

Нагрев фантома биологической ткани ультразвуковым пучком с обращенным волновым фронтом

А. П. Брысев¹⁾, Ф. В. Бункин, Р. В. Клопотов, Л. М. Крутянский¹⁾

Европейская ассоциированная лаборатория по нелинейной магнитоакустике конденсированных сред, Научный центр волновых исследований Института общей физики им. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 11 сентября 2012 г.

Представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие локальный нагрев поглощающей среды ультразвуковым пучком с обращенным волновым фронтом. В качестве среды использован полимерный материал – пластисол, близкий по своим акустическим свойствам к биологической ткани. Ультразвуковой нагрев величиной в 7.2°C был получен за время около 100 с в геометрии, когда образец с находящейся в нем термопарой помещался между сфокусированным пьезопреобразователем, излучавшим “пробную волну” с частотой 5.0 МГц, и системой, обращающей волновой фронт ультразвука и усиливающей его. Обсуждаются характерные особенности нагрева с помощью ультразвуковых пучков с обращенным фронтом и перспективы применения этого эффекта в медицине и других областях.

Введение. На возможность активного воздействия на среду с помощью ультразвуковых пучков с обращенным волновым фронтом указывалось еще в работе [1]. В ней была предложена и теоретически обоснована идея реализации эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) ультразвука с усилением на основе модуляции скорости звука в активной среде. К настоящему времени физические особенности генерации и распространения ультразвуковых пучков с обращенным волновым фронтом изучены уже достаточно хорошо [2]. В частности, в так называемом запороговом режиме параметрического ОВФ получено гигантское усиление обращенных ультразвуковых пучков, что обуславливает достаточно высокую их интенсивность и, как следствие, нелинейный характер последующего распространения в пассивной среде [3,4]. Однако несмотря на то, что в отдельном импульсе энергетические показатели ультразвуковых пучков, генерируемых при параметрическом ОВФ, могут быть достаточно высоки (например, интенсивность в фокусе может достигать нескольких сотен $\text{Вт}/\text{см}^2$), их средняя мощность оставалась невысокой. Это ограничивало области возможного применения интенсивных ультразвуковых пучков с обращенным фронтом лишь приложениями в нелинейной акустоскопии и диагностике жидких сред [5–7] и не позволяло реализовать приложения, требующие большого энерговыклада (например гипертермия тканей в медицине).

В настоящей работе впервые сообщается об экспериментальном наблюдении нагрева поглощающей среды с помощью ультразвуковых пучков с параметрически обращенным фронтом.

Экспериментальная установка и методика измерений. Схема эксперимента, проводившегося в водном бассейне, достаточно проста (рис. 1). В фо-

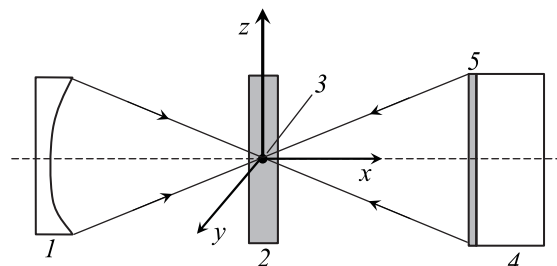


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента: 1 – сфокусированный ультразвуковой преобразователь, 2 – образец из пластисола, 3 – термопара, 4 – обращающий ферритовый элемент, 5 – четвертьволновой согласующий слой. Тонкими стрелками и сплошными линиями условно показаны направление и границы акустического поля падающего и обращенного ультразвуковых пучков

кальной плоскости сфокусированного ультразвукового преобразователя 1 с центральной частотой 5.0 МГц и фокусным расстоянием 80 мм (модель М307, производство Panametrics) находился образец 2 (диск толщиной 10 мм и диаметром 42 мм, выполненный из полимерного материала – пластисола, производство компании MF-manufacturing Co., USA). Пластисол достаточно хорошо имитирует акустические характеристики биологической ткани. Скорость звука при комнатной температуре в образце составляет $c_0 = (1380 \pm 5)$ м/с, коэффициент поглощения ультразвука на частоте 2 МГц $\alpha = (0.13 \pm 0.01)$ см^{-1} , плотность $\rho_0 = 980$ $\text{кг}/\text{м}^3$. В центр образца была введена термопара 3 типа ТХА диаметром 0.5 мм. Опорный спай термопары находился в кювете с водой, помещенной в толстостенный футляр из пенопласта, так

¹⁾ e-mail: krut@orc.ru; brysev@orc.ru

что его температуру за время измерений можно было считать постоянной. Образец с термопарой был закреплен на трехкоординатной позиционирующей системе Velmex Bislidе. По другую сторону от образца симметрично преобразователю и на одной оси с ним находился рабочий торец цилиндрического ферритового обращаемого элемента 4. С целью уменьшения акустических потерь на границе вода–феррит на поверхность обращаемого элемента был нанесен четвертьволновый согласующий полимерный слой 5. Как было показано в [8], это повышает амплитуду обращенного ультразвукового пучка в фокусе более чем в 2 раза. Принцип функционирования и устройство параметрических систем ОВФ ультразвука описаны, например, в [2, 9]. Используемая в данной работе конструкция системы ОВФ отличается от всех предыдущих более высоким уровнем электроизоляции катушки накачки и наличием принудительного воздушного охлаждения обращаемого ферритового элемента.

