

5. *Петросьянц В.В.* Теория и методики расчета полупроводниковых преобразователей с дозирующим последовательным резонансным контуром: монография/В.В. Петросьянц. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 190 с.

Петросьянц Виктор Владимирович

Институт радиоэлектроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного технического университета.

E-mail: petrosyantsvv@mail.ru.

690950, г. Владивосток, Аксаковский переулок, 3а, тел.: (4232)450982.

Директор, профессор, д.т.н.

Petrosyants Victor Vladimirovich

Far Eastern National Technical University, Institute of Radio electronics, Information Science and Electrical Engineering.

E-mail: petrosyantsvv@mail.ru.

3a, Axakovsky pereulok, Vladivostok, 690950, Russia, Phone: (4232)450982.

Director, professor, Doctor Eng. Sc.

УДК 534

В.Н. Романова, В.К. Яценко, А.М. Орлова

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА
В СФОКУСИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ
ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО УРОВНЯ**

Исследуются тепловые поля, возникающие при поглощении ультразвука в жидкости. Разрешающая способность по температуре не хуже 0,01 C°. Размер пикселя не более 1×1 мм. Показано, что существенный вклад в теплообмен вносят потоки эйккартовского типа. Изменение условий их возникновения меняет распределение температур.

Тепловое поле; ультразвуковой излучатель; эйккартовские потоки; терапия.

V.N. Romanova, V.K. Yatsenko, A.M. Orlova

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE TERMOEXCHANGE IN A FOCUSED
FIELD AT THERAPEUTIC LEVEL OF ULTRASOUND**

A thermal fields appeared at ultrasound absorption in a fluids are studied. The temperature of the experiment resolution was not worse than 0.01 C°. Pixel size was 1x1 mm. It was show that the Eckart types flows contributes to the thermo exchange. Any changes in the conditions of its appearance alters the temperature distribution.

Thermal field; ultrasonic transducer; Eckart types flow; therapy.

Тепловые источники в акустическом поле излучателя ультразвука своим существованием обязаны диссипативным потерям при распространении волны за счет существования в среде объемной вязкости. В сходящейся сферической волне в жидкости максимальная интенсивность наблюдается в фокусе, который представляет собой вытянутый вдоль оси симметрии эллипсоид, большая ось которого определяется углом раскрытия излучателя.

По своим акустическим свойствам мягкие биологические ткани сопоставляются с вязкими жидкостями. На самом деле мышцы и другие ткани человеческого организма обладают механическими свойствами, промежуточными между

твердым телом и жидкостью. Физическая структура биологических тканей больше похожа на композиционный материал, заполненный жидкостью. Феноменологические свойства такого материала описываются модулями продольной и сдвиговой упругости, при этом последний на один, два порядка меньше первого. Вследствие этого в биологической ткани распространяются продольные волны, как и в жидкости, а поперечные волны, особенно высокочастотные, мегагерцового диапазона быстро затухают в пределах вязкого пограничного слоя.

На основании изложенной модели в работе [3] подробно изучены тепловые поля источников сфокусированных полей. С ростом интенсивности акустического поля фокальная область уменьшает свои характерные размеры, степень локализации тепловых источников растет. Распространение тепла происходит по закону теплопроводности Фурье. Результаты работ подтверждаются экспериментами на печени животных *in vitro*.

Вместе с тем ультразвуковая терапия и хирургия интересуется биологическими объектами, в которых присутствуют физиологические жидкости, такие как спинномозговая жидкость, кровь и т.д. В мышечных тканях также присутствует кровь, распространяющаяся по капиллярам и диффундирующая в межклеточном пространстве. Эти процессы входят в круг физических проблем, исследуемых экспериментально и теоретически в гидродинамике [1, 2].

Исходя из перечисленных предпосылок, в настоящей работе поставлен эксперимент по исследованию тепловых полей, создаваемых сфокусированным ультразвуком от источника диаметром 25 мм, фокусным расстоянием 28 мм на частоте 2,64 МГц. Мощность ультразвука, измеренная радиационным методом, 2 Вт.

