

## Экспериментальная установка для исследования способности управления ультразвуковым пучком при его прохождении через слоистые среды

*Е.Г. Домбругова, Н.Н. Чернов*

*Южный федеральный университет*

**Аннотация:** Приведено описание разработанной экспериментальной установки для исследования способности управления ультразвуковым пучком при прохождении его через слоистые среды. Рассматривается методика проведения исследований, обоснован выбор материала для имитационных слоев биологических тканей. Приведены характеристики разработанной установки и способы позиционирования акустического излучателя. Решение задачи экспериментального исследования позволило оценить отклонение области "максимума" акустического давления (в поперечном распределении) за счет прохождения через слоистые среды и определить, в конечном счете, влияние скорости звука в переходном слое на распределение акустической энергии в исследуемой области пространства.

**Ключевые слова:** ультразвук, экспериментальная установка, слоистые среды, преломление ультразвуковых волн

Для успешного проведения ультразвуковой хирургической операции с использованием высокоинтенсивного ультразвука одним из решающих факторов является точное наведение на локальную область и воздействие в заданном объеме ультразвуковым импульсом заданной длительности и мощности. Для хирургической операции цена ошибки при определении координат чрезвычайно высока, так как наряду с повреждением здоровых тканей патогенные структуры остаются не разрушенными или разрушенными не до конца [1 - 4]. Обычно при проведении сеанса дистанционной литотрипсии на пути распространения ультразвуковой волны располагаются слои с индивидуальными акустическими характеристиками: дистиллированная вода, кожа, жировая и мышечная ткани. При этом источником мощного ультразвука чаще всего служат многоэлементные пьезоэлектрические фокусирующие излучатели [1, 5]. Акустическое поле во фронтальном срезе, формируемое отдельными излучателями, расположенными на поверхности антенной решетки, будет различным при

---

наличии слоев на пути следования ультразвукового пучка [6 - 10]. Слоистая структура среды влияет на траекторию следования ультразвукового импульса (отражение и преломление на границах раздела сред), что приводит не только к смещению максимума распределения акустического поля при наклонном падении, но и к изменению пути, времени следования импульса и его амплитуды и, как следствие, изменение геометрии фокального пятна.

Основной целью проведения экспериментального исследования являлось решение задачи точного наведения мощным фокусированным ультразвуковым пучком на объект воздействия через слоистую биологическую структуру.

Исследования проводились в специальной камере с дистиллированной водой, в которую погружались гидрофон и ультразвуковой излучатель. Акустические импульсы, излученные ультразвуковым преобразователем, меняли направление за счет прохождения различных слоев, формируя определенную картину распределения акустической энергии в пространстве, нахождение которой являлось одной из основополагающих задач экспериментальных исследований [10, 11].

Для решения задачи экспериментального исследования была разработана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

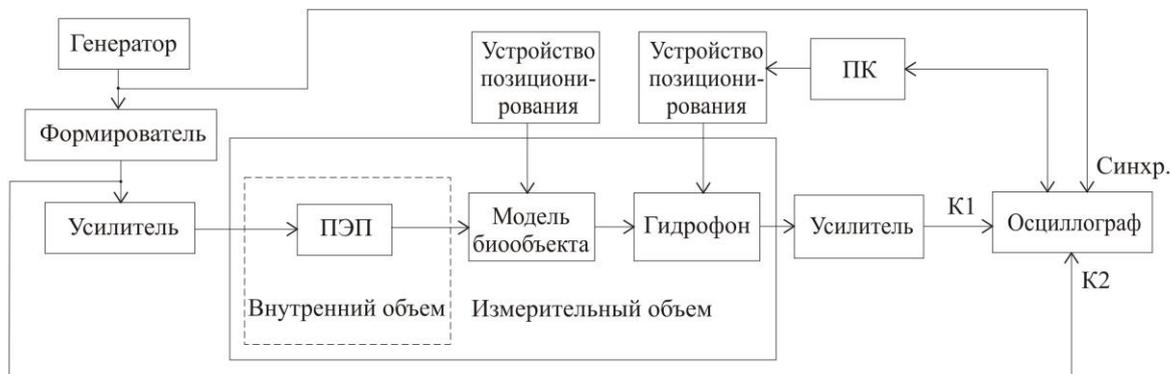


Рис. 1. – Структурная схема экспериментальной установки

На рис.1 введены следующие обозначения: ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь, К1 и К2 – канал №1 и №2, ПК – персональный компьютер

