

УДК 534.222

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.007)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЕМ И ПАРАМЕТРАМИ ФОКАЛЬНОГО ПЯТНА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ХИРУРГИИ

Е.Г. Домбругова<sup>1</sup>, Н.Н. Чернов<sup>2</sup>

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
Таганрог, Российская Федерация

<sup>1</sup>e-mail: [yhellowhat@yandex.ru](mailto:yhellowhat@yandex.ru)

<sup>2</sup>e-mail: [nik-chernov@yandex.ru](mailto:nik-chernov@yandex.ru)

**Резюме:** Работа посвящена апробации способа управления местоположением и параметрами фокального пятна при помощи изменения физических характеристик согласующего слоя. Предложен метод определения скорости звука в согласующем слое, необходимом для корректировки местоположения фокального пятна, путем расчета среднетолщинной скорости звука в биологических тканях, располагающихся на пути распространения ультразвуковых волн. Приведены описание экспериментальной установки и методика проведения исследований. Оценено влияние изменения физических параметров согласующего слоя на распределение амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля, создаваемого ультразвуковым излучателем при изменении угла его наклона относительно границы раздела сред. Приводится сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования, выполненного при тех же вводных параметрах. Приведены результаты расчетов акустического поля, создаваемого фокусирующей антенной решеткой в слоисто-неоднородной среде – имитационных слоях – и оценено влияние изменения физических характеристик согласующего слоя на пространственное распределение амплитуды акустического давления в фокальной области. Результаты исследований показали возможность использования согласующего слоя с расчетными параметрами для управления местоположением фокального пятна в направлении распространения ультразвуковых волн. Разработанный способ корректировки местоположения фокального пятна можно использовать как для антенных решеток, так и для единичных излучателей, имеющих форму сферического сегмента.

**Ключевые слова:** среднетолщинная скорость звука, экспериментальная установка, фокусированный ультразвук, согласующий слой, преломление ультразвуковых волн.

**Для цитирования:** Домбругова Е.Г., Чернов Н.Н. Исследование способа управления местоположением и параметрами фокального пятна для неинвазивной хирургии. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2019;7(4). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DombrugovaChernov\\_4\\_19\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DombrugovaChernov_4_19_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.007.

## STUDY ON METHOD FOR MANAGING LOCATION AND PARAMETERS OF FOCAL SPOT FOR NON-INVASIVE SURGERY

E.G. Dombrugova<sup>1</sup>, N.N. Chernov<sup>2</sup>

Southern federal University, Taganrog, Russian Federation

**Abstract:** The paper is dedicated to approbation of method for managing location and parameters of focal spot by changing physical characteristics of matching layer. A method is proposed for determining the speed of sound in matching layer for adjusting focal spot by calculating layer thickness-averaged speed of sound in biological tissues on the path of ultrasonic waves. A description of the experimental setup and research methodology is given. The influence of changes in the physical parameters of the matching layer on the distribution of the pressure amplitude in the frontal section of the acoustic field generated by the ultrasonic emitter when the angle of its inclination to the interface varies is estimated. The experimental data are compared with the results of mathematical modeling performed with the same input parameters. The results of calculations of the acoustic field generated by a focusing antenna array in a layered inhomogeneous medium (simulation layers) are presented and the influence of changes in the physical characteristics of the matching layer on the spatial distribution of the acoustic pressure amplitude in the focal region is estimated. The study results showed the possibility of using a matching layer with calculated parameters to control the location of the focal spot in the direction of ultrasonic waves propagation. The developed method for correcting the location of the focal spot can be used both for antenna arrays and for single emitters having the shape of a spherical segment.

**Keywords:** layer thickness averaged speed of sound, experimental setup, focused ultrasound, matching layer, refraction of ultrasonic waves.

**For citation:** Dombrugova E.G., Chernov N.N. Study on method for managing location and parameters of focal spot for non-invasive surgery. *Modeling, optimization and information technology*. 2019;7(4). Available from: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DombrugovaChernov\\_4\\_19\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/DombrugovaChernov_4_19_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.007 (In Russ.).

## Введение

Фокусированный ультразвук высокой интенсивности находит широкое применение в современной медицине, позволяя неинвазивно воздействовать на локальные участки тканей или новообразования, расположенные внутри организма. Важным фактором при проведении операции с применением мощного фокусированного ультразвука является точное наведение и воздействие в заданном объеме импульсами требуемой длительности и мощности [1].

Источниками мощного сфокусированного ультразвука в медицинской практике часто служат многоэлементные пьезоэлектрические антенные решетки, имеющие форму сферического сегмента. Отдельные излучатели, на такой антенной решетке расположены под разными углами наклона к биологическим тканям. Для введения ультразвуковых колебаний в тело пациента используют сифон – сосуд, заполненный жидкостью (обычно применяют дегазированную дистиллированную воду).

Слоистая структура биологической среды влияет на амплитуду акустического давления, траекторию и время распространения ультразвуковых волн до фокальной области, что обуславливает местоположение, геометрию фокального пятна и амплитуду акустического давления в фокусе [1]. Данные изменения будут зависеть от структуры биологической среды и величины угла раскрытия сферического сегмента  $\theta$  антенной решетки относительно ее геометрического фокуса. Условно структуру среды распространения ультразвуковых волн при проведении сеанса дистанционной литотрипсии можно представить следующими слоями: согласующий жидкостный слой, кожная, жировая и мышечная ткани [2].