Возбуждение ультразвукового преобразователя осуществлялось радиоимпульсами с несущей частотой 5.0 МГц и длительностью 60 мкс, создаваемыми генератором Tektronix AFG 3102. Между генератором и преобразователем были включены усилитель с номинальной выходной мощностью 6 Вт и согласующий трансформатор. С помощью второго канала этого же генератора осуществлялось возбуждение системы параметрической накачки. Импульсы накачки имели несущую частоту 10 МГц и длительность 320 мкс и были задержаны относительно сигнала возбуждения преобразователя на время, требующееся для распространения звука по бассейну от преобразователя до системы ОВФ. Максимальная частота повторений рабочего цикла всей системы достигала 400 Гц.

Напряжение на термопаре измерялось с помощью цифрового вольтметра Agilent 34401A с частотой 10 раз в секунду. Переданные в компьютер данные переводились в значения относительной температуры, усреднялись по четырем значениям, что обеспечивало точность измерений $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, и записывались в файл как зависимость температуры нагрева от времени наблюдения.

В качестве окончательного усилителя радиоимпульсов накачки использовалась модель OM3500HF производства компании OM-POWER. На частоте 10 МГц его выходная мощность составляла до 3.5 кВт в непрерывном режиме. Через кабель и согласующий контур эта мощность подавалась на катушку накачки, намотанную вокруг ферритового элемента.

Предварительные измерения параметров обращенного ультразвукового пучка проводились в воде

без образца с помощью широкополосного звукопрозрачного мембранного PVDF-гидрофона (GEC Magsoni) с диаметром пьезоактивной зоны 0.5 мм. Гидрофон закреплялся на позиционирующей системе. Падающий и обращенный импульсы разделялись по времени прихода сигнала. Результаты этих измерений показали, что при указанных выше параметрах возбуждения ультразвука и параметрической накачки генерируется сфокусированный обращенный ультразвуковой пучок, имеющий в воде импульсную мощность 4.5 Вт и среднюю мощность 0.18 Вт. Его распространение в воде оказалось существенно нелинейным, сопровождаясь генерацией множества высших гармоник. При этом максимальный пиковый перепад нелинейного профиля давления в фокусе составила 10 МПа, а интенсивность 176 Вт/см^2 . Как известно [10], именно в таком сильно нелинейном режиме нагрев среды ультразвуком происходит наиболее эффективно за счет более эффективного поглощения энергии высших гармоник.

Результаты и их обсуждение. Полученные оценки энергетических параметров ультразвукового пучка с обращенным фронтом, достижимых при описанном выше приборном оснащении, позволили провести эксперимент по нагреву поглощающей среды из пластисола. Результат, показавший максимальный нагрев в $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за время порядка 100 с при периоде следования импульсов обращенных волн 2.5 мс и их характерной длительности $\sim 100\text{ мкс}$, представлен на рис. 2. Термопара при этом находилась в точ-

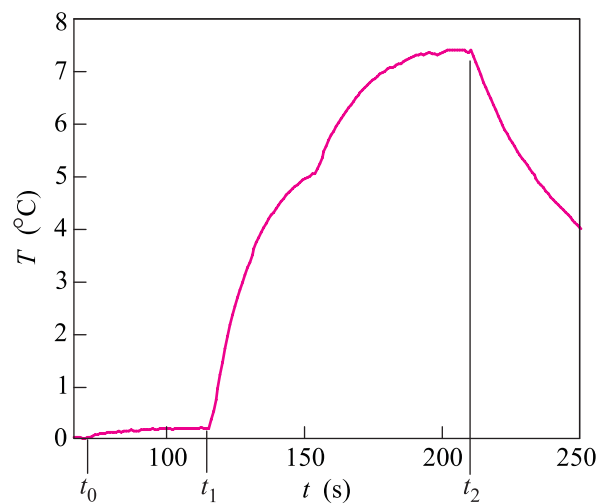


Рис. 2. Зависимость температуры ультразвукового нагрева пластисола от времени при положении спая термопары в фокусе (t_0 – момент включения падающего ультразвукового пучка, t_1 – момент включения системы параметрического ОВФ ультразвука, t_2 – момент выключения системы ОВФ)