Экспериментальная установка состояла из отдельных блоков и узлов излучающего и приемного трактов, измерительного (общего) и внутреннего объема, а также вспомогательного оборудования: имитационных слоев и устройства для их позиционирования, системы контроля температуры и управляемого с персонального компьютера устройства перемещения гидрофона в трех взаимно перпендикулярных направлениях и записи результатов эксперимента. Экспериментальная установка в сборе представлена на рис. 2.

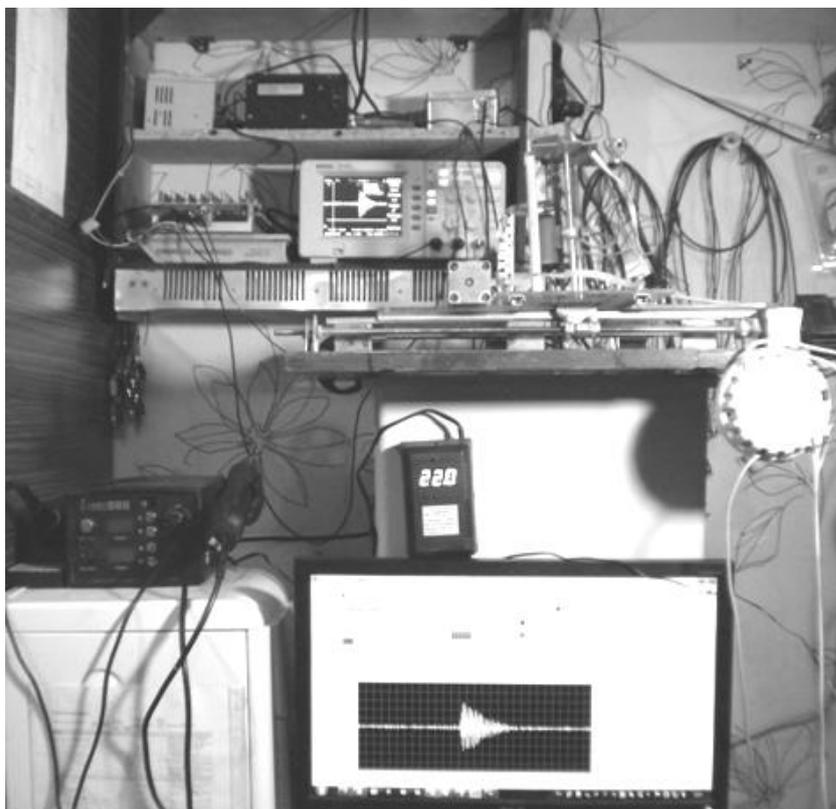


Рис. 2. Экспериментальная установка

Принцип работы экспериментальной установки заключался в следующем. Сигнал с генератора поступал на формирователь сигналов. Контроль амплитуды, длительности и частоты следования импульсов

осуществлялся с помощью осциллографа. С выхода формирователя задающий импульс поступал на излучатель. Проходя через внутренний объем и имитационные слои ультразвуковой сигнал претерпевал изменение формы и принимался сферическим гидрофоном, электрический сигнал с которого, через усилитель, поступал на осциллограф.

Излучающий тракт экспериментальной установки состоял из генератора сигналов, формирователя импульсов и ультразвукового излучателя.

