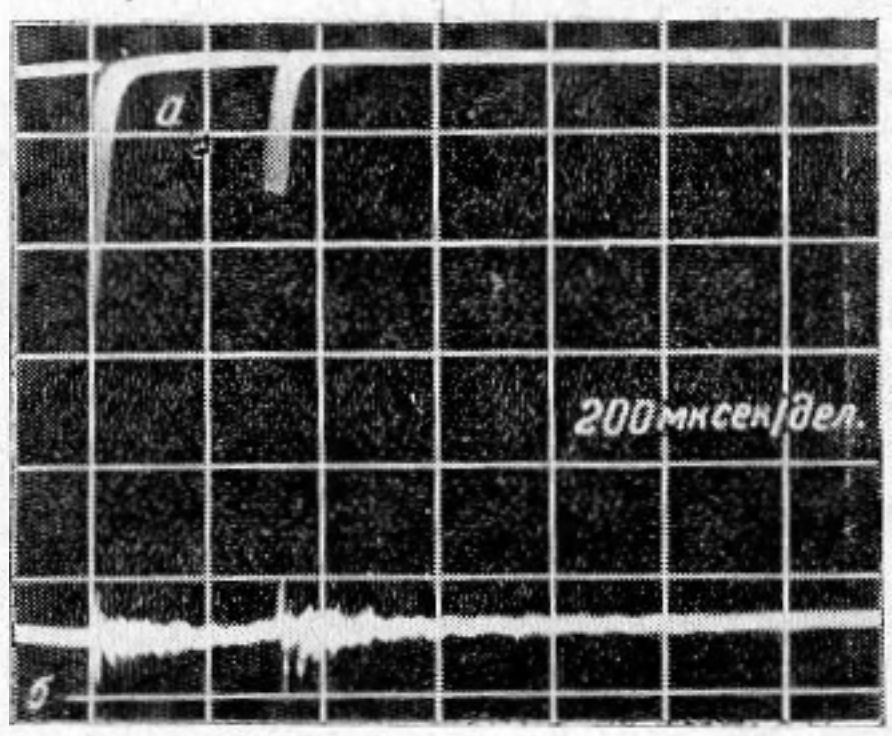
© «Акустический журнал», 1973

пульсации кавитационной полости, определяющийся выражением

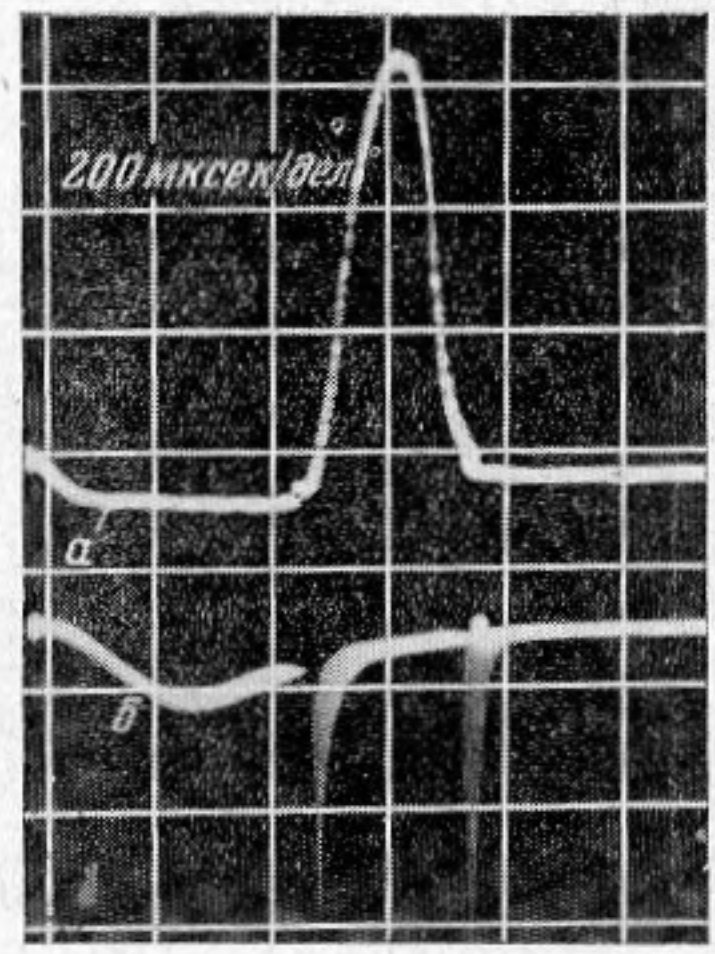
$$T_п \simeq 1{,}83\, R_{макс} (\rho / P)^{1/2},$$