В работах [2-4] рассмотрен способ управления формированием фокального пятна на основе изменения физических характеристик согласующего слоя. Для определения искомых характеристик рассчитывают скорость звука в согласующем слое, обеспечивающую минимальное значение суммарного отклонения проекций хода луча  $U_{\Sigma}$  на фронтальный срез акустического поля:

$$U_{\Sigma} = \sum_{k=1}^K |\Delta M(\alpha_k)|,$$

где  $\alpha_k$  – угол наклона луча,  $\alpha_k = (k-1) \cdot d$ ,  $k$  – порядковый номер угла,  $K$  – количество выборок углов,  $d$  – шаг, с которым определяется угол,  $\Delta M(\alpha_k)$  – разница между проекцией хода луча на фронтальный срез при распространении в слоистой  $M(\alpha_k)$  и однородной среде  $M_{oc}(\alpha_k)$ .

$$\Delta M(\alpha_k) = M_{oc}(\alpha_k) - M(\alpha_k).$$

Слои биологических тканей для упрощения расчетов принимаются плоскими и параллельными. Для вычисления проекции хода луча на фронтальный срез акустического поля используют закон Снеллиуса, и ее вычисление сводится к расчету тригонометрических функций для каждого из углов наклона луча  $\alpha_k$  [2].

Вычисление проекции хода акустического луча на фронтальный срез можно упростить, принимая, что синус и тангенс малого угла, выраженного в радианах, будет приближенно равняться значению угла, а также то, что отношение скоростей звука в биологических тканях и дистиллированной воде близки к единице. Тогда скорость звука в согласующем слое  $c_1$ , необходимая для корректировки местоположения фокального пятна будет определяться выражением, которое, по сути, является среднетолщинной скоростью звука слоистой системы  $c_{срм}$ :

$$c_{срм} = \frac{h_2 c_2 + h_3 c_3 + h_4 c_4}{h_2 + h_3 + h_4},$$

где  $c_n$  – скорость звука в слое,  $h_n$  – толщина слоя,  $n$  – порядковый номер слоя: 1 – согласующий слой, 2 – кожная ткань, 3 – жировая ткань, 4 – мышечная ткань.

Таким образом, для вычисления среднетолщинной скорости звука достаточно знать толщины слоев и скорость звука в каждом слое.

Результаты расчетов скорости звука согласующего слоя по методу, описанному в работе [2], и с использованием формулы для определения среднетолщинной скорости звука  $c_{срм}$ , дают близкие значения. Максимальная разница в скорости звука, определенной по двум методам, получена для наибольших из рассмотренных толщин жировой и мышечной ткани (по 60 мм), и составила 2,6 м/с и 0,8 м/с при расчете  $U_{\Sigma}$  для углов наклона  $\alpha_k$  до 45° (с шагом 5°) и до 30° соответственно.

В работе [1] для получения требуемой скорости звука в согласующем слое предлагается использовать раствор глицерина в дистиллированной воде рассчитанной концентрации. Исходя из концентрации раствора определяют его плотность и коэффициент затухания ультразвуковых волн.

При использовании согласующего слоя со среднетолщинной скоростью звука, сокращается суммарное отклонение проекции хода луча на фронтальный срез акустического поля и величина суммарного отклонения дистанции, преодолеваемой акустическими лучами, излученными отдельными источниками под углом к поверхности раздела сред. Расположение излучателей на антенной решетке с

поверхностью в форме сферического сегмента обеспечивает равное расстояние от источника ультразвуковых волн до ее геометрического фокуса. Таким образом, минимизация разницы в дистанции, преодолеваемой акустическими лучами в слоистой и однородной среде, приводит к сокращению разницы во времени распространения ультразвуковых волн от отдельных источников до геометрического фокуса антенной решетки. Для фокусирования ультразвуковых волн в импульсном режиме излучения, используемом в медицинской практике, важным параметром является время распространения ультразвуковых волн от отдельных источников, амплитуда и фаза колебания в точке желаемого фокуса.

Целью проведения исследования является апробация способа управления формированием характеристик и местоположением фокального пятна путем изменения физических параметров согласующего слоя.

Для выполнения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Исследование влияния изменения физических параметров согласующего слоя на распределение амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля при расположении излучателя под различными углами к поверхности раздела слоев;
- 2) Сравнение результатов эксперимента с результатами математического моделирования.

### Материалы и методы

Для решения поставленных задач была разработана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на Рисунке 1 [1].

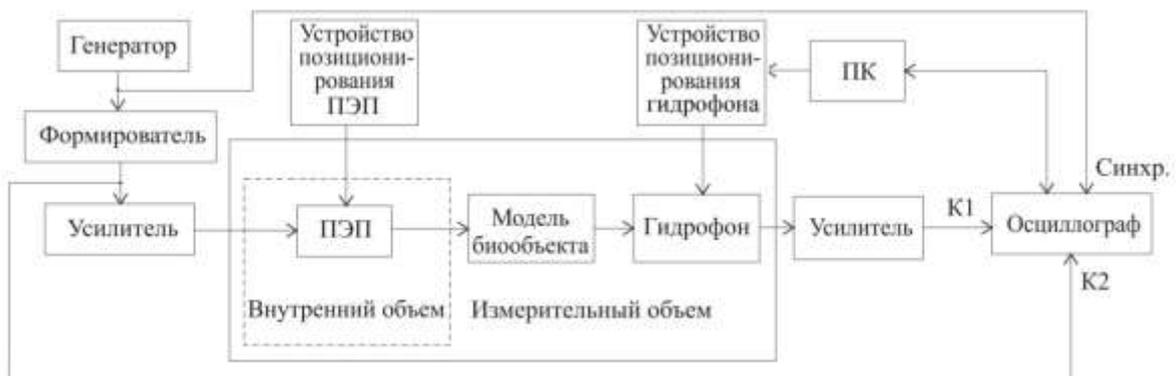


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки

Figure 1 – Block diagram of the experimental setup

На Рисунке 1 введены следующие обозначения: ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь, K1 и K2 – канал № 1 и № 2, ПК – персональный компьютер.

