

УДК 534.232; 537.528

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

В. С. Тесленко, А. П. Дрожжин, Г. Н. Санкин
(Новосибирск)

Введение. Генераторы, формирующие акустические волны в жидкости, широко используются в различных приложениях и научных исследованиях. В частности, для генерации одиночных акустических импульсов используется многоочаговый электроразрядный генератор, обладающий рядом преимуществ по сравнению с другими методами формирования волн давления [1-3]. Эти преимущества наилучшим образом проявляются при создании цилиндрического генератора, который можно применить в экспериментальных исследованиях кавитации, сонолюминесценции и кооперативных явлений в кавитационном кластере [4].

Электрический разряд в электролите сопровождается гидродинамическими процессами, основными из которых являются рост и схлопывание парогазовых полостей на поверхности электрода. Излучение волн давления происходит в течение нескольких периодов пульсаций полостей и сопровождается диссипацией энергии. Экспериментальные работы показывают, что присутствие жесткой поверхности вблизи пузырька, пульсирующего в объеме жидкости, может оказать существенное влияние на динамику его движения, вызвать его деформацию вплоть до образования высокоскоростных струй жидкости (см., например, [5]). Характер пульсаций парогазовых пузырьков на поверхности электрода определяет амплитудно-временные параметры многоочагового акустического генератора. Знание особенностей поведения парогазовых пузырьков на жесткой поверхности электрода является необходимым для проектирования устройств, выполненных на основе многоочагового разряда. С целью изучения механизма развития электрогидродинамических явлений на поверхности акустического излучателя проведено экспериментальное моделирование процессов, протекающих на поверхности одного электрода.

Постановка экспериментов. *Моделирование электрогидродинамических процессов.* На рис. 1 представлена схема установки для изучения гидродинамических явлений, инициируемых электрическим разрядом в электролите. Конструкция установки позволяет моделировать процессы, протекающие на одном электроде. Диаметр вольфрамового электрода 2 равен 6 мм, электрод 3 выполнен из нержавеющей стали, а кювета — из органического стекла. Материал диэлектрика — фторопласт. Эксперименты проводились в 10 %-м водном растворе соли NaCl при комнатной температуре. Электроды подключались к разрядному контуру последовательно с конденсатором $C = 2$ мкФ и управляемым газовым разрядником РУ-62 (на рис. 1 не показаны). Напряжение заряда конденсатора изменялось в диапазоне от 6 до 8 кВ.

Работа выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 123 и гранта Германской службы академических обменов (DAAD) на приобретение научного оборудования при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-02-17682).

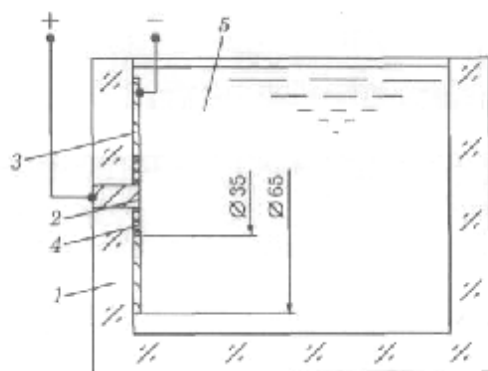


Рис. 1. Схема расположения электродов:

+, - клеммы для подключения к разрядному контуру; 1 — кювета; 2, 3 — электроды; 4 — диэлектрик; 5 — электролит

Цилиндрический генератор волн давления. На рис. 2 показана конструкция многоочагового цилиндрического генератора. Электрод 2 имеет положительную полярность, а электрод 6 — отрицательную. В диэлектрической пленке выполнены либо сквозные кольцевые прорезы, либо сквозные круглые отверстия, через которые протекает электрический ток. Исследуемая жидкость ограничена электродом-излучателем и изолирована от электролита.

Генерация акустических волн происходит следующим образом. Конденсатор подключается к электродам генератора с помощью разрядника, что вызывает протекание тока через электролит. Разряд конденсатора имеет апериодический характер. Конструкция электродов генератора обеспечивает максимальную плотность тока либо в прорезах, либо в отверстиях. На этих участках электрода происходит интенсивный нагрев электролита, который приводит к образованию парогазовых пузырьков. Внутри пузырьков зажигается электрический разряд. Каждый формирующийся пузырек излучает акустическую волну. Внешний электрод является границей раздела жидкой и газообразной фаз, имеющих разные акустические сопротивления. Поэтому волна, достигнув электрода 2, отражается от

