

Нагрев поглощающей среды ультразвуковым пучком с параметрически обращенным волновым фронтом

Р. В. Клопотов, Л. М. Крутянский,* А. П. Брысев†

Международная Ассоциированная Лаборатория критических и сверхкритических явлений в функциональной электронике, акустике и флюидике,

Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

(Статья поступила 19.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Приведены результаты экспериментов по нагреву поглощающей среды ультразвуковым пучком с параметрически обращенным волновым фронтом. В качестве нагреваемой среды использовался полимер, близкий по акустическим свойствам к биоткани. С помощью термпарных измерений продемонстрированы преимущества реализованного метода нагрева, возникающие за счет использования обращения волнового фронта: самонаведение ультразвукового пучка на нагреваемую область, и низкая зависимость параметров нагрева от положения или движения образца в определенной области. При этом, величина нагрева в экспериментах составила до 8°C за время порядка 100 с.

PACS: 43.58.+z

УДК: 534.222.2

Ключевые слова: ультразвук, обращение волнового фронта, нагрев среды, полимерный фантом биоткани.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи активного воздействия на среду ультразвуковых пучков, получаемых при параметрическом обращении волнового фронта (ОВФ) в акустике обсуждались еще в самых первых работах на эту тему (см. напр. [1]). Однако, несмотря на то, что к настоящему времени физические особенности параметрической генерации и нелинейного распространения ОВФ-пучков изучены уже достаточно хорошо [2–4], отсутствие источников параметрической накачки с высокой средней мощностью тормозило исследования по генерации фазосопреженных ультразвуковых пучков с энерговкладом, достаточным для их применения, например, в гипертермии биотканей. И только сравнительно недавно, когда началось производство доступных промышленных усилителей с выходной мощностью более 1 кВт в диапазоне 1–30 МГц, стало возможным начать работы в указанном направлении. В настоящей работе сообщается о результатах экспериментального исследования возможностей нагрева поглощающей среды с помощью ультразвуковых пучков с параметрически обращенным фронтом.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились в два основных этапа. На первом использовалась более простая в реализации схема «на прохождение», представленная на рис. 1.

В водном бассейне в фокальной плоскости

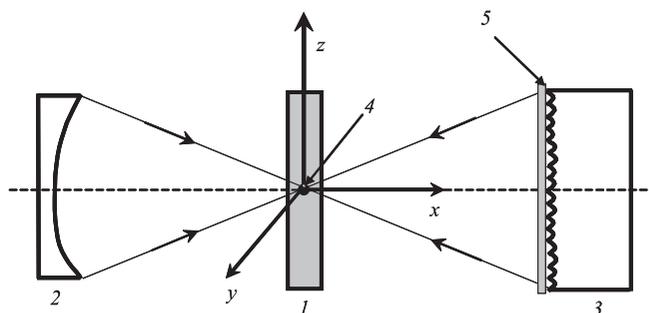


Рис. 1: Упрощенная схема экспериментов первого этапа. 1 — образец, 2 — сфокусированный ультразвуковой преобразователь, 3 — отражающий ферритовый элемент, 4 — термпара, 5 — четвертьволновый согласующий слой или профилированная поверхность феррита. Тонкими стрелками и сплошными линиями условно показано направление и границы акустического поля падающего и обращенного ультразвуковых пучков

сфокусированного ультразвукового преобразователя с центральной частотой 5,0 МГц и фокусным расстоянием 80 мм (2) (модель М307, производство Panametrics) находился образец (1) в виде диска толщиной 10 мм и диаметром 42 мм, выполненный из материала, приготовленного полимеризацией раствора пластисола, производства компании MF-manufacturing Co. Получаемый таким образом желеобразный материал близок по своим акустическим свойствам к воде и биологическим тканям, и потому часто используется при тестировании ультразвукового оборудования в качестве фантомов тканей живого организма. 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 $\rho_0 = 980$ кг/м 3 . В центр образца была введена малоинерционная термпара К-типа диаметром 0,5 мм (4). Опорный спай тер-