Эксперимент ставился с применением тепловизора ТКВ-ИФП «СВИТ», тепловое поле записывалось в виде фильма в цифровом формате. Последующая обработка обеспечивалась возможностью соответствующей программы, входящей в комплект тепловизора. В фильме сохранялась информация об абсолютном времени в процессе эксперимента и о тепловом поле в градусах Цельсия. Разрешающая способность тепловизора по температуре 0,007 °С, размер кадра 128×128 пикселей. На полученных изображениях пиксель представляет собой квадрат с длиной стороны от 0,5 до 1 мм. Высокая чувствительность прибора обеспечивается охлаждением первичного преобразователя до температуры жидкого азота.

Эксперименты проводились на двух жидкостях. Первая – водный раствор глицерина 10 % по массе, вторая – касторовое масло. Касторовое масло является общепризнанным акустическим аналогом мягких тканей человеческого организма по параметрам: скорость звука и затухание волны в диапазоне частот 0,5 ÷ 10 МГц. Динамическая сдвиговая вязкость глицеринового раствора при 20 °С $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па·с, касторового масла при температуре 37 °С 0,250 Па·с. Плотности 1,021 и 0,98 г/см³.

Первый эксперимент. Тепловое изображение одного из кадров в оттенках серого показано на рис.1. Излучатель в герметичном корпусе 1 помещен в резервуар большего размера 2, так что между криволинейной излучающей поверхностью 3 и поглощающей стенкой 4 создавалось пространство свободной воды 5. Жидкость наливалась до уровня, превышающего положение фокального пятна на 3-5 мм. Уровень жидкости подбирался экспериментально таким образом, чтобы тепловая картина плоского среза, проходящего через акустическую ось, передавалась без существенного искажения.

Таким образом, на рис. 1 показана тепловая картина, близкая к сечению плоскостью процесса, происходящего в цилиндрической системе координат, ось которой совпадает с акустической осью излучателя.

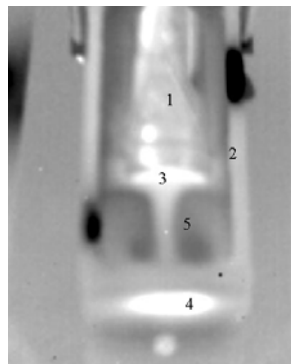


Рис. 1. Исследуемое тепловое изображение фокусирующего излучателя, помещенного в водный раствор глицерина

На рис. 2,а–с представлены картины распределения температурных полей в разные моменты времени с момента включения излучателя. Между 20 и 95 секундами наблюдается образование холодной зоны, омываемой вихрем.

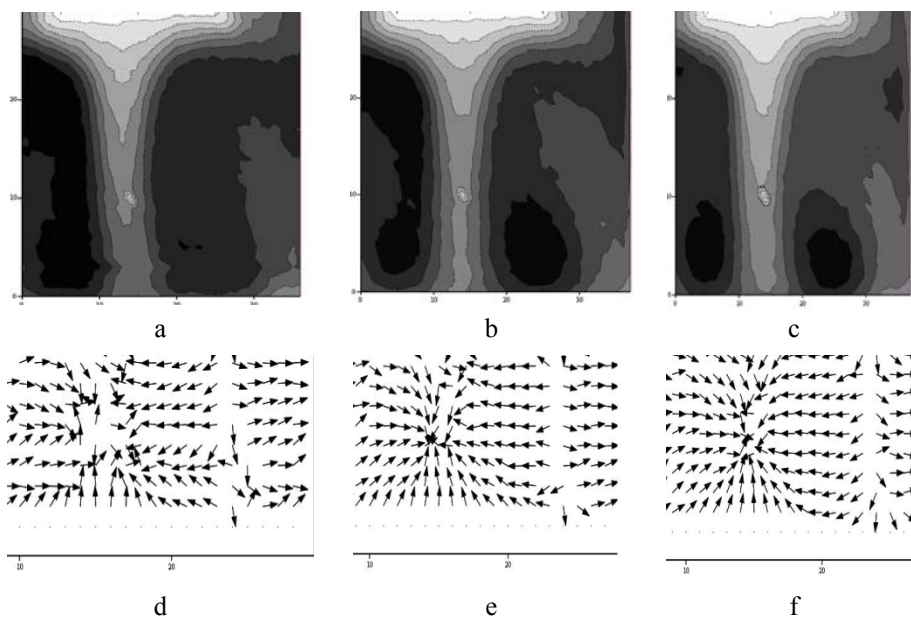


Рис. 2 Распределения температурных полей фокусирующего излучателя, помещенного в водный раствор глицерина в разные моменты времени: а – 20 с, b – 55 с, с – 95с; векторные диаграммы тепловых потоков фокусирующего излучателя в разные моменты времени: d – 20 с, e – 55 с, f – 95с

На рис. 2, d–f приведены векторные диаграммы тепловых потоков, подтверждающие направление стока тепла в центральной части вихревых зон. На этих рисунках вектора показывают направление потока, но не его величину.

