

04;12

## Генерация и фокусировка ударно-акустических волн в жидкости многоочаговым электрическим разрядом

© В.С. Тесленко, А.И. Жуков, В.В. Митрофанов, А.П. Дрожжин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

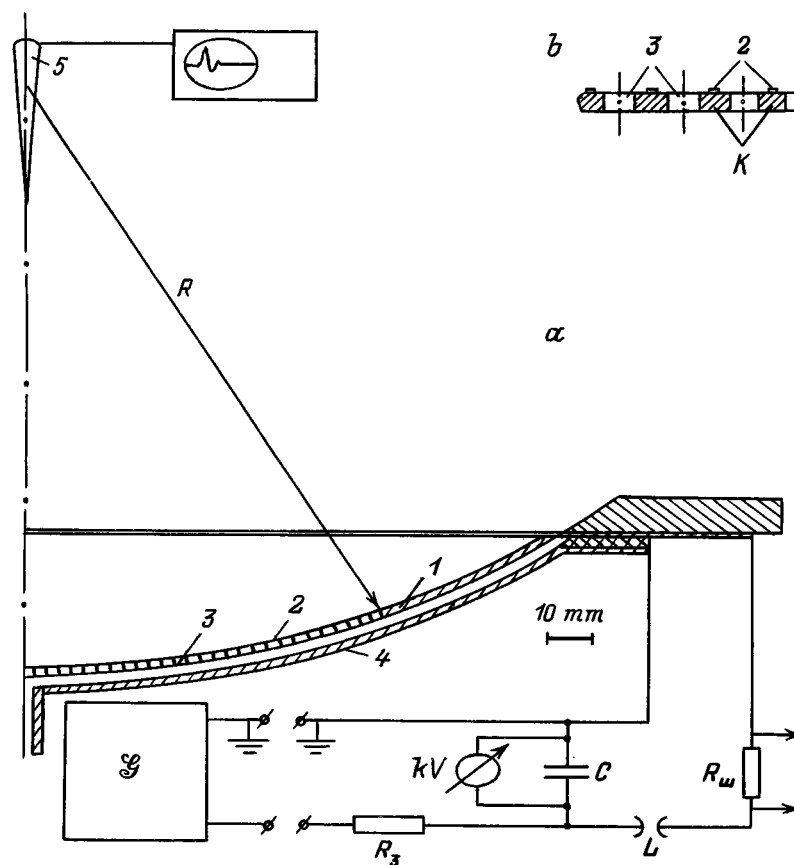
(Поступило в Редакцию 15 мая 1998 г.)

Представлены результаты исследования генерации и фокусировки ударно-акустических волн многоочаговым разрядом в электролите для сегмента сферы радиусом  $R = 170$  mm и апертурой  $D = 145$  mm. Показана перспективность разработок таких генераторов по сравнению с известными электроразрядными генераторами ударно-акустических волн.

В настоящее время генераторы ударно-акустических волн (УАВ) находят все большее применение в медицине, подводной акустике и научных исследованиях. Актуальными являются задачи о формировании коротких УАВ ( $\sim 0.1-1 \mu\text{s}$ ) заданной геометрии и в заданном пространстве. К настоящему времени существуют следующие методы генерации и фокусировки ударно-акустических волн для целей неинвазивной литотрипсии, хирургии и терапии [1,2]: с помощью точечного электрического пробоя в воде; фокусировка осуществляется

с помощью рефлектора, представляющего собой усеченную полость эллипсоида вращения (I); с помощью электромагнитного излучателя: вогнутая металлическая мембрана выталкивается электромагнитным излучением (II); с помощью пьезоэлектрических элементов, мозаично закрепленных на сегменте сферы или другом профиле (III); с помощью лазерных методов, использующих различные геометрические профили (IV).

В данной работе рассматривается возможность генерации и фокусировки ударно-акустических волн, генери-



**Рис. 1.** Схема многоочагового электроразрядного генератора ударно-акустических волн с фокусировкой (a) и увеличенный масштаб многоочагового электрода (b).