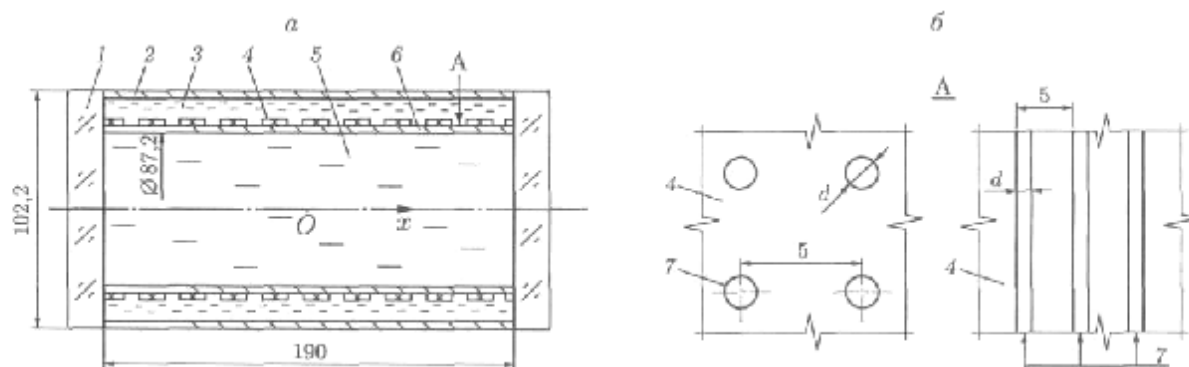


Рис. 2. Конструкция цилиндрического генератора (а) и излучающего электрода (б): 1 — окна для фотосъемки; 2 — внешний электрод; 3 — жидкий электролит; 4 — диэлектрическое покрытие излучающего электрода; 5 — рабочая жидкость; 6 — излучающий электрод; 7 — сквозные концентрические прорезы или отверстия в диэлектрике; $d = 0 \div 100$ мкм

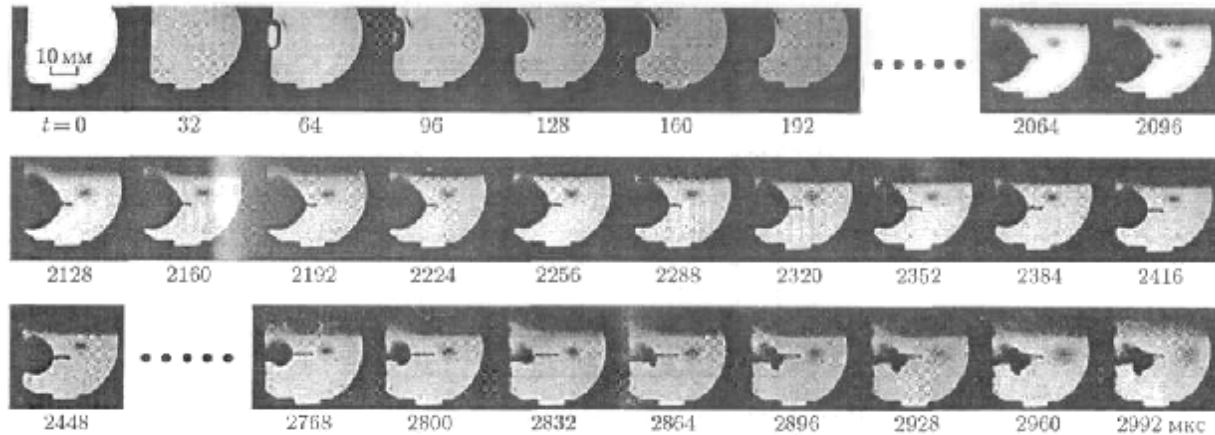


Рис. 3. Динамика движения парогазовой каверны на поверхности вольфрамового анода ($U = 6$ кВ, $c = 10\%$)

него и, являясь инвертированной, продолжает свое движение к оси симметрии генератора. В то же время формирование пузырьков на поверхности электрода 6 вызывает его упругую деформацию, которая приводит к формированию цилиндрической волны, сходящейся к оси Ox . В результате в фокусе генератора формируется поле давлений, способное вызвать кавитацию жидкости.

Результаты экспериментов и их обсуждение. *Динамика развития пузырька на поверхности одного электрода.* На рис. 3 представлены кинограммы динамики развития парогазового пузырька на поверхности электрода 2 (см. рис. 1) при напряжении заряда конденсатора $U = 6$ кВ. В результате развития парогазовой каверны на твердой поверхности происходит формирование группы пузырьков, период пульсаций которой составляет не менее 3128 мкс. В течение 1766 мкс ($1064 \div 2830$ мкс) группа пузырьков формируется вдоль линии, перпендикулярной поверхности электродов, в виде «цепочки». При сопоставлении кинограмм с осциллограммами импульсов давления и света (в данной работе не приведены) обнаружено, что моменту времени $(2,816 \pm 0,016)$ мс соответствует минимальный размер каверны. В течение второго периода пульсации каверна расширяется, теряет свою сферичность и сливается с группой пузырьков. В результате в воде вблизи электрода образуется область с повышенным содержанием газа.