Для формирования сигналов использовался генератор прямоугольных импульсов с изменяемой частотой следования от 800 Гц до 5 кГц, совмещенный в одном блоке с формирователем импульсов. Для получения звуковых импульсов к генератору, задающему несущую частоту, подключался 30-ти канальный формирователь сигналов, обеспечивающий регулировку длительности импульса и линии задержки для каждого канала. Задаваясь целью экспериментальных исследований, длительность импульса составляла 1 – 10 мкс, регулировка линии задержки 0 – 50 мкс. Амплитуда возбуждающего импульса была равна 30 В. В качестве излучателя ультразвуковых волн был использован круглый плоский пьезокерамический излучатель диаметром 9 мм, работающий на продольных колебаниях по толщине с собственной частотой  $f_p = 3,1$  МГц. Герметичность излучателя обеспечивалась конструктивными элементами.

Гидрофон, чувствительный элемент которого представлял собой пьезокерамическую сферу диаметром 8 мм, усилитель и осциллограф составляли приемный тракт установки. В качестве регистрирующего устройства был использован цифровой двухканальный осциллограф Rigol DS1052E с рабочей частотной полосой до 50 МГц с возможностью автоматической записи в ПК.

---

Исследования проводились в камере прямоугольной формы 400 x 400 x 350 мм<sup>3</sup>. Ограниченный объем рабочей среды накладывает дополнительные требования на диапазон частот используемых сигналов, длительностей и периодов следования импульсов. Возникает необходимость разделить во времени прямой и отраженный сигнал [12]. Для этого использовался импульсный режим работы, который обеспечивал условия, аналогичные условиям, применяемым в медицинской практике.

Система позиционирования приемника состояла из трёх пар взаимно перпендикулярно ориентированных направляющих, каждая последующая из которых закреплялась на предыдущей. Перемещение вдоль направляющих производилось вращением оси шаговых двигателей, закрепленных на платформах, соответствующих каждому из трёх направлений перемещения. Гидрофон крепился на третьей платформе. Вращение двигателей производилось с помощью блока управления, состоящего из контроллера и электронного драйвера управления. Последовательность входных импульсов, определяющих направление, скорость и величину перемещения передавалась через LPT порт персонального компьютера.

Для управления перемещением гидрофона и записи протоколов экспериментальных исследований была написана программа в среде разработки LabView. Программа позволила управлять перемещением гидрофона с персонального компьютера, задавать передаточное соотношение в виде количества шагов шагового двигателя на единицу длины, шаг, скорость и пределы перемещения по осям, время ожидания между шагами, что позволило получить установившееся значение снимаемых параметров и произвести задаваемое количество выборок значений.

В протокол эксперимента заносились координаты и соответствующие им средние значения амплитуды по заданному заранее числу выборок. Использование автоматической системы перемещения и записи результатов

---

эксперимента позволило снизить случайную погрешность измерений, связанную с ручным перемещением гидрофона или с обработкой полученных данных. Вычисление среднего значения амплитуды сигнала позволило снизить влияние помех.

В рамках исследования распространения акустических волн в слоистых средах для обеспечения условий, максимально приближенным к реальным, в измерительной камере использовались искусственные слои с различными физическими параметрами.

Для выполнения условия образования плоской прошедшей волны необходимо, чтобы размеры имитационных слоев существенно превосходили длину волны. Толщина имитационных слоев выбиралась в соответствии со средними толщинами реальных слоев.

Для исследования влияния скорости звука в переходном слое на формирование акустического поля, прошедшего через слоистую среду было необходимо создать дополнительную внутреннюю камеру. В качестве материала для внутренней камеры было выбрано оргстекло, совмещающее функции одного из имитационных слоев и стенки внутренней камеры. Стенки герметичной внутренней камеры имели толщину 2, 3, 4 и 5 мм. Таким образом, с помощью разворота внутренней камеры той или иной гранью, можно было получить требуемую толщину имитационного слоя.

В качестве второго слоя выбран парафин – материал, из которого можно получить требуемую толщину слоя с параллельными гранями и однородной внутренней структурой. В целях экспериментального исследования были изготовлены парафиновые слои с толщинами 5, 10 и 15 мм.