По нашему мнению, взаимодействие процессов нагревания за счет поглощения в зоне фокуса и акустических потоков жидкости может привести именно к

такому распределению теплового поля. В области фокуса не наблюдается повышенного выделения тепла. Источником тепла, как видно, является поверхность излучателя. Акустическая ось излучателя является источником теплового потока, как видно на рисунках $d-f$. При этом тепловое равновесие достигается медленнее, чем возникают потоки жидкости. Поскольку стенка резервуара является поглотителем звука, что иллюстрирует рис. 1, то в эксперименте достаточно хорошо реализуются условия для возникновения крупномасштабных потоков, теоретически описанных Эккартом.

Второй эксперимент. Тепловое изображение кадра, соответствующего 5 секунде, в оттенках серого показано на рис. 3. Излучатель 1 сопряжен с резервуаром 2 цилиндрической формы внутренним диаметром 35 миллиметров. Конусный наконечник охватывает излучатель 3 (рис. 1) таким образом, чтобы фокус находился в резервуаре. В вершине конуса имеется круглое окно, закрытое тонкой фторопластовой пленкой. Резервуар заполнен касторовым маслом до уровня, полностью покрывающего окно. На рис. 3 наблюдается светлая область 3, совпадающая с геометрическим положением фокуса акустического излучения.

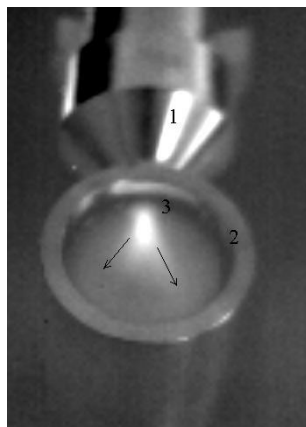


Рис. 3 Исследуемое тепловое изображение фокусирующего излучателя, действующего на резервуар с касторовым маслом

Сравнение рис. 3 и рис. 1, 2 подтверждает, что в работе действительно следуются процессы от излучателя фокусирующего излучение в расчетной фокальной области. Тепловое поле в начальные моменты времени имеет грушеобразную форму. При этом в более широкой области имеются зоны повышенной температуры, вытянутые в направлении стрелок, показанных на рисунке. На рис. 4 показаны картины распределения тепловых полей на 100 (а) и 180 (б) секундах эксперимента. Кольцевая внешняя структура соответствует тепловому полю на поверхности стенки резервуара. Сравнение процесса на 5, 100 и 180 секундах показывает, что возникающее на первых этапах неравномерное распределение температур заменяется симметричной картиной теплового поля. Поле фокуса представляет собой треугольник со скругленными углами. В конце периода наблюдения купол температурного поля становится более пологим и увеличивается в размере. Как отмечается в [2], тепловой поток в присутствии движения жидкости определяется как коэффициентом теплопроводности, так и скоростью потока. В связи с этим отличие тепловой картины фокальной области от кривой второго поряд-

ка в сечении плоскостью можно объяснить наличием симметричных относительно акустической оси потоков. Более подробный анализ тепловых полей указывает на то, что по оси излучения в области между фокусом и стенками резервуаров присутствует область, где возможно образование плоской стоячей волны.

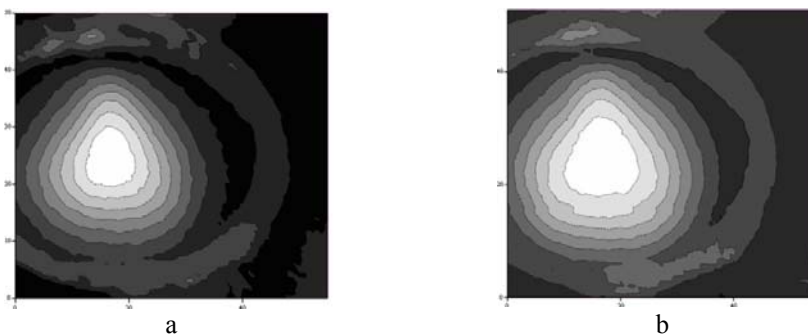


Рис. 4. Распределения температурных полей фокусирующего излучателя, действующего на резервуар с касторовым маслом в разные моменты времени: *a* – 100 с, *b* – 180 с

Сравнение обоих экспериментов подтверждает, что время установления течений в вязкой жидкости (касторовое масло) происходит быстрее, чем в первом эксперименте. Это качественно подтверждает известный теоретический факт, что время установления вихревого движения обратно пропорционально сдвиговой вязкости жидкости.