*E-mail: leonid.krut@gmail.com

†E-mail: brysev@ya.ru

мопары находился в кювете с водой, помещенной в толстостенный футляр из пенопласта, так что его температуру за время измерений можно было считать постоянной. Образец с термопарой закреплялся на трехкоординатной позиционирующей системе Velmex BiSlide. По другую сторону от образца симметрично преобразователю и на одной оси с ним находился рабочий торец цилиндрического ферритового обрабатываемого элемента (3). Принцип функционирования и устройство параметрических систем ОВФ ультразвука описаны, например, в [2, 5]. Используемая в данной работе конструкция системы ОВФ отличается от всех предыдущих более высоким уровнем электроизоляции катушки накачки и наличием принудительного воздушного охлаждения обрабатываемого ферритового элемента.

Отметим, что присутствие термопары в области фокусировки 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, и 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.

Эксперименты по нагреву на первом этапе были проведены с двумя образцами феррита, отличающимися как по своему составу (а значит и по динамике параметрического ОВФ ультразвука в них [6]), так и по виду рабочей поверхности. В первом из них, с целью повышения интенсивности ультразвука в зоне нагрева в параметрической системе ОВФ ультразвука использовался ферритовый элемент с четвертьволновым согласующим слоем (5), повышающим акустическую прозрачность границы жидкость–феррит. При ОВФ сфокусированных ультразвуковых пучков такой слой дает заметный (более, чем в вдвое) выигрыш в амплитуде звукового давления в фокусе по сравнению со случаем «непросветленной» плоской рабочей поверхности ферритового элемента [7]. Вместе с тем, одновременно наблюдается и повышенный уровень боковых лепестков в фокальном распределении акустического поля. Альтернативой указанным двум видам рабочих поверхностей обрабатываемого ферритового элемента является профилированная поверхность. Обрабатываемый элемент с такой рабочей поверхностью позволяет реализовать ОВФ с высоким качеством за счет наиболее равномерного преобразования различных компонент пространственного спектра падающего пучка [8]. Поэтому в качестве второго обрабатываемого элемента был использован ферритовый образец с профилированной рабочей поверхностью (5).

Возбуждение ультразвукового преобразователя осуществлялось радиоимпульсами с несущей частотой 5,0 МГц и длительностью 60 мкс, создаваемыми генератором Tektronix AFG 3102. Между генератором и преобразователем был включен усилитель с но-

минальной 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, длительность 320 мкс и были задержаны относительно сигнала возбуждения преобразователя на время, требуемое для распространения звука по бассейну от преобразователя до системы ОВФ. Максимальная частота повторений рабочего цикла всей системы достигала 400 Гц. Оконечный усилитель радиоимпульсов накачки OM3500HF производства компании OM-POWER мог передавать в нагрузку мощность 3,5 кВт в непрерывном режиме на частоте 10 МГц. Через кабель и согласующий контур импульсы накачки подавались на катушку, намотанную вокруг ферритового элемента.

Напряжение на термопаре измерялось с помощью 6,5-разрядного цифрового вольтметра Agilent 34401A с частотой 10 раз в секунду. Переданные в компьютер данные переводились в значения относительной температуры, усреднялись по 4 значениям, что обеспечивало точность измерений 0,02 °С, и записывались в файл как функция температуры нагрева от времени наблюдения.

Предварительные измерения параметров обращенного ультразвукового пучка проводились в воде без образца с помощью широкополосного звукопрозрачного мембранного PVDF-гидрофона (GEC Marconi) 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 — 0,18 Вт. Его распространение в воде было существенно нелинейным, сопровождаясь генерацией множества высших гармоник. При этом максимальная пиковая амплитуда перепада нелинейного профиля давления в фокусе составила 10 МПа, а интенсивность — 176 Вт/см². Как было показано в [9] для импульсно-периодических сигналов в условиях заданной средней мощности в таком сильно нелинейном режиме нагрев среды происходит эффективней за счет высокого поглощения энергии гармоник.