Обнаруженные особенности формирования парогазовых пузырьков на поверхности многоочагового электрода влияют на амплитудно-временные параметры генератора. В частности, они уменьшают амплитуду волны разрежения, которая формируется на поверхности внешнего электрода 2 (см. рис. 2) и движется через излучающий электрод 6 к фокусу цилиндрического генератора.

Кавитационные процессы в фокусе генератора. В таблице приведены зависимости значений амплитуды волн сжатия P_c и разрежения P_p в фокусе цилиндрического генератора от координаты x . Средние значения длительностей фаз сжатия и разрежения, измеренные по основанию импульсов, равны 14 мкс. Концентрация электролита 5 %, напряжение заряда конденсатора 5 кВ. Координате $x = 0$ соответствует положение датчика в центре генератора O вдоль его геометрической оси. Результаты получены для генератора, имеющего концентрические прорезы в диэлектрике. Зависимость значений давления от координаты x обусловлена технологическими особенностями изготовления генератора: большим разбросом значений параметра d .

x , мм	P_c , атм	P_p , атм
40	19,0	6,9
30	15,0	10,4
20	16,1	9,2
10	16,1	8,6
0	13,8	8,6

На рис. 4 приведены цифровые фотографии кавитационного кластера, формирующегося в фокусе генератора. Время фотосъемки отсчитывалось с момента подачи высокого напряжения на электроды генератора. Длительность экспозиции 1 мкс. Фокальная плоскость перпендикулярна оси Ox и проходит через точку $x = 0$. Концентрация электролита 10%.

Через 37 мкс в фокус генератора приходит первая волна разрежения. Эта волна является суперпозицией двух волн: отраженной от внешнего электрода 2 и волной разрежения, формирующейся при упругой деформации электрода 6 (см. рис. 2). Она вызывает рост кавитационного кластера (37 мкс). В процессе развития кластера на него воздействует акустическое поле волн, инвертированных и отраженных от электродов. Вторая волна разрежения достигает фокуса генератора через 96 мкс. Это инвертированная волна сжатия, которая сформировалась при деформации электрода 6 и начала двигаться по направлению к фокусу генератора. После фокусировки она достигает внешнего электрода, отражается от него и фокусируется волной разрежения. В результате взаимного влияния пузырьков кавитационного кластера в акустическом поле генератора происходит их деформация. Поверхность пузырьков искажается, принимая «гофрированную» форму (указаны стрелками на рис. 4 при $t = 181$ мкс), образуются высокоскоростные струи жидкости (указаны стрелками на рис. 4 при $t = 191$ мкс).

На рис. 5 приведены фотографии кавитационной области, развивающейся вблизи сво-

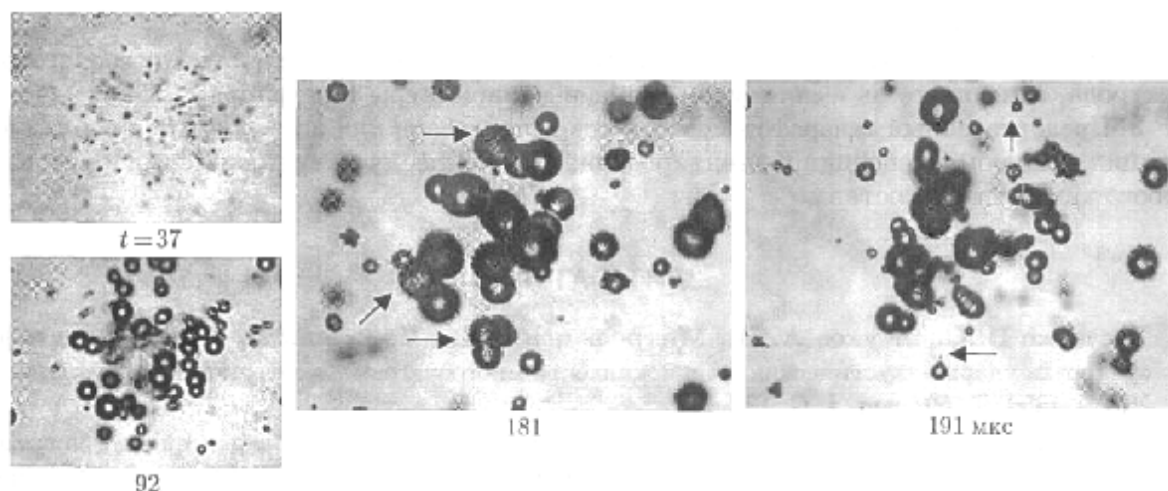


Рис. 4. Динамика развития кавитационного кластера в фокусе цилиндрического генератора в дистиллированной воде (размер кадров 17,4 x 22,2 мм, $U = 5$ кВ, $c = 10$ %)