где $R_{макс}$ — максимальный размер образующейся полости, P — гидростатическое давление, ρ — плотность жидкости.

Указанное свечение будем в дальнейшем называть лазерной сонолюминесценцией по аналогии с давно известным явлением ультразвуковой



Фиг. 2



Фиг. 3

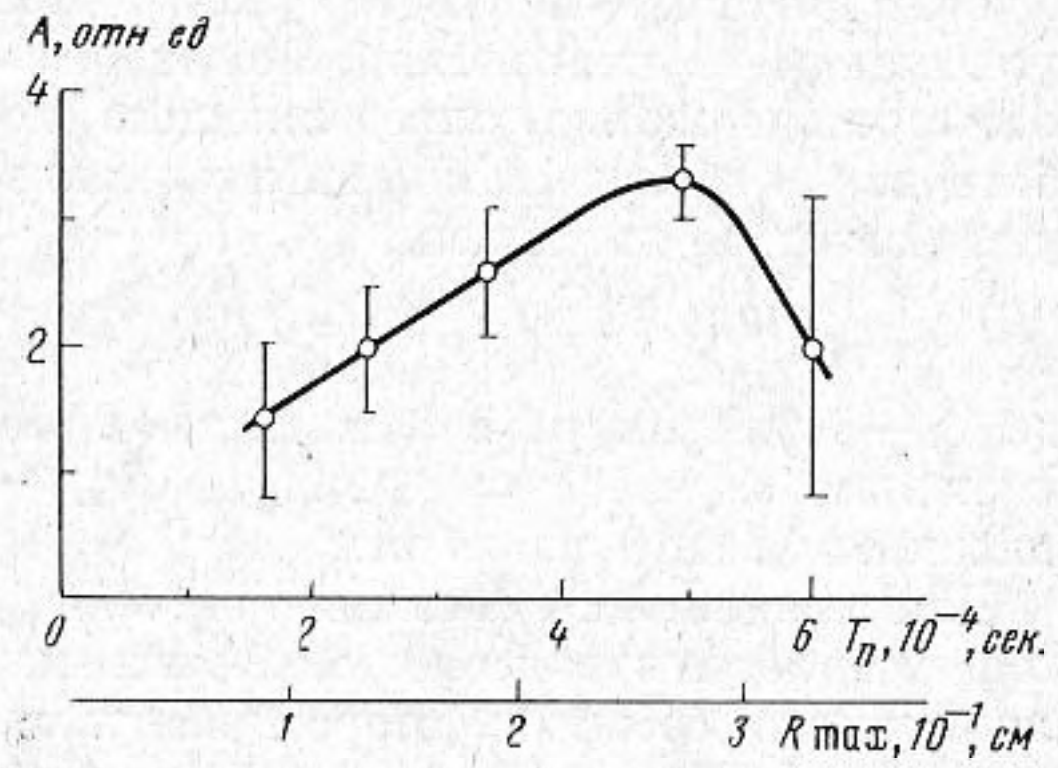
люминесценции, т. е. свечением, имеющим место при распространении в жидкости мощных ультразвуковых колебаний. Актуальность постановки и проведения соответствующего цикла работ несомненна, учитывая недостаточную степень ясности процессов, ответственных за возбуждение и высвечивание содержимого кавитационной полости [3—5], а также открывающиеся перспективы установления возможной связи параметров образующейся плазмы с равновесными и кинетическими характеристиками жидкостей [8, 9].

Ниже приводятся данные о свечении, возникающем в момент захлопывания кавитационной полости, образованной при фокусировке в дистиллированной воде излучения неодимового лазера. В частности, на основе экспериментальных данных оценен нижний предел температуры сгустка плазмы, образующейся при коллапсе кавитационной полости, а также приведены данные о светимости вспышек лазерной сонолюминесценции.

Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1. Луч лазера *1* ($E_л \simeq 0{,}5$ *дж*, $\tau_л \simeq 5 \cdot 10^{-8}$ *сек*) после прохождения фильтра ИКС-1 *7* фокусировался линзой *9* ($F = 40$ *мм*) в жидкость, заполняющую кювету *8*. Кювета располагалась внутри камеры, которая имела симметрично расположенные окна для выхода лазерного излучения и крепления фотоумножителей. Свечение жидкости под действием излучения неодимового лазера регистрировалось на осциллографе *17* с помощью фотоумножителя ФЭУ-13 *11*. Для выделения спектральных областей свечения использовались стандартные фильтры из цветного стекла *10*. Энергия светового пучка могла изменяться с помощью нейтральных светофильтров *6*. Контроль лазерного излучения осуществлялся отводом части излучения через светофильтры НС *3* и ИКС-1 *4* на фотоумножитель ФЭУ-22 *5*, сигнал с которого подавался на осциллограф *16*. Для регистрации ударно-акустических волн при пробое и пульсаций кавитационной полости на расстоянии 1,5 *см* от фокальной зоны устанавливался широкополосный гидрофон, обладающий

временным разрешением $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ *сек*. Сигнал с него подавался на второй канал осциллографа *17*.

В первой части эксперимента с помощью двухлучевого осциллографа *17* регистрировались импульсы с фотоумножителя *11* и гидрофона *12* с целью установления временной корреляции между световыми и акустическими эффектами, сопровождающими пробой жидкости мощным лазерным импульсом. На фиг. 2, *а* первый импульс соответствует пробойной вспышке, второй импульс, следующий через 300 *мк·сек* — импульсу лазерной сонолюминесценции. Коррелированные с этими световыми импульсами ударно-акустические импульсы, воспринимаемые гидрофоном, видны на фиг. 2, *б*. На всех осциллограммах длительность временной развертки составляет 200 *мк·сек/деление*.



Фиг. 4

Во второй части эксперимента с помощью He — Ne лазера *13* ($\lambda = 6328$ Å) в качестве источника света при теневом методе исследования неоднородностей была прослежена зависимость радиуса кавитационной полости от времени с целью определения величины $R_{макс} / R_{мин}$, т. е. отношения максимального и минимального радиусов пульсирующей кавитационной полости. Этот параметр необходим для теоретической оценки степени разогрева содержимого кавитационной полости при ее адиабатическом захлопывании.

Излучение газового лазера регистрировалось фотоумножителем ФЭУ-22 *15*, перед которым ставился красный светофильтр КС-13 *14* для уменьшения влияния света неодимового лазера и света от пробоя. Эксперимент проводился в проходящем свете. В этом случае фотоумножитель *15* ставился строго по оси луча газового лазера и регистрировал изменение интенсивности света $I = f(R)$ из-за отражения от поверхности полости (см. фиг. 3, *а*).

Известно, что для неоднородностей с размером $R \gg \lambda$ выполняется квадратичный закон изменения интенсивности рассеянного света от радиуса. Следовательно, необходимое нам отношение максимального и минимального радиусов пульсирующей полости определяется выражением

$$R_{макс} / R_{мин} = (I_{R_{макс}} / I_{R_{мин}})^{1/2}.$$

Справедливость такого вида зависимости для конкретных экспериментальных условий легко проверяется, так как мы имеем целый набор событий с различными $R_{макс}$ (однозначно определяемыми через период пульсаций $T_п$) и соответствующими им интенсивностями рассеянного света $I_{R_{макс}}$. Помимо картины пульсаций, полученной теневым методом (фиг. 3, *а*), на другой луч осциллографа (см. фиг. 3, *б*) одновременно поступал сигнал с фотоумножителя *11*, регистрирующего свет от пробоя (первый импульс) и от вспышки лазерной сонолюминесценции (второй импульс). Осциллограмма на фиг. 3, *б* подтверждает факт пульсации образующейся неоднородности, а также дает возможность определить абсолютное значение интенсивности вспышки сонолюминесценции.