Внешний вид экспериментальной установки в сборе представлен на Рисунке 2.



Рисунок 2 – Экспериментальная установка  
Figure 2 – Experimental setup

Для формирования возбуждающего импульса использовался генератор с изменяемой опорной частотой от 800 Гц до 5 кГц, и формирователь, обеспечивающий регулировку длительности импульса от 1 до 10 мкс и линии задержки до 50 мкс. В экспериментальном исследовании использован возбуждающий импульс со следующими параметрами: амплитуда 50 В, длительность 1 мкс, частота повторения 1 кГц.

Возбуждающий импульс поступал на ультразвуковой излучатель с пьезоэлементом в виде диска диаметром 8 мм, работающий на продольных колебаниях по толщине с частотой 2 МГц. Сигнал, создаваемый ультразвуковым излучателем, проходя через слоисто-неоднородную структуру измерительного объема, принимался цилиндрическим гидрофоном диаметром 1,35 мм и чувствительностью 10 мкВ/Па.

Электрический сигнал с гидрофона, после усилителя, поступал на цифровой двухканальный осциллограф Rigol DS1052E с рабочей частотной полосой до 50 МГц. Для передачи данных от осциллографа к персональному компьютеру использовался интерфейс USB. Амплитуда принятого гидрофоном сигнала при распространении его в однородной среде (дистиллированной воде) после усиления составила 3В.

Внутренние размеры камеры измерительного объема, составляют 550 x 450 x 650 мм. Импульсный режим работы излучателя, используемый в экспериментальном исследовании, обеспечивает условия, аналогичные применяемым в медицинской практике и позволяет разделить во времени прямой и отраженный сигнал в условиях ограниченного объема рабочей среды [1].

Для создания слоисто-неоднородной среды в экспериментальном исследовании были использованы имитационные слои биологических тканей. Для целей экспериментального исследования материал имитационных слоев должен иметь акустические характеристики, близкие биологическим тканям, и обеспечивать равенство среднетолщинной скорости звука для сочетания имитационных и имитируемых слоев.

Акустические характеристики биологических тканей и имитационных слоев приведены в Таблице 1 [2].

Таблица 1 – Акустические характеристики биологических тканей и имитационных слоев

Table 1 – Acoustic characteristics of biological tissues and simulation layers

№	Среда	Скорость звука, м/с	Плотность среды, кг/м <sup>3</sup>	Импеданс в среде, 10 <sup>6</sup> , кг·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Затухание, м <sup>-1</sup> при f = 2 МГц
1.	Дистиллированная вода (при 22°C)	1489	1000	1,489	0,12
2.	Глицерин (при 20 °C)	1923	1261	2,425	2,33
3.	Кожная ткань	1610	1250	2,013	80
4.	Жировая ткань	1450	930	1,349	26
5.	Мышечная ткань	1570	1070	1,680	40
6.	Полиэтилен (имитация кожной ткани)	2000	930	1,860	80
7.	Парафин (имитация жировой ткани)	1460	915	1,336	80
8.	Раствор глицерина в дистиллированной воде, 14,9 % (имитация мышечной ткани)	1553	1039	1,614	0,45
9.	Раствор глицерина в дистиллированной воде, 14,6 %, (для $C_{срт}$ )	1552	1038	1,611	0,44

Для имитации выбрано атлетическое телосложение, так как для данного сочетания биологических тканей в работе [4] было получено максимальное смещение фокального пятна, по сравнению с сочетаниями биологических тканей, характерными для нормального, тучного телосложения и подкожного новообразования. Для атлетического телосложения в исследовании использованы следующие толщины слоев: согласующий слой 138 мм, кожная ткань 2 мм, жировая ткань 10 мм, мышечная ткань 50 мм.

Для создания согласующего жидкостного слоя в измерительной камере был создан внутренний объем, стенки которого были выполнены из полиэтилена толщиной 2 мм, совмещая функции одного из имитационных слоев. Позиционирование камеры внутреннего объема и системы перемещения гидрофона осуществляется по угольнику и микрометрическому уровню.

В экспериментальном исследовании измерение акустического давления возможно проводить только в жидкостном слое, поэтому в качестве материала, имитирующего слой мышечной ткани выбран раствор глицерина в дистиллированной воде, концентрация которого рассчитана исходя из равенства среднетолщинной скорости звука в имитационных и имитируемых слоях.

Регулирование скорости звука в согласующем слое осуществлялось при помощи изменения концентрации раствора глицерина в дистиллированной воде [1]. В экспериментальном исследовании использовался дистиллированный глицерин марки Д98 по ГОСТ 6824, массовая доля чистого глицерина в котором составляет не менее 98 %.

Для контроля температуры жидкости во внутренней камере и измерительной объеме использовался цифровой термометр ТК-5.06. Колебания температуры находились в пределах 22,5-22,6°C.