На втором этапе использовалась схема «на отражение» (рис. 2), более сложная в реализации, но и в большей степени приближенная к реальным условиям применения фазосопряженных ультразвуковых пучков, чем схема «на прохождение». В схеме «на отражение» в наиболее показательной форме реализуется преимущество использования ОВФ для ультразвукового нагрева среды, состоящее в самосогласованной фокусировке обращенной волны на небольшой отражающий объект, находящийся внутри поглощающей жидкоподобной среды и облучаемый широким зондирующим пучком.

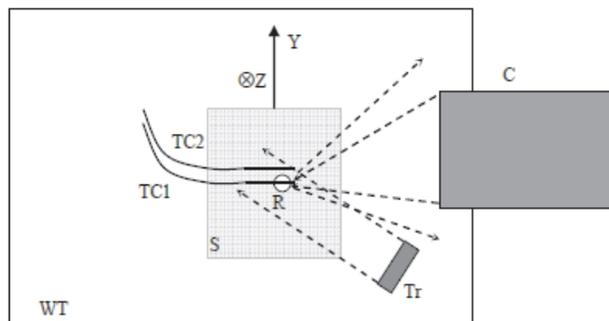


Рис. 2: Упрощенная схема эксперимента. S — образец, R — воздушная полость, TC1, TC2 — термопары, Tr — плоский излучатель, C — параметрическое устройство ОВФ, Y и Z — оси системы позиционирования, WT — бассейн с водой. Штриховыми стрелками условно показаны направления распространения ультразвуковых пучков

Основные отличия в постановке и проведении экспериментов второго этапа состояли в следующем. Аналогичный предыдущему полимерный образец имел форму цилиндра диаметром 67 мм и высотой 36 мм. Внутри образца, примерно в его середине, находилась воздушная полость по форме близкая к сфере с диаметром ~ 6 мм, игравшая роль небольшого хорошо отражающего звук объекта. Направленный в сторону объекта плоский пьезоэлектрический преобразователь диаметром 9 мм возбуждался радиопульсами с несущей частотой $f_s = 4,75$ МГц и длительностью около 50 мкс. Часть отраженного от полости акустического поля попадала в активный обращаящий элемент системы ОВФ. С учетом результатов, полученных на первом этапе, на втором использовался ферритовый обращаящий элемент, имеющий рифленую рабочую поверхность. Его рабочая грань вводилась в бассейн через стенку и находилась на расстоянии ~ 100 мм от нагреваемого образца. Усиленный и обращенный ультразвуковой пучок распространялся в обратном направлении и самосогласованным образом фокусировался на объект в силу фундаментальных свойств обращенных волн.

Контроль температуры осуществлялся с помощью двух термопар, введенных в образец с тыльной стороны. С учетом экспериментальной конфигурации, и небольшого диаметра термопар (0,5 мм) рассеянием падающего на них поля можно было пренебречь в сравнении с рассеянием на объекте.

С помощью первой термопары, введенной в образец через центр полости, измерялся нагрев среды в зоне фокусировки обращенной волны. При этом чувствительный передний край термопары выступал на 2 мм из полости в сторону обращаяющей системы. Вторая термопара размещалась параллельно первой на расстоянии 7 мм от нее и служила для контроля локализации нагрева. Измерения зависимости значений двух термоэдс от времени обеспечивались вольтметром, со-

единенным с термопарами через двухканальный аналоговый коммутатор. Управление коммутатором, вольтметром, первичная обработка и накопление массива данных осуществлялось с помощью компьютера в среде LabView. В указанных условиях интервал времени между получаемыми последовательными измерениями для каждой термопары составлял 1,6 с, временной сдвиг между каналами измерения температуры равнялся 0,8 с, а погрешность измерений относительного нагрева не превосходила $0,02^\circ\text{C}$.

Амплитуда падающего плоского пучка в экспериментах специально выбиралась настолько малой, чтобы это излучение не приводило к сколько-нибудь заметному нагреву термопар.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость нагрева образца, полученная на первом этапе при использовании ферритового элемента с акустически согласованной рабочей поверхностью, представлена на рис. 3а. Под нагревом в данном случае понимается прирост температуры относительно установившегося значения, определяемого температурой воды в бассейне (18°C).