Было получено около тысячи осциллограмм типа показанных на фиг. 2*а*, *б*, из которых выбрано 90 событий, удовлетворяющих требованию наличия на кадре вспышки сонолюминесценции. Столь низкая ($\sim 10\%$) «эффективность стрельбы», на наш взгляд, определяется флуктуацией зародышевых неоднородностей, на которых по данным работы [10] разви-

вается пробой. Результаты обработки этих осциллограмм приведены на фиг. 4, где представлена зависимость амплитуды вспышек лазерной сонолюминесценции от значения периода пульсации или от максимального размера полости. Здесь $A = 3$ соответствует абсолютному световому выходу $r_э \simeq 5 \cdot 10^7$ фотонов на одну вспышку, т. е. $r_э = 2{,}3 \cdot 10^{-11}$ *дж*. Переход A через максимум по мере увеличения размера полости (или периода пульсации), на наш взгляд, может быть обусловлен наличием оптимального газосодержания, определяющего конечную температуру $T_к$ при адиабатическом захлопывании кавитационной полости. Для оценки $T_к$ используем известное выражение

$$T_к = T_0 (R_{макс} / R_{мин})^{3(\gamma-1)},$$

где T_0 — температура в начальный момент, γ — отношение теплоемкостей (в нашем случае $\gamma \simeq {}^4/_3$), $R_{макс} / R_{мин}$ — определяется экспериментально описанным выше способом.

Для конкретного события (см. фиг. 3*а*, *б*) находим, что $T_к \simeq 4500°$ К. При этом абсолютная светимость вспышки лазерной сополюминесценции для данного события (второй импульс на фиг. 3, *б*) составляет $\sim 1{,}7 \cdot 10^{-11}$ *дж*. Заметим, что полученное таким образом значение $T_к$ дает нижний предел температуры внутри полости. Дело в том, что в приведенных выше оценках мы полагали $T_0 = 293°$ К, что является, вообще говоря, лишь некоторым приближением к реальной величине, так как не совсем ясен вопрос о степени остывания пробойной плазмы к моменту $T_п / 2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. И. Голубничий, В. Д. Гончаров, А. Н. Лукин, Х. В. Протопопов. О вспышечном гетерофазном свечении в органических жидкостях под действием сильных электрических полей. Докл. АН СССР, 1968, **180**, 4, 828—831.
2. В. Е. Гордеев, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин. Возбуждение взрыва при захлопывании кавитационных пузырьков. Докл. АН СССР, 1967, **172**, 383—385.
3. П. И. Голубничий, В. Д. Гончаров, Х. В. Протопопов. Сонолюминесценция в жидкостях. Влияние растворенных газов, отступления от тепловой теории. Акуст. ж., 1969, **15**, 4, 534—541.
4. М. А. Маргулис. Сонолюминесценция и ультразвуковые химические реакции. Обзор. Акуст. ж., 1969, **15**, 2, 153—173.
5. П. И. Голубничий, В. Д. Гончаров, Х. В. Протопопов. О свечении в некоторых жидких углеводородах при совместном действии ультразвука и электрического поля. Химия высоких энергий, 1969, **3**, 6, 515—522.
6. G. Singurel. Dielectric breakdown and cavitation in liquids produced by ruby laser radiation. Rev. Roum. Phys., 1969, **14**, 4, 377—379.
7. А. А. Бузуков, В. С. Тесленко. Сонолюминесценция при фокусировке лазерного излучения в жидкость. Письма в ЖЭТФ, 1971, **14**, 5, 286.
8. П. И. Голубничий, В. Д. Гончаров, Х. В. Протопопов. Сонолюминесценция в различных жидкостях. Акуст. ж., 1970, **16**, 388—391.
9. P. Jarman. Measurements of sonoluminescense from pure liquids and some aqueous solutions. Proc. Phys. Soc., 1959, **73**, 628.
10. А. В. Бутенин, Я. Б. Коган. О механизме оптического пробоя прозрачных диэлектриков. Квантовая электроника, 1971, 5, 143.

Институт химии
Башкирский филиал Академии наук СССР

Поступила
18 августа 1972 г.