С целью устранения случайной погрешности, связанной с ручным перемещением гидрофона или с обработкой полученных данных, в экспериментальном исследовании была использована автоматическая система перемещения гидрофона с обработкой

полученных значений; вычисление среднего значения амплитуды сигнала позволило снизить влияние помех [1].

Система позиционирования представляет собой трехосевой координатный стол, в состав которого входят шаговые двигатели и блок управления перемещениями. Для управления перемещениями с персонального компьютера, сбора данных и записи протоколов экспериментальных исследований используется программа, созданная в среде разработки LabView, позволяющая задавать шаг, скорость и пределы перемещения по осям, время ожидания между шагами для фиксации установившихся параметров и количество выборок (отсчетов) значений в каждой точке исследования. Люфт в узлах и элементах системы позиционирования составляет менее 0,1 мм.

Ультразвуковой излучатель и гидрофон крепились на жестких держателях на глубине 300 мм. Держатель излучателя оснащен поворотным устройством в двух проекциях. Отсчет угла наклона излучателя по горизонтали осуществляли по угломеру с нониусом (угол поворота 0-320°, цена деления 2', предел допускаемой абсолютной погрешности  $\pm 5'$ ), закрепленному на поворотном устройстве. Устройство поворота излучателя в вертикальной плоскости использовалось для предварительной настройки его положения перед измерениями [1].

В ходе подготовительных этапов к измерениям осуществляется настройка ориентации излучателя и приемника, позиционирование внутренней камеры, имитационных слоев и перемещающего устройства.

Рассмотрим методику проведения измерений. На Рисунке 3 показана геометрия экспериментального исследования [5]. Угол наклона  $\alpha$  излучателя, расположенного в точке  $D$ , изменяли от 0° до 45°, с шагом 5°. С помощью гидрофона регистрировалось давление, создаваемое излучателем во фронтальном срезе акустического поля, перпендикулярном положению излучателя  $\alpha=0^\circ$  и проходящем через точку  $F$  [5].

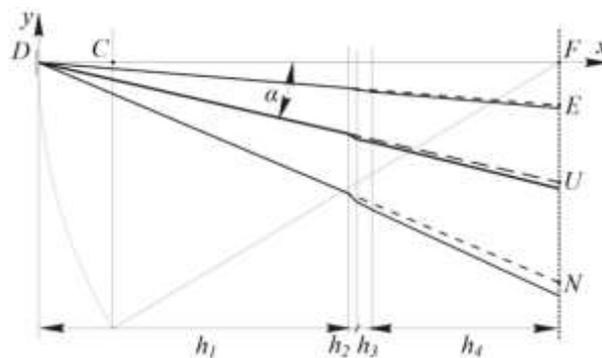


Рисунок 3 – Геометрия экспериментального исследования  
 Figure 3 – Geometry of an experimental study

Для оценки влияния изменения физических параметров согласующего слоя на распределение давления во фронтальном срезе акустического поля, внутренний объем в первой части исследования наполнялся дистиллированной водой, а во второй части исследования – рассчитанной концентрацией раствора глицерина в дистиллированной воде для получения среднетолщинной скорости звука.

Шаг измерения амплитуды акустического давления во фронтальном срезе составлял 0,25 мм, и уменьшался до 0,1 мм в области максимума распределения. При каждом изменении угла наклона излучателя  $\alpha$ , проводили пять измерений амплитуды акустического давления во фронтальном срезе. Результирующая амплитуда акустического давления в каждой точке исследования получена усреднением пяти

измерений. Скорость перемещения гидрофона, исключая пропуск шагов и удовлетворительная по времени проведения исследования, была определена экспериментально и составила 2 мм/с [1].

Антенная решетка, имеющая форму сферического сегмента, обеспечивает равное расстояние от каждого излучателя, расположенного на ее поверхности до геометрического фокуса. В экспериментальном исследовании, излучатель не изменяет своего расположения, и расстояние до фронтального среза увеличивается с ростом угла наклона излучателя  $\alpha$ . Поэтому для исследования влияния изменения физических параметров согласующего слоя в экспериментальном исследовании анализируется приведенное время  $T^*$  распространения ультразвукового импульса в слоисто-неоднородной среде при изменении угла наклона излучателя  $\alpha$ . Для вычисления приведенного времени  $T^*$  от действительных измеренных значений отнималось вычисленное время на прохождение в экспериментальном исследовании дополнительной дистанции до фронтального среза акустического поля. Измерение времени распространения импульса проводили в ручном режиме по первой положительной полуволне в области максимума распределения амплитуды акустического давления.

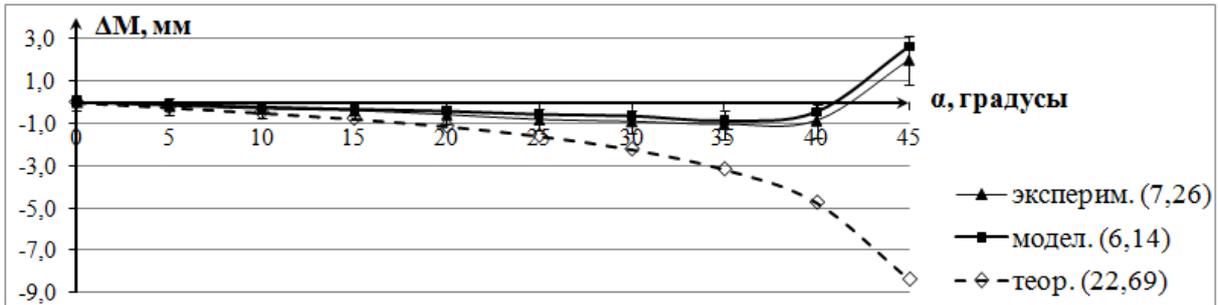
В результате экспериментального исследования были получены поперечные распределения амплитуды акустического давления, создаваемого ультразвуковым излучателем в слоисто-неоднородной среде при изменении угла его наклона  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ .

Для сравнения результатов экспериментального исследования с расчетными значениями было проведено математическое моделирование распространения ультразвуковых волн в слоисто-неоднородной среде на основе математической модели, описанной в [4], с использованием параметров экспериментального исследования (размер ультразвукового излучателя, длительность импульса, излучаемая частота, геометрия исследования, толщины и акустические характеристики слоев).

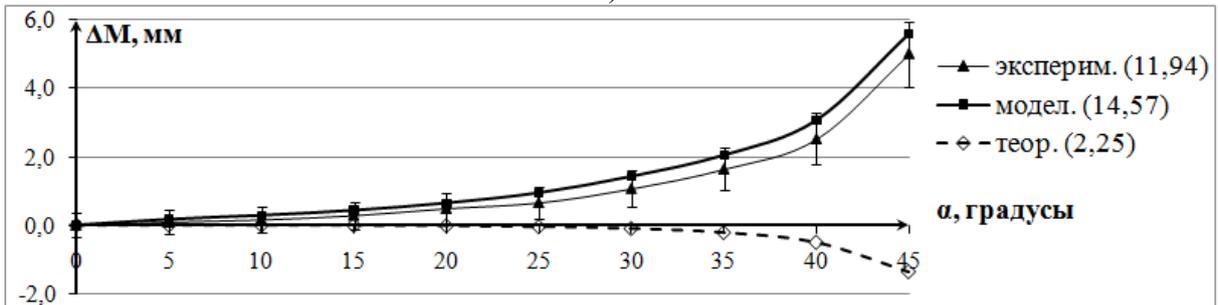
## Результаты

Для анализа влияния изменения физических параметров согласующего слоя на распределение амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля, создаваемого ультразвуковым излучателем при изменении угла его наклона, были выбраны параметры: координата и амплитуда максимума давления, приведенное время распространения ультразвукового импульса через слоисто-неоднородную среду, ширина диаграммы по уровню 0,707 от максимального значения [5].

На Рисунке 4 показано отклонение максимума амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля  $\Delta M_{\text{эксперим.}}$  (сплошная тонкая линия) при распространении ультразвуковых волн через имитационные слои биологических тканей, от координат, рассчитанных геометрически для хода луча в однородной среде. На Рисунке 4 для сравнения приведены значения отклонения максимума амплитуды акустического давления, определенные по результатам математического моделирования  $\Delta M_{\text{модел.}}$  (сплошная жирная линия), и результаты теоретической оценки  $\Delta M_{\text{теор.}}$  отклонения хода акустического луча, рассчитанные по законам Снеллиуса. На Рисунке 4 в скобках указана величина суммарного отклонения максимумов амплитуды давления во фронтальном срезе  $U_{\Sigma}$  (в миллиметрах), рассчитанная для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом  $5^\circ$ .



а)



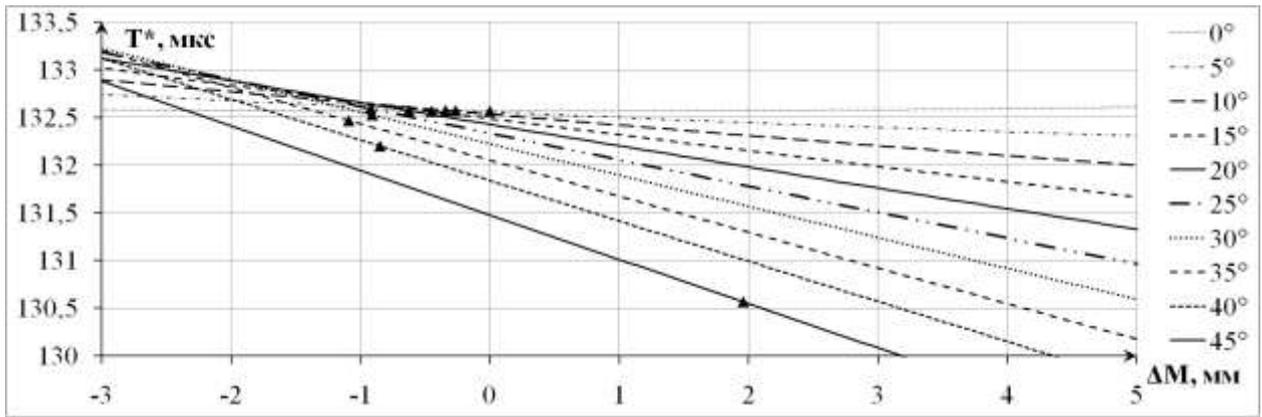
б)