При подготовке экспериментального исследования были произведены расчеты отклонения направления распространения акустического луча в среде с заданным соотношением толщин слоев, от траектории распространения в среде без слоев, а также рассчитана скорость звука, при

---

которой отклонение будет минимальным [10]. Для целей эксперимента достаточно изменять скорость звука в пределах 1516-1580 м/с. Регулирование скорости звука во внутреннем объеме осуществлялось при помощи раствора глицерина в воде заданной концентрации. Так как и гидрофон и излучатель достаточно удалены от границ имитационных слоев, то условия применимости геометрической акустики соблюдены.

С помощью приемника ультразвуковых волн регистрировались уровни акустического давления в заданных координатах. Были измерены поперечные распределения давления в случае распространения в однородной среде без слоев, в среде со слоями, и в случае компенсации отклонения от траектории распространения с помощью изменения скорости звука во внутреннем объеме. Данные, полученные в ходе экспериментального исследования, анализировались путем сравнения распределения акустической энергии в пространстве (точки максимального экстремума  $A_0$ , а также положение точки экстремума относительно начала отсчета  $x_0$  и момент прихода импульса  $t_0$ ). Измерения в эксперименте носят относительный характер, поэтому необходимости в градуировке гидрофона не возникает.

Излучатель и приемник были закреплены на глубине 200 мм (центр гидроакустического бассейна) при помощи жестких держателей на одной платформе, что обеспечивало требуемое расстояние между ними при опускании и поднятии из гидроакустического бассейна. Кроме того, держатель излучателя оснащен поворотным устройством в двух проекциях. Поворот угла излучателя по горизонтали осуществлялся по угломеру с нониусом (угол поворота 0-320°, цена деления 2', предел допускаемой абсолютной погрешности (по паспорту)  $\pm 5'$ ), закрепленному на поворотном устройстве. Поворотное устройство по вертикали служило для предварительной настройки положения излучателя, когда он погружался в воду.

---

Оптимальное количество измерений фронтального среза – 5 измерений на каждую постановку эксперимента – было выявлено после предварительной группы измерений. Для системы перемещения гидрофона шаг измерения составлял 0,25 мм, а в области максимума для уточнения значения координаты  $x$ , шаг уменьшался до значения 0,1 мм. Экспериментально была определена оптимальная скорость перемещения гидрофона, исключающая пропуск шагов (2 мм/с) и удовлетворительная по времени проведения эксперимента.

Для выполнения задачи экспериментального исследования и обеспечения достаточной достоверности его результатов была разработана следующая технологическая схема проведения измерений.

В первой части эксперимента было необходимо провести исследование распределения амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля и времени распространения ультразвукового импульса, прошедшего через слои в зависимости от толщины слоев, их акустических характеристик и угла поворота излучателя. Также было необходимо оценить эти влияния для случая расположения излучателей на поверхности антенной решетки, для чего проводились измерения для центрального излучателя ( $H=200$  мм  $\alpha=0^\circ$ ) и для излучателя, который бы располагался на краевой части антенной решетки ( $H=173$  мм,  $\alpha=30^\circ$ ).

Перед началом эксперимента производили предварительное позиционирование излучателя и приемника на одной оси на расстоянии 200 мм. Определяли точку с максимумом амплитуды и брали ее за начало отсчета в системе перемещения гидрофона. Измеряли амплитуду сигнала ( $A$ , мВ) и координаты ( $x$ , мм) во фронтальной плоскости с шагом 0,1-0,25 мм (в зависимости от целей эксперимента). Измерения амплитуды и времени прихода импульса (в районе координат максимума по первой положительной полуволне) производили для углов поворота излучателя 0-35°, с шагом 5°.

---

Меняли общее расстояние между излучателем и приемником на  $H=173$  мм ( $\alpha=30^\circ$ ) измеряли время прихода импульса и амплитуду сигнала во фронтальной плоскости. Далее выставлялось следующее сочетание слоев и повторялись предыдущие операции. После того, как измерения с дистиллированной водой в переходном слое были окончены, воду замещали глицерином и производим измерения амплитуды сигнала и времени прихода импульса во фронтальном срезе акустического поля.