Максимальный нагрев в $7,2^\circ\text{C}$ получен за время порядка 100 с при периоде следования импульсов обращенных волн 2,5 мс и их характерной длительности ~ 100 мкс. Термопара при этом находилась в точке фокуса. На графике зависимости температуры нагрева от времени можно выделить несколько характерных областей. В промежутке времени от $t = 0$ до $t = t_0$ никакие источники ультразвука не включены. В интервале от $t = t_0$ до $t = t_1$ включен источник падающей ультразвуковой волны, и наблюдается небольшой (не превышающий $0,2^\circ\text{C}$) нагрев образца этой волной. В момент времени $t = t_1$ 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, затем, вблизи 5°C нагрев замедляется. Причина этого — в постепенном выходе системы возбуждения магнитного поля накачки из резонансного режима вследствие проявления разогрева при высокой мощности накачки разогрева ферритового обращаяющего элемента. После коррекции настройки системы ОВФ, произведенной на 150-ой секунде, скорость прироста температуры образца вновь повышается. На двухсотой секунде эксперимента нагрев достигает своего максимума в $7,2^\circ\text{C}$ (относительные 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 $t = t_2$ система параметрического ОВФ ультразвука выключается, нагрев прекращается, и темпера-

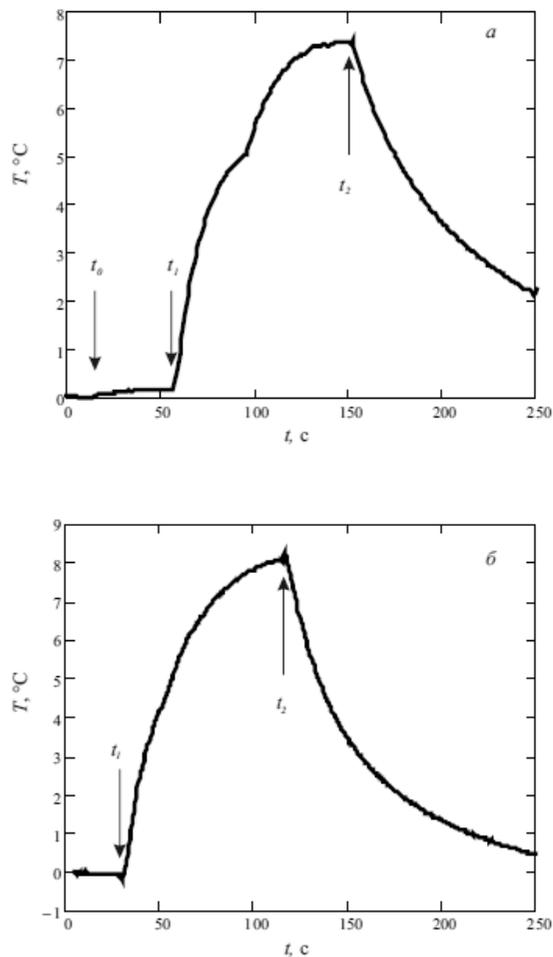


Рис. 3: Зависимость температуры ультразвукового нагрева образца от времени при положении спая термодары в фокусе. а) обрабатывающий ферритовый элемент с акустически согласованной рабочей поверхностью, б) обрабатывающий ферритовый элемент с профилированной рабочей поверхностью. t_0 — момент включения падающего ультразвукового пучка, t_1 — момент включения системы параметрического ОВФ ультразвуку, t_2 — момент выключения системы ОВФ

тура падает по экспоненте.

Динамика нагрева в образце при использовании элемента с профилированной рабочей поверхностью, показана на рис. 3б. При этом термодара находилась в точке фокуса, период следования импульсов обращенных волн равнялся 2,0 мс, а их характерная длительность ~ 100 мкс. Максимальная скорость нагрева составляет $0,42^\circ\text{C}/\text{с}$. На сто седьмой секунде от начала эксперимента нагрев достигает своего максимума в $8,0^\circ\text{C}$

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 ~ 31 мм (по уровню -6 дБ).