Приведенные в настоящей работе экспериментальные данные подтверждают, что тепловые поля ультразвука связаны с наложением двух физических эффектов. Первый – нагрев за счет объемной вязкости среды. Второй – возникновение акустических течений в вязкой жидкости. В биофизике оба эти явления могут проявляться при распространении ультразвука в мышцах и физиологических жидкостях *in vivo*. Применение ультразвука относительно малой интенсивности позволило наблюдать указанные процессы за времена порядка нескольких минут. Полученные результаты могут найти своё применение при разработке усовершенствованных методик терапевтических процедур. Также позволит разработать более совершенные модели для расчёта тепловых полей в присутствии ультразвуковой конвекции вязкой жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. изд.5, главная ред. физ. – мат. лит. Изд-во Наука, – М., 1978.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10т. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит. 1986. Т. VI.
3. Филоненко Е.А. Хохлова В.А. Эффекты акустической нелинейности при терапевтическом воздействии мощного фокусированного ультразвука на биологическую ткань // Акуст. журн. 2001. – Т. 47. – № 4. – С. 541-549.
4. Ультразвук в медицине / Под. ред. К. Хилла, Дж. Бэмбера. Г. тер Хаар/ Пер. с англ. Под ред. Гаврилова Л.Р., Хохловой В.А., Сапожникова О. А. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008.

Романова Виктория Николаевна

Южный федеральный университет, физический факультет.

E-mail: tori86@list.ru.

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, тел.: (863)2975072.

Кафедра биофизики и биокibernетики, аспирантка.

Romanova Victoriya Nikolaevna

Southern Federal University, physical department.

E-mail: tori86@list.ru.

5, Zorge, Rostov-on-Don, 344090, Russia, Phone: (863)2975072.

Department of Biophysics and Biological Cybernetics, post-graduate student.

Яценко Владимир Константинович

Южный федеральный университет, физический факультет.

E-mail: vlayacenko@yandex.ru.

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, тел.: (863)2975072.

Кафедра биофизики и биокibernетики, доцент, к.ф.-м.н.

Yatsenko Vladimir Konstantinovich

Southern Federal University, physical department.

E-mail: vlayacenko@yandex.ru.

5, Zorge, Rostov-on-Don, 344090, Russia, Phone: (863)2975072.

Department of Biophysics and Biological Cybernetics, assistant professor, Cand. Sc.

Орлова Анастасия Михайловна

Южный федеральный университет, физический факультет.

E-mail: orlvaana@gambler.ru.

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, тел.: (863)2975072.

Кафедра биофизики и биокibernетики, студентка.

Orlova Anastasiya Mikhailovna

Southern Federal University, physical department.

E-mail: orlvaana@rambler.ru.

5, Zorge, Rostov-on-Don, 344090, Russia, Phone: (863)2975072.

Department of Biophysics and Biological Cybernetics, student.

УДК 616.85-085.85-07; 616.831-072.7

Л.В. Смекалкина

**БИОАКУСТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПОСТСТРЕССОВЫХ
РАССТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ РЕАБИЛИТАЦИИ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ**

Приводится анализ и обоснование эффективности применения биоакустики в комплексном восстановительном лечении военнослужащих, получивших ранения в зонах локальных конфликтов.

Биоакустическая психокоррекция; функциональное состояние головного мозга; военнослужащие; постстрессовые расстройства.

L.V. Smekalkina

**BIOACUSTIC PSYCHOLOGICAL INTERVENTION OF STRESS DISORDERS
IN TREATMENT OF SERVICEMEN**

Herewith is the analysis and substantiation of bioacoustics application efficiency in medical rehabilitation of servicemen injured in areas of local military conflicts.

Bioacoustics psychological intervention; functional state of cerebrum; servicemen; stress disorders.