Для исследования способности управления ультразвуковым пучком при его прохождении через слоистую структуру среды при помощи переходного слоя с различной скоростью звука [10], была выбрана следующая постановка экспериментального исследования. Толщины слоев составляли: переходный слой 119 мм, оргстекло 3 мм, парафин 5 мм, дистиллированная вода 73 мм; угол ввода составлял  $15^\circ$  и не менялся на протяжении этой части эксперимента, чтобы избежать возможное смещение. Сначала во внутренний объем поместили глицерин, и затем снижали концентрацию глицерина от 100% до 5%, с шагом 5%, путем добавления дистиллированной воды. Для каждой постановки записывали концентрацию ( $k$ , %), время прихода импульса ( $T$ , мкс) в районе максимума, координаты  $x$ , мм и соответствующую этим значениям амплитуду сигнала  $A$ , мВ.

Решение задачи экспериментального исследования позволило оценить отклонение области «максимума» акустического давления (в поперечном распределении) за счет прохождения через слоистые среды и определить, в конечном счете, влияние скорости звука в переходном слое на распределение акустической энергии в исследуемой области пространства.

## Литература

1. Гаврилов Л.Р., Хэнд Дж.У. Двумерные фазированные ультразвуковые решетки для применения в хирургии: перемещение одиночного фокуса [текст] // Акуст.ж., 2000, - Т.46, - №4. с.456-466.

2. Домбругова, Е.Г. Многоэлементная фокусирующая решетка для медицинской хирургии [текст] // IX Всероссийская научная конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления»: Тезисы докладов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – Т2, с.77-78.

3. Домбругова, Е.Г. Применение мощного сфокусированного ультразвука для лечения заболеваний, вызванных загрязнением окружающей среды [текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. «Экология 2009 – море и человек». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – №7 (96). с.246-249.

4. Malcolm A.L., G.R. ter Haar. Ablation of tissue volumes using high intensity focused ultrasound // Ultrasound in medicine and biology, 1996. – V.22. - №5, p.659-669.

5. Ebbini E.S., Cain C.A. A spherical-section ultrasound phased-array application for deep localized hyperthermia // IEEE Trans.Biomed.Eng., 1991. – V.38. – №7. p. 634-643.

6. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Исследование неоднородных волн вблизи границ раздела сред [электронный ресурс]// Инженерный вестник Дона. – 2013. – №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1652> (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.

7. Тарасов С.П., Тимошенко В.И., Воронин В.А., Кириченко И.А., Пивнев П.П., Солдатов Г.В., Волощенко А.П., Эсси-Эзинг А.С., Обыденная В.А., Франчук Д.А. Измерение фазочастотной характеристики приемной антенны многолучевого эхолота в условиях гидроакустического бассейна [электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2012. - №1. – URL:

---



ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227 доступ свободный) - Загл. с экрана.  
– Яз. рус.

8. Домбругова, Е.Г. К решению обратной задачи моделирования ультразвукового поля фазированной антенной решетки с учетом характеристик ее отдельных элементов [текст] // X Всероссийская научная конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления»: Тезисы докладов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – Т2. с.66-67.

9. Домбругова, Е.Г. Особенности прохождения слоистых сред фокусированным ультразвуковым полем [текст] // Сборник научных трудов «Современные направления теоретических и прикладных исследований, 2011». Том8. Физика и математика. – Одесса: Черноморье, 2011. с.86-87.

10. Домбругова Е.Г., Чернов Н.Н. Использование переходного слоя для управления формированием фокального пятна [текст] // Сборник трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». - М.: ГЕОС, 2012. – Том 1. с. 232-235.

11. Леонова А.В., Чернов Н.Н. Экспериментальная установка для исследования прохождения узкого ультразвукового пучка через слоистую структуру биоткани [текст] // «Перспективы фундаментальной и прикладной науки в сфере медицинского приборостроения». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т.99. – №10(9). с.155-159.

12. Колесников, А.Е. Акустические измерения [текст]. – Л. Судостроение, 1983, 256 с.