Сравнительный анализ, полученных на первом этапе результатов по уровню и времени нагрева одного и того же образца, позволяет сделать вывод о том, использование обрабатывающих элементов с профилированной рабочей поверхностью оказывается более предпочтительным, чем использование элементов с «просветленной» рабочей поверхностью. Заведомо более высокое качество ОВФ, обеспечиваемое первыми, является крайне важным для медицинских приложений рассматриваемого эффекта. Дополнительными доводами в пользу использования профилированной поверхности являются также ее большая долговечность и стойкость к механическим воздействиям в сравнении с «просветленной» поверхностью, меньшие трудозатраты и более простая технология при ее изготовлении. С учетом этих факторов для экспериментов второго этапа был выбран ферритовый элемент с профилированной рабочей поверхностью.

Таким образом, полученные на первом этапе результаты показали возможность экспериментальной реализации активного воздействия на среду — в данном случае ее нагрев, с помощью интенсивных ультразвуковых пучков с параметрически обращенным волновым фронтом. Целью второго этапа являлась экспериментальная демонстрация ультразвукового нагрева объекта с помощью обращенных волн без использования каких-либо фокусирующих систем.

Зависимости величины нагрева, регистрируемого в схеме «на отражение» в образце с воздушной полостью, от времени приведены на рис. 4.

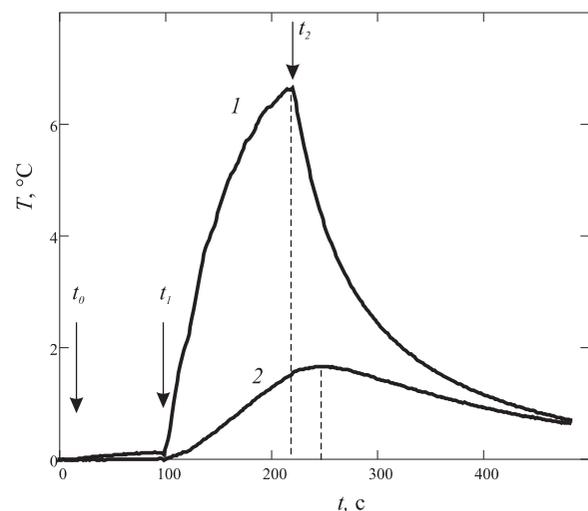


Рис. 4: Зависимость нагрева термодар от времени. 1,2 — номера термодар. t_0 — момент включения системы в режиме малой частоты повторения циклов, t_1 — момент включения высокой частоты повторения циклов, t_2 — момент выключения накачки. Штриховыми вертикальными линиями показаны моменты достижения максимальной температуры

В интервале времени от 0 до 100 с установка работала в режиме очень большой скважности (>1000), т.е. малой средней мощности, что было необходимо

для точной настройки согласующих электрических цепей в канале усилителя мощности накачки. В момент $t_0 = 10$ с включалась ОВФ-система, что вызвало небольшой нагрев находящейся у объекта первой термопары. Через 80–90 с температура этого нагрева стабилизировалась. В момент $t_1 = 100$ с включался рабочий режим ультразвукового нагрева образца с периодом повторения 4 мс. В момент $t_2 = 220$ с параметрическая накачка была выключена, и, соответственно, с этого момента нагрев среды обращенным пучком прекращался.

Представленные на рис. 4 кривые отражают существенное различие характера наблюдаемого нагрева вблизи полости и на расстоянии 7 мм от ее центра. Помимо того, что первая термопара фиксирует значительно больший нагрев ($6,5^\circ\text{C}$ против $1,6^\circ\text{C}$), у второй кривой наблюдается отставание во времени, характерное для нагрева за счет теплопроводности. При выключении обращенной волны температура перед объектом сразу же начинает экспоненциально падать, в то время как вторая термопара еще около 30 с продолжает фиксировать нагрев. Начальные стадии нагрева также различаются. Если перед полостью скорость нарастания температуры максимальна в момент включения t_1 , и потом неуклонно падает, что характерно для нагрева за счет поглощения энергии ультразвука средой при наличии теплообмена, то на второй термопаре, наоборот, скорость нагрева возрастает от малых значений, проходит через максимум и потом снова уменьшается. Перечисленные особенности подтверждают, что ультразвуковой пучок с обращенным фронтом действительно фокусируется на объект вблизи термопары (1) и вызывает в этой области локальный нагрев среды за счет поглощения ультразвука. Находящаяся в стороне от объекта вторая термопара фиксирует нагрев, обусловленный преимущественно теплопроводностью.