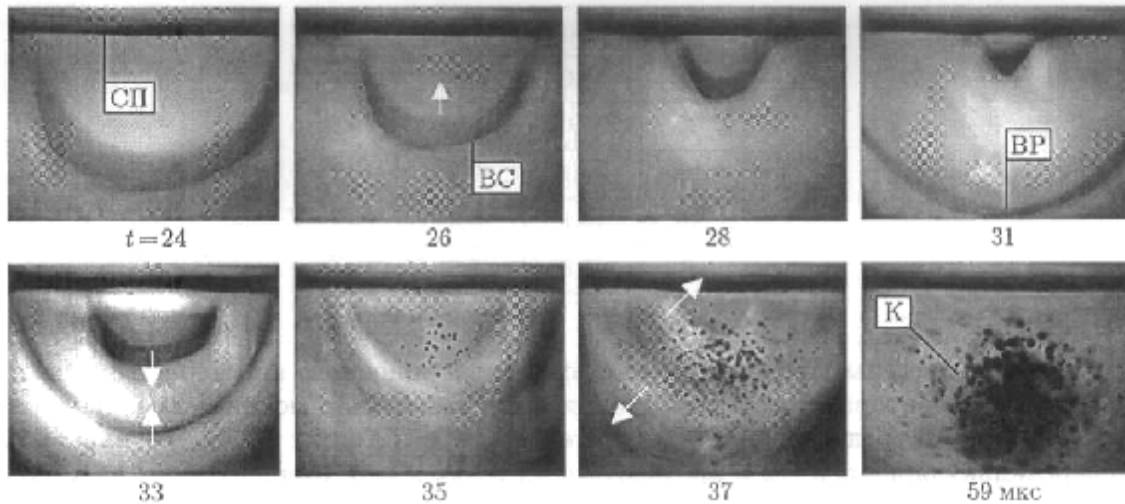


Рис. 5. Динамика развития кавитационного кластера вблизи свободной поверхности при фокусировке цилиндрической волны в дистиллированной воде (размер кадров 17,4 х 22,2 мм, $U = 5$ кВ, $c = 10\%$; стрелки — направления движения волн)

бодной поверхности. Генератор располагался горизонтально, а его ось симметрии совпадала с поверхностью дистиллированной воды. Цилиндрическая волна сжатия (BC) движется по направлению к свободной поверхности (СП) ($t = 24 \div 28$ мкс), фокусируется на ней и отражается волной разрежения (BP). Через 31 мкс на фотографиях можно увидеть волну разрежения, которая формируется при отражении от внешнего электрода генератора и движется по направлению к фокусу генератора. Наиболее интенсивная область кавитации (K) находится не на самой свободной поверхности, а в области пересечения двух волн разрежения, т. е. на глубине около 9 мм.

Выводы. 1. Показано, что для генерации цилиндрических акустических волн в жидкости длительностью несколько микросекунд могут быть использованы многоочаговые кольцевые разряды в электролите.

2. Обнаружено формирование пузырькового кластера на поверхности многоочагового электрода, влияющего на амплитудно-временные параметры генератора.

3. Представленный генератор может быть использован для исследования проблем кавитации, сонолюминесценции и инициирования физико-химических процессов в жидкостях любого химического состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тесленко В. С., Жуков А. И., Митрофанов В. В., Дрожжин А. П. Генерация и фокусировка ударно-акустических волн в жидкости многоочаговым электрическим разрядом // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып. 4. С. 138-140.
2. Дрожжин А. П., Тесленко В. С. Исследование кинетических особенностей многоочагового генератора ударно-акустических волн // Динамика сплошной среды / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 2000. Вып. 115. С. 69-73.
3. Санкин Г. Н., Дрожжин А. П., Ломанович К. А., Тесленко В. С. Многоочаговый диафрагменный электроразрядный генератор ударных волн жидкости // Приборы и техника эксперимента. 2004. Т. 47, № 4. С. 114-118.

4. **Teslenko V. S., Sankin G. N., Drozhzhin A. P., Medvedev R. N.** Cooperativity in bubble cluster for cavitational sonoluminescence // Proc. of the 16th Intern. symp. on nonlinear acoustics (ISNA-16), Moscow, 19-23 Aug. 2002. M.: Moscow State Univ. Press, 2002. V. 2. P. 1007-1010.
5. **Vogel A., Lauterborn W., Timm R.** Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary // J. Fluid Mech. 1989. V. 206. P. 299-338.