## References

1. Gavrilov L.R., Hjend Dzh.U. Dvumernye fazirovannye ul'trazvukovye reshetki dlja primenenija v hirurgii: peremeshhenie odinochnogo fokusa [tekst] // Akust.zh., 2000, - T.46, - №4. s.456-466.
2. Dombrugova, E.G. Mnogojelementnaja fokusirujushhaja reshetka dlja medicinskoj hirurgii [tekst] // IX Vserossijskaja nauchnaja konferencija «Tehnicheskaja kibernetika, radiojelektronika i sistemy upravlenija»: Tezisy dokladov. – Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2008. – T2, s.77-78.
3. Dombrugova, E.G. Primenenie moshhnogo sfokusirovannogo ul'trazvuka dlja lechenija zabolevanij, vyzvannyh zagrjazneniem okruzhajushhej sredy [tekst] // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. Tematicheskij vypusk. «Jekologija 2009 – more i chelovek». – Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2009. – №7 (96). s.246-249.
4. Malcolm A.L., G.R. ter Haar. Ablation of tissue volumes using high intensity focused ultrasound // Ultrasound in medicine and biology, 1996. – V.22. - №5, p.659-669.
5. Ebbini E.S., Cain C.A. A spherical-section ultrasound phased-array application for deep localized hyperthermia // IEEE Trans.Biomed.Eng., 1991. – V.38. – №7. p. 634-643.
6. Voloshhenko A.P., Tarasov S.P. Issledovanie neodnorodnyh voln vblizi granic razdela sred [jelektronnyj resurs]// Inzhenernyj vestnik Dona. – 2013. – №2. – Rezhim dostupa: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1652> (dostup svobodnyj) - Zagl. s jekrana. – Jaz. rus.
7. Tarasov S.P., Timoshenko V.I., Voronin V.A., Kirichenko I.A., Pivnev P.P., Soldatov G.V., Voloshhenko A.P., Jessi-Jezing A.S., Obydennaja V.A., Franchuk D.A. Izmerenie fazochastotnoj karakteristiki priemnoj anteny mnogolucheвого jeholota v uslovijah gidroakusticheskogo bassejna [jelektronnyj resurs] // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2012. - №1. – URL:



<http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227> dostup svobodnyj) - Zagl. s jekrana. – Jaz. rus.

8. Dombrugova, E.G. K resheniju obratnoj zadachi modelirovanija ul'trazvukovogo polja fazirovannoj antennoj reshetki s uchetom harakteristik ee otdel'nyh jelementov [tekst] // X Vserossijskaja nauchnaja konferencija «Tehnicheskaja kibernetika, radiojelektronika i sistemy upravlenija»: Tezisy dokladov. – Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2010. – T2. s.66-67.

9. Dombrugova, E.G. Osobennosti prohozhdenija sloistykh sred fokusirovannym ul'trazvukovym polem [tekst] // Sbornik nauchnykh trudov «Sovremennye napravlenija teoreticheskikh i prikladnykh issledovanij, 2011». Tom8. Fizika i matematika. – Odessa: Chernomor'e, 2011. s.86-87.

10. Dombrugova E.G., Chernov N.N. Ispol'zovanie perehodnogo sloja dlja upravlenija formirovaniem fokal'nogo pjatna [tekst] // Sbornik trudov nauchnoj konferencii «Sessija nauchnogo soveta RAN po akustike i XXV sessija Rossijskogo akusticheskogo obshhestva». - M.: GEOS, 2012. – Tom 1. s. 232-235.

11. Leonova A.V., Chernov N.N. Jeksperimental'naja ustanovka dlja issledovanija prohozhdenija uzkogo ul'trazvukovogo puchka cherez sloistuju strukturu biotkani [tekst] // «Perspektivy fundamental'noj i prikladnoj nauki v sfere medicinskogo priborostroenija». – Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2009. – T.99. – №10(9). s.155-159.

12. Kolesnikov, A.E. Akusticheskie izmerenija [tekst]. – L. Sudostroenie, 1983, 256 s.