Для того, чтобы получить определенное представление о получаемом в данном эксперименте распределении поля температур внутри образца, вторая термопара размещалась в различных положениях по оси Y . Затем, после соответствующих измерений ультразвукового нагрева, выбирались значения температуры, даваемые термопарой (2) в момент времени $t_2 = 220$ с. На рис. 5 показана полученная таким образом зависимость показаний второй термопары от ее смещения ΔY от центра полости.

Как видно, рассматриваемая зависимость имеет выраженный максимум при $\Delta Y = 0$, монотонно спадая с ростом смещения ΔY .

Для демонстрации сохранения свойства самосогласованности локального нагрева был проведен эксперимент, в котором образец вместе с находящейся в нем полостью и термопарами медленно перемещался в процессе измерений вдоль оси Z (см. рис. 2). В данном случае под медленным понимается движение, при котором за один цикл распространения импульсов звуковых волн во всем акустическом тракте объект смещается незначительно по сравнению с размером обла-

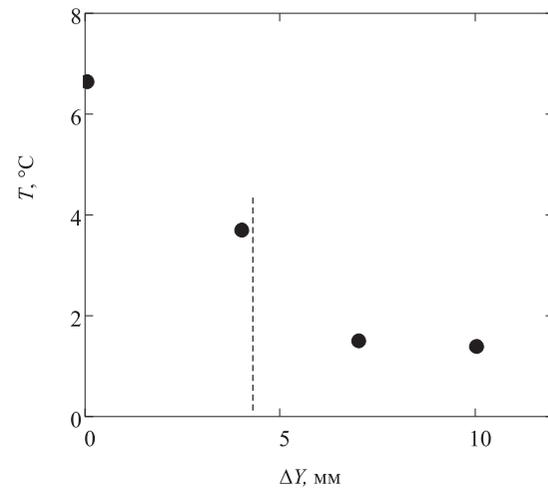


Рис. 5: Величина нагрева при $t_2 = 220$ с в зависимости от расстояния до центра полости. Штриховой линией условно обозначена граница полости

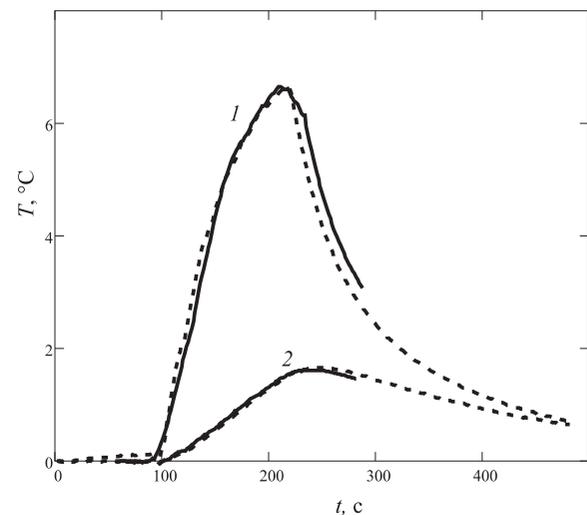


Рис. 6: Сравнение температурных зависимостей нагрева для неподвижного объекта (штриховые линии) и для перемещающегося объекта от $Z = -3$ мм до $Z = 3$ мм (сплошные линии). 1, 2 — номера термопар

сти фокусировки пучка. Такое медленное перемещение осуществлялось в диапазоне от $Z = -3$ мм до $Z = 3$ мм, где за $Z = 0$ принято положение геометрической оси падающего плоского пучка. Движение начиналось и заканчивалось одновременно с действием рабочего режима нагрева, который, как и в экспериментах с неподвижным образцом, длился от момента $t_1 = 100$ с до момента $t_2 = 220$ с. Результат этого эксперимента показан на рис. 6 в сравнении с представленным ранее случаем неподвижного объекта, находящегося в точке $Z = 0$ (рис. 4).