руемых многоочаговым разрядом в жидкости [3], разрядом с образованием множественных плазменных очагов, расположенных над поверхностью одного из электродов, внешней по отношению к межэлектродному пространству и открытой для излучения ударно-акустических волн. Форма этой поверхности может задаваться. В данной работе представлены первые результаты электрогидродинамических исследований для многоочагового электроразрядного излучателя в виде сегмента сферы радиусом  $R = 170$  mm и рабочей апертурой излучения  $D = 145$  mm.

Принципиальная схема постановки экспериментов представлена на рис. 1. Положительный излучающий электрод  $I$  в виде сегмента сферы с обострителями  $2$  был выполнен по специальной технологии в виде решетчатой периодической структуры в диэлектрическом каркасе  $K$  с отверстиями  $3$  ( $d = 1$  mm). Вся поверхность электрода, за исключением обострителей, покрыта диэлектриком. Обострители из стали имели в среднем площадь торца  $s \approx 0.15$  mm<sup>2</sup> и высоту  $h \approx 0.1$  mm. Расстояние между обострителями  $l \approx 3$  mm. Отрицательный электрод  $4$ , выполненный из меди в виде сферического сегмента диаметром  $D = 220$  mm, располагался снизу от пластины положительного электрода на расстоянии  $H = 4.5(\pm 0.5)$  mm. Электродная система погружалась в раствор электролита. Конденсатор емкостью  $C = 2$   $\mu$ F, заряженный от источника тока ( $Y$ ), разряжался на рабочие электроды  $I, 4$  с помощью управляемого разрядника  $L$ . Поле давлений измерялось пьезоэлектрическим датчиком из турмалина  $5$  с пространственным разрешением  $0.5$  mm и временным разрешением  $0.05$   $\mu$ s. Ток разряда контролировался с помощью малоиндуктивного шунта  $R_s = 10^{-3}$   $\Omega$  и осциллографа С-9-27 на персональном компьютере. Генерация многоочаговых разрядов осуществлялась в водном растворе поваренной соли с концентрацией 5–20% в диапазоне напряжений 1–10 kV.

На рис. 2 представлены результаты измерений амплитудных значений параметров ударно-акустических волн в фокусе для трех концентраций раствора электролита (5, 10, 20%-го NaCl) при изменении напряжения на конденсаторе до 10 kV.

Установлено, что увеличение концентрации раствора электролита приводит к уменьшению амплитуды излучаемой ударно-акустической волны. Это свидетельствует о зависимости электроакустического коэффициента полезного действия от концентрации электролита. Для малых энергий разряда на осциллограммах импульсов давления присутствует волна разрежения. При увеличении энергии разряда волна разрежения может трансформироваться в волну сжатия за счет процессов кавитации в фокальной области [4].

Сравнение данного многоочагового генератора УАВ с геометрически подобным электромагнитным генератором УАВ ( $R = 170$  mm, 9 витков, рабочий диаметр сектора  $D = 220$  mm, зазор между плоской катушкой и мембраной  $250$   $\mu$ m) при одинаковых параметрах

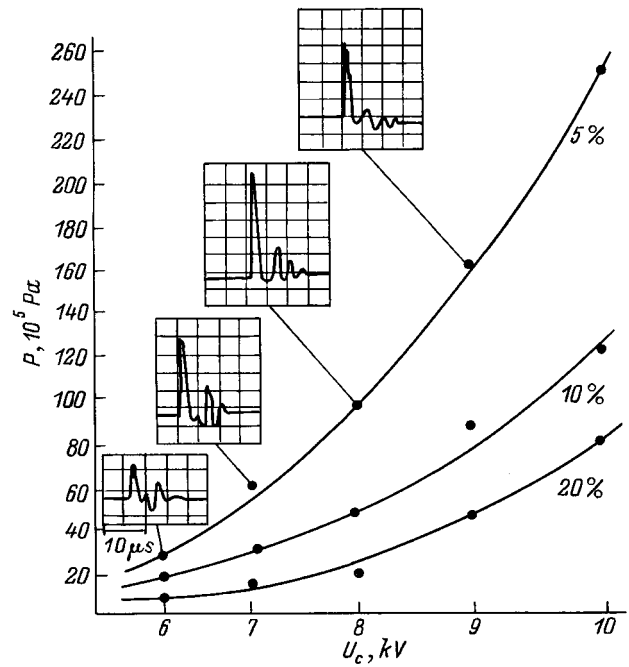


Рис. 2. Результаты измерений амплитудных значений параметров ударно-акустических волн в фокусе для трех концентраций электролита в зависимости от напряжения на конденсаторе.