Рисунок 4 – Отклонение координаты максимума амплитуды давления  $\Delta M$  во фронтальном срезе акустического поля, создаваемого ультразвуковым излучателем в слоисто-неоднородной среде, при изменении угла наклона излучателя  $\alpha$ : а) в согласующем слое находится дистиллированная вода; б) в согласующем слое находится раствор глицерина в дистиллированной воде рассчитанной концентрации  
Figure 4 – Deviation of the coordinate of the maximum pressure amplitude  $\Delta M$  in the frontal section of the acoustic field generated by the ultrasonic emitter in a layered inhomogeneous medium, when the angle of inclination of the emitter  $\alpha$ : а) in the matching layer is distilled water; б) in the matching layer is a solution of glycerol in distilled water of the calculated concentration

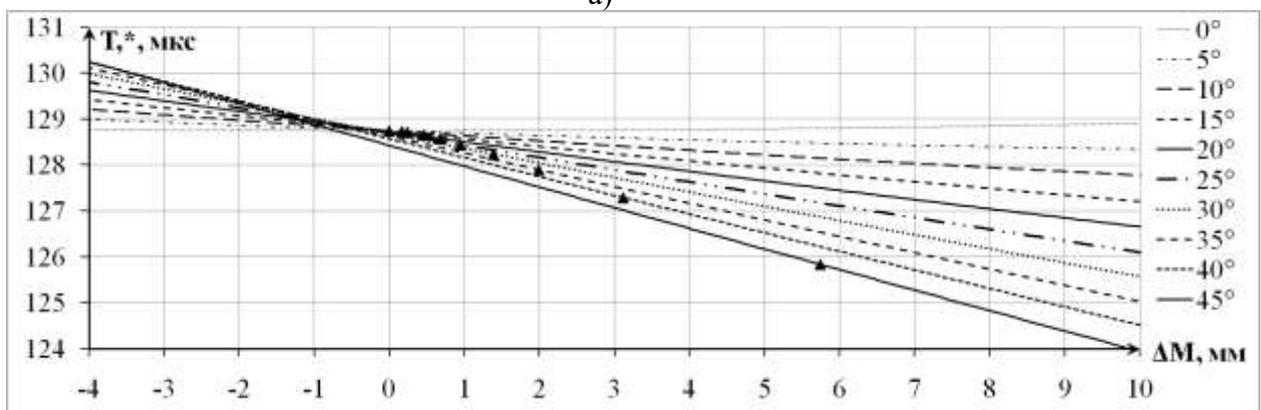
Из Рисунка 4а видно, что при распространении ультразвуковых волн через согласующий слой, наполненный дистиллированной водой и имитационные слои биологических тканей, имеет место расхождение в результатах отклонения максимумов амплитуды акустического давления  $\Delta M_{\text{экспер.}}$  и  $\Delta M_{\text{модел.}}$ , полученных в ходе экспериментального исследования и математического моделирования, от значений  $\Delta M_{\text{теор.}}$ , рассчитанных по закону Снеллиуса для хода акустического луча. Смещение максимума амплитуды акустического давления во фронтальном срезе по результатам экспериментального исследования относительно рассчитанных теоретически значений происходит по направлению к источнику ультразвуковых волн.

Как видно из Рисунка 4б, изменение физических параметров согласующего слоя на расчетные, приводит к дополнительному смещению максимума амплитуды акустического давления по направлению к источнику ультразвуковых волн. При этом суммарное отклонение максимумов амплитуды акустического давления  $U_{\Sigma}$  увеличивается от значения 7,26 мм до значения 11,94 мм.

На Рисунке 5 представлено приведенное время распространения ультразвукового импульса от излучателя до фронтального среза акустического поля через имитационные слои биологических тканей  $T^*$ , для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Для каждого распределения отмечено положение точки с максимальной амплитудой акустического давления.



а)



б)

Рисунок 5 – Приведенное время  $T^*$  распространения ультразвукового импульса от излучателя до фронтального среза акустического поля, через имитационные слои биологических тканей, для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ : а) в согласующем слое находится дистиллированная вода; б) в согласующем слое находится раствор глицерина в дистиллированной воде рассчитанной концентрации

Figure 5 – The reduced time  $T^*$  of the propagation of an ultrasonic pulse from the emitter to the frontal section of the acoustic field through the simulation layers of biological tissues, for angles of inclination of the emitter  $\alpha$  from  $0^\circ$  to  $45^\circ$ : a) distilled water is in the matching layer; b) in the matching layer is a solution of glycerol in distilled water of the calculated concentration

Анализ данных, представленных на Рисунке 5а показывает, что минимальная разница в значениях приведенного времени распространения импульса  $T^*$  получена в координате  $\Delta M = -1$  мм, и составляет 0,1 мкс для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  и 0,6 мкс для  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Полученная разница времени распространения импульса составляет 20 % периода колебания на частоте 2 МГц для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ , и превышает период колебания для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ .

По результатам анализа данных, представленных на Рисунке 5б, минимальная разница в значениях приведенного времени распространения импульса  $T^*$  получена в координате  $\Delta M = -0,2$  мм, и составляет 0,03 мкс (6 % от периода колебания) для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ , и 0,25 мкс (50 % периода колебания на частоте 2 МГц) для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ .

При распространении ультразвуковых волн через согласующий слой, наполненный дистиллированной водой и имитационные слои биологических тканей, с

увеличением угла наклона излучателя  $\alpha$  амплитуда акустического давления падает. Так, с увеличением угла наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ , амплитуда акустического давления уменьшается на 31 %, а для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  – уменьшается на 71 %. При использовании согласующего слоя с рассчитанными характеристиками (обеспечивающими среднетолщинную скорость звука) вместо дистиллированной воды, абсолютное значение амплитуды акустического давления уменьшается на 7,7 % при угле наклона излучателя  $\alpha = 0^\circ$ , при угле  $\alpha = 30^\circ$  уменьшается на 6,4 %, и увеличивается на 10,2 % при  $\alpha = 45^\circ$ .