Как и ожидалось, зависимости для движущегося образца мало отличаются от тех, что были получены для неподвижного. Таким образом, можно считать, что

за счет самосогласованной фокусировки обращенного пучка динамика и локальность вызванного им ультразвукового нагрева образца слабо зависят в определенном диапазоне от его перемещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов реализован локальный нагрев поглощающей среды за счет автоматической фокусировки интенсивных пучков обра-

щенных волн. В схеме «на отражение» фокусировка реализована на небольшой отражающий звук объект, находящийся в этой среде в поле плоской падающей волны. Локальный нагрев наблюдался в равной степени, как на неподвижном, так и на медленно перемещающемся в пределах апертуры падающего пучка объекте.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента России поддержки ведущих научных школ № НШ-4484.2014.2.

-
- [1] Бункин Ф.В., Власов Д.В., Кравцов Ю.А. Кв. эл-ка. **8**, В. 5. С. 1144. (1981).
- [2] Брысев А.П., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л. УФН. **168**, № 8. С. 877. (1998).
- [3] K. B. Cunningham, M. F. Hamilton, A. P. Brysev, and L. M. Krutyansky. J. Acoust. Soc. Am. **109**, P. 2668. (2001).
- [4] А.П. Брысев, Л.М. Крутянский, Ф. Перно, В.Л. Преображенский. Акуст. журн. **50**, № 6. С. 725. (2004).
- [5] Брысев А.П., Бункин Ф.В., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л., Пыльнов Ю.В., Стаховский А.Д. Акуст. журн. **43**, № 2. С. 244. (1997).
- [6] Brysev A., Pernod P., Preobrazhensky V. Ultrasonics. **38**, P. 834. (2000).
- [7] A.P. Brysev, R.V. Klopotov, L.M. Krutyansky, P. Pernod, V.L. Preobrazhensky. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics Supplement Physics of Vibrations. **10**, № 3. P. 121. (2002).
- [8] Брысев А.П., Крутянский Л.М. Акуст. журн. **46**, № 4. С. 447. (2000).
- [9] О.А. Сапожников, Т.В. Синило. Известия Академии наук. Сер. физ. **62**, № 12. С. 2371. (1998).

Heating of an absorbing medium by parametrically phase conjugated ultrasound beam

R.V. Klopotov, L.M. Krutyansky^b, A.P. Brysev^a

International Associated Laboratory on Critical and Supercritical Phenomena in Functional Electronics, Acoustics, and Fluidics (LICS),

Wave Research Center, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
38, Vavilova str., Moscow, 119991 Russia

E-mail: ^abrysev@ya.ru, ^bleonid.krut@gmail.com

Experimental results on heating of an absorbing medium by parametrically conjugated ultrasound beam are reported. A polymer with acoustic parameters close to those of biological tissues was used for heating. Advantages of the developed method due to phase conjugation phenomenon are demonstrated by means of thermocouple measurements: automated targeting of an ultrasonic beam on the area of heating, and weak impact of the sample's position or its movement in some limits on the warming process. The value of heating achieved 8°C within about 100 s.

PACS: 43.58.+z

Keywords: ultrasound, wave phase conjugation, heating of medium, polymer phantom of a biotissue.

Received 19.11.2014.

Сведения об авторах

1. Клопотов Роман Владимирович — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, тел.: (499) 503-87-57, e-mail: roman@autodela.ru .
2. Крутянский Леонид Михайлович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, тел.: (499) 503-87-57, e-mail: leonid.krut@gmail.com.
3. Брысев Андрей Петрович — докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, тел.: (499) 503-87-57, e-mail: brysev@ya.ru.