ке фокуса. На зависимости температуры нагрева от времени выделяется несколько характерных областей. В промежутке времени от 0 до t_0 никакие источники ультразвука не включены. В интервале от t_0 до t_1 включен источник падающей ультразвуковой волны и наблюдается небольшой (не превышающий 0.2°C) нагрев образца этой волной. В момент времени t_1 включается система ОВФ ультразвука и происходит нагрев образца интенсивным сфокусированным ультразвуковым пучком с обращенным волновым фронтом. Максимальная скорость нагрева составляет $0.24^\circ\text{C}/\text{с}$. Температура сначала быстро растет, а затем (вблизи 5°C) нагрев замедляется. Причиной этого является постепенный выход системы возбуждения магнитного поля накачки из резонансного режима вследствие проявляющегося при высокой мощности накачки разогрева ферритового обрабатываемого элемента. После коррекции настройки системы ОВФ, произведенной на 150-й секунде, скорость прироста температуры образца вновь повышается. На двухсотой секунде эксперимента нагрев пластисола достигает своего максимума в 7.2°C (относительно значения нагрева при $t = t_1$), уже не зависящего от подстройки системы. Далее следует участок с постоянной температурой, на котором приток тепла, вызванный поглощением ультразвука, уравновешивается его оттоком вследствие тепловой диффузии. В момент времени t_2 система параметрического ОВФ ультразвука выключается, нагрев прекращается и температура падает по экспоненте.

Отметим, что присутствие термопары в области фокальной перетяжки ультразвуковых пучков слабо сказывается на прозрачности акустического тракта. Поперечный размер фокальной перетяжки падающего ультразвукового пучка, составляющий 2.6 мм (по первым нулям распределения), в пять раз превышает поперечный размер термопары. При длине ультразвуковых волн в образце 0.3 мм имеет место сильная дифракция на термопаре, что препятствует образованию за ней заметной ультразвуковой "тени" на апертуре системы ОВФ.

Характерные размеры области источников ультразвукового нагрева можно оценить исходя из распределения интенсивности акустического поля обращенного пучка в фокальной области, которое было измерено в ходе предварительных экспериментов. В поперечнике это распределение составило 0.9 мм, а в длину – порядка 31 мм (по уровню -6 дБ).

Заключение. Полученный результат впервые экспериментально продемонстрировал возможность активного воздействия на среду (в данном случае ее нагрев) с помощью интенсивных ультразвуковых пучков с параметрически обращенным волно-

вым фронтом. В сочетании со свойством обращенных волн компенсировать возникающие в акустическом тракте фазовые искажения, включая и случай нелинейного волнового распространения, обеспечивается концентрация значительной ультразвуковой энергии в желаемой области без использования каких-либо дополнительных фокусирующих систем. Достигнутая величина нагрева фантома биологической ткани (7.2°C) позволяет надеяться, что данной метод может оказаться перспективным в плане использования, например, в ультразвуковой гипертермии в медицине. Как известно, ультразвуковой нагрев злокачественных образований до $42\text{--}45^\circ\text{C}$ приводит к гибели раковых клеток [11, 12]. При этом минимизировать ультразвуковое воздействие на здоровые ткани, чему в значительной степени может способствовать эффект ОВФ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант # 11-02-00779а), а также гранта поддержки ведущих научных школ (# НШ-214.2012.2). Авторы выражают благодарность доценту кафедры акустики МГУ к.ф.-м.н. В.Г. Андрееву за любезно предоставленный им пластисол.

1. Ф. В. Бункин, Д. В. Власов, Ю. А. Кравцов, Кв. эл-ка **8(5)**, 1144 (1981).
2. А. П. Брысев, Л. М. Крутянский, В. Л. Преображенский, УФН **168(8)**, 877 (1998).
3. K. V. Cunningham, M. F. Hamilton, A. P. Brysev, and L. M. Krutyansky, J. Acoust. Soc. Am. **109**, 2668 (2001).
4. A. P. Brysev, L. M. Krutyansky, and V. L. Preobrazhensky, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics/Supplement Physics of Vibrations **9(1)**, 52 (2001).
5. A. Brysev, F. Bunkin, L. Krutyansky et al., IEEE TUFFC **49(4)**, 409 (2002).
6. А. П. Брысев, Л. М. Крутянский, Ф. Перно, В. Л. Преображенский, Акуст. журн. **50(66)**, 725 (2004).
7. V. Preobrazhensky, P. Pernod, Yu. Pylnov et al., Nonlinear Acoustic Imaging of Isoechogenic Objects and Flows Using Ultrasound Wave Phase Conjugation. Acta Acustica united with Acustica **95(1)**, 36 (2009).
8. A. P. Brysev, R. V. Klopotov, L. M. Krutyansky et al., Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics/Supplement Physics of Vibrations **10(3)**, 121 (2002).
9. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Л. М. Крутянский и др., Акуст. журн. **43(2)**, 244 (1997).
10. О. А. Сапожников, Т. В. Синоло, Изв. Академии наук. Сер. физ. **62(12)**, 2371 (1998).
11. В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов, *Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами* (под ред. С. И. Щукина), М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005, 224 с.
12. *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* (под ред. К. Хилла, Дж. Эмбера, Г. тер Хаар), М.: Физматлит, 2008, 540 с.