По результатам экспериментального исследования, в случае распространения ультразвуковых волн через согласующий слой, наполненный дистиллированной водой и имитационные слои биологических тканей, при увеличении угла наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , ширина диаграммы распределения амплитуды акустического давления во фронтальном срезе увеличивается в 1,85 раза – от 19,6 мм до 36,3 мм. При использовании в качестве согласующего слоя раствора глицерина в дистиллированной воде рассчитанной концентрации изменение ширины диаграммы распределения амплитуды акустического давления имеет сходный характер: для углов наклона излучателя  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , диаграмма расширяется в 1,86 раза – от 20,2 мм до 37,65 мм.

При увеличении угла наклона излучателя  $\alpha$ , расширение диаграммы распределения амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля принимает ассиметричный характер относительно максимума распределения. Часть диаграммы, удаленная от излучателя, преобладает в ширине на 1 мм при угле наклона излучателя  $\alpha = 30^\circ$  и до 2 мм при угле наклона излучателя  $\alpha = 45^\circ$ .

На основе модели, описанной в [4], используя параметры экспериментального исследования (акустические характеристики и толщины слоев, размер излучателя, частота колебаний) было проведено математическое моделирование акустического поля, создаваемого фокусирующей антенной решеткой в слоисто-неоднородной среде.

Антенная решетка представляла собой часть сферической поверхности радиусом 200 мм, с произвольно расположенными на ней излучающими элементами в форме диска диаметром 8 мм. Для оценки эффективности способа управления формированием и местоположением фокального пятна, основанного на изменении физических характеристик согласующего слоя, были исследованы две антенные решетки, с углом раскрытия сферического сегмента  $\theta = 60^\circ$  и  $90^\circ$  (максимальным углом наклона излучателей  $\alpha = 30^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно). При этом был обеспечен равный процент активной площади поверхности: на антенной решетке, имеющей угол раскрытия сферического сегмента  $\theta = 60^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , размещались соответственно 321 и 703 излучателя.

По результатам математического моделирования акустического поля, создаваемого фокусирующей антенной решеткой в слоисто-неоднородной среде (имитационных слоях биологических тканей), при изменении параметров согласующего слоя на расчетные значения, обеспечивающие среднетолщинную скорость звука, наблюдались следующие изменения:

- максимум амплитуды акустического давления сместился вдоль направления распространения ультразвуковых волн к геометрическому фокусу антенной решетки. Для антенной решетки с  $\theta = 60^\circ$ , произошло смещение от значения -3,05 мм до значения -0,1 мм, а для антенной решетки с  $\theta = 90^\circ$ , соответственно от -3,8 мм до -0,25 мм;

- амплитуда акустического давления в фокальной области, создаваемая антенной решеткой с  $\theta = 60^\circ$  уменьшилась на 8,2 %, а для антенной решетки с  $\theta = 90^\circ$ , увеличилась на 0,5 %;

- размер фокального пятна (по уровню 0,707 от максимального значения амплитуды акустического давления) вдоль направления распространения

ультразвуковых волн для антенной решетки с  $\theta = 60^\circ$  увеличился от 4,6 мм до 5,05 мм, а для антенной решетки с  $\theta = 90^\circ$  не изменился и составил 2,4 мм;

- размер фокального пятна во фронтальной плоскости, проходящей через максимум амплитуды акустического давления, для антенной решетки с  $\theta = 60^\circ$  увеличился от 0,75 мм до 0,78 мм, а для антенной решетки с  $\theta = 90^\circ$  не изменился и составил 0,57 мм.

### Обсуждения

Результаты экспериментального исследования и математического моделирования распространения ультразвуковых волн в слоисто-неоднородной среде имеют общие закономерности изменения исследуемых параметров во фронтальном срезе акустического поля.

Как видно из Рисунка 3, расстояние, преодолеваемое ультразвуковой волной от излучателя до отдельных участков фронтального среза акустического поля будет отличаться (например, отрезок DE и DN). При распространении ультразвуковых волн через имитационные слои биологических тканей и при увеличении угла наклона излучателя  $\alpha$  эта разница будет увеличиваться. Амплитуда акустического давления будет уменьшаться после прохождения каждого из имитационных слоев и с увеличением расстояния, преодолеваемого ультразвуковой волной. По этой причине наблюдается смещение максимума амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля по направлению к источнику ультразвуковых волн, относительно координат, рассчитанных по закону Снеллиуса для акустического луча, проходящего через имитационные слои биологических тканей.

Асимметричное расширение диаграммы распределения амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля при увеличении угла наклона излучателя  $\alpha$ , также объясняются геометрией экспериментального исследования.

При увеличении угла наклона излучателя  $\alpha$  наблюдается значительное уменьшение амплитуды акустического давления во фронтальном срезе. Таким образом, с ростом угла раскрытия сферического сегмента  $\theta$  увеличение амплитуды акустического давления в фокальной области непропорционально увеличению излучающей площади поверхности.