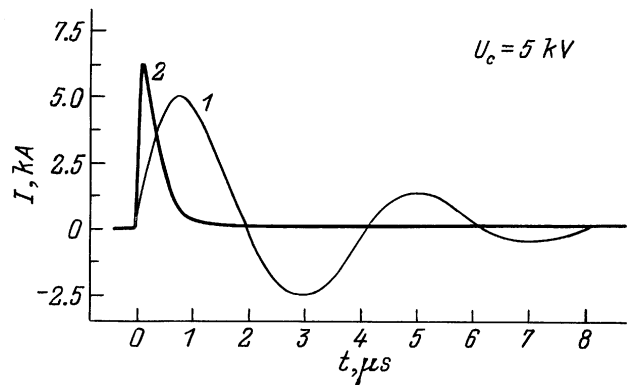


Рис. 3. Осциллограммы тока для геометрически одинаковых генераторов ударно-акустических волн при использовании одного и того же источника тока:  $1$  — электромагнитный,  $2$  — многоочаговый.

исходного источника тока и накопителя  $C$  показывает, что многоочаговый генератор УАВ имеет преимущества по сравнению с известными электроразрядными за счет возможности уменьшения времени разряда. На рис. 3 представлены осциллограммы тока для геометрически подобных генераторов, электромагнитного генератора (кривая  $1$ ) и рассматриваемого (кривая  $2$ ), для одного и того же емкостного накопителя. Из данных осциллограмм следует, что за счет смены индуктивной нагрузки на активную мы уменьшаем время разряда, а следовательно и длительность генерируемой УАВ. Отметим, что

рассматриваемый электромагнитный генератор близок к оптимальным параметрам генератора такого типа [5].

Известно, что острота фокусировки и амплитуда фокусируемой УАВ зависят от параметра  $k = D/F$  ( $F$  — фокусное расстояние), т.е. чем больше  $k$ , тем лучше фокусировка УАВ. Однако для электромагнитных генераторов УАВ увеличение параметра  $k$  (при фиксированном  $F$ ) ведет к увеличению индуктивности  $L$  ( $L \sim D$ ), что соответственно увеличивает время разряда  $\tau \sim R \cdot L \cdot C$  и длительность генерируемой УАВ. Уменьшение индуктивности электромагнитных генераторов за счет уменьшения зазора между катушкой и мембраной ограничено электрической прочностью диэлектрической прокладки. Для случая многоочагового генератора УАВ (при одинаковых накопителях  $C$ ) ситуация обратная. В данном случае для фиксированной удельной электропроводности электролита  $\gamma$  увеличение апертуры приводит к увеличению числа обострителей  $n$  и суммарной площади электродов  $S = n \cdot s$ , что и обеспечивает уменьшение активного сопротивления нагрузки  $R \approx H/(\gamma \cdot S)$ , времени разряда, а значит, и уменьшение длительности генерируемых и фокусируемых УАВ. Увеличение числа обострителей предопределяет износоустойчивость по сравнению с точечными электропробойными генераторами типа I. Дополнительно отметим, что для напряжения более 8 kV время разряда может нелинейно уменьшаться еще и за счет электрогидродинамических процессов на обострителях, но рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данного письма.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 96-02-19329.

## Список литературы

- [1] Раихенберг Х. // Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1988. Т. 78. № 9. С. 194–206.
- [2] Андриянов Ю.В., Ли А.А., Тесленко В.С. // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 1993. № 3. С. 54–61.
- [3] Тесленко В.С., Жуков А.И., Митрофанов В.В. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 18. С. 20–26.
- [4] Тесленко В.С. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 5. С. 51–56.
- [5] Андриянов Ю.В., Крючков С.П. Акустика неоднородных сред (Динамика сплошных сред 110). Новосибирск, 1995. С. 12–18.