При выборе геометрических размеров антенной решетки известна закономерность: чем больше угол  $\theta$  или «зрачок» антенной решетки, тем меньше продольные и поперечные размеры фокального пятна и легче достигается высокая плотность энергии в фокусе [6]. Поэтому, целесообразность применения антенных решеток с углом раскрытия сферического сегмента  $\theta$  более  $60^\circ$  будет определяться толщинами и акустическими характеристиками слоисто-неоднородной среды.

По результатам экспериментального исследования и математического моделирования видно, что изменение физических характеристик согласующего слоя на расчетные значения, обеспечивающие среднетолщинную скорость звука, оказывает незначительное влияние на ширину диаграммы распределения амплитуды давления, создаваемого отдельными излучателями, во фронтальном срезе акустического поля. Результаты математического моделирования акустического поля, создаваемого отдельными излучателями в слоисто-неоднородной биологической среде (для нормального, атлетического, тучного телосложения или подкожного новообразования [4]), показывают, что изменение физических характеристик согласующего слоя на расчетные значения приводит к изменению ширины диаграммы распределения

амплитуды акустического давления на 0,15-0,6 мм для углов наклона излучателя  $\alpha$  до  $45^\circ$ .

Изменения в диаграмме распределения амплитуды давления во фронтальном срезе акустического поля, вызванные изменением физических параметров согласующего слоя будут зависеть от структуры и толщины биологических слоев, концентрации раствора в согласующем слое и угла раскрыва сферического сегмента  $\theta$  антенной решетки.

Результаты представленных исследований показывают, что применение согласующего слоя с рассчитанными параметрами приводит к изменению траектории и времени распространения ультразвуковых волн таким образом, что в окрестности геометрического фокуса антенной решетки обеспечивается равное время распространения ультразвуковых волн от отдельных излучателей. Таким образом, несмотря на то, что при использовании согласующего слоя с рассчитанными физическими параметрами происходит увеличение смещения максимума амплитуды давления  $\Delta M$ , создаваемого отдельными излучателями во фронтальном срезе акустического поля, отклонение фокального пятна от геометрического фокуса антенной решетки в направлении распространения ультразвуковых волн сокращается. Причем, использование среднетолщинной скорости звука в качестве расчетных параметров согласующего слоя для корректировки местоположения фокального пятна дает удовлетворительные результаты как для антенных решеток с углом раскрыва сферического сегмента  $\theta = 60^\circ$ , так и для  $\theta = 90^\circ$ .

Результаты математического моделирования показывают, что с ростом угла раскрыва сферического сегмента  $\theta$  антенной решетки, уменьшается разница между амплитудой акустического давления в фокусе, полученной при использовании расчетных параметров согласующего слоя вместо дистиллированной воды. Это объясняется спецификой изменения амплитуды акустического давления, создаваемого отдельными излучателями во фронтальном срезе акустического поля при изменении физических характеристик согласующего слоя. Применение расчетных параметров согласующего слоя, при угле наклона излучателя  $\alpha = 0^\circ$ , приводит к уменьшению амплитуды акустического давления по причине большего коэффициента затухания в растворе глицерина в дистиллированной воде. С ростом угла наклона излучателя  $\alpha$ , применение расчетных параметров согласующего слоя изменяет траекторию распространения, сокращая дистанцию, проходимую ультразвуковыми волнами до фронтального среза, тем самым увеличивая амплитуду акустического давления.

### Заключение

Результаты исследования подтверждают возможность применения способа корректировки местоположения фокального пятна, создаваемого фокусирующей антенной решеткой в форме сферического сегмента, при помощи изменения физических характеристик согласующего слоя.

Требуемые для корректировки местоположения фокального пятна характеристики согласующего слоя можно найти, используя формулу для определения среднетолщинной скорости звука в биологических тканях. Для этого необходимо знать толщины и скорость звука для каждой ткани биологической слоистой системы.

Способ управления формированием характеристик и местоположением фокального пятна на основе изменения физических параметров согласующего слоя может быть использован как для антенных решеток, так и для цельных излучателей, имеющих форму сферического сегмента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Домбругова Е.Г., Чернов Н.Н. Экспериментальная установка для исследования способности управления ультразвуковым пучком при его прохождении через слоистые среды. *Инженерный вестник Дона*. 2014;4-2(32). Доступно по: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2646> (дата обращения: 25.09.2019).
2. Домбругова Е.Г., Чернов Н.Н. Использование переходного слоя для управления формированием фокального пятна. *Сборник трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества»*. Таганрог: ГЕОС. 2012;1:232-235.
3. Домбругова Е.Г., Чернов Н.Н. Метод управления параметрами воздействующего сфокусированного ультразвукового поля на биологические объекты. *Инженерный вестник Дона*. 2016;3(42). Доступно по: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3737> (дата обращения: 25.09.2019).
4. Домбругова Е.Г., Чернов Н.Н. Исследование способов управления формированием фокального пятна фазированной антенной решеткой в слоисто-неоднородной среде. *Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Медицинские информационные системы МИС-2016»*. Ростов-на-Дону: издательство Южного федерального университета, 2016:211-213.
5. Домбругова Е.Г. Экспериментальные исследования прохождения ультразвукового пучка через изменяемую слоистую структуру. *Инженерный вестник Дона*. 2014;2(29). Доступно по: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2411> (дата обращения: 25.09.2019).
6. Розенберг Л.Д. Фокусирующие излучатели ультразвука. *Физика и техника мощного ультразвука*; Под ред. Л.Д. Розенберга. Кн.1. Источники мощного ультразвука. М.: Наука; 1967:149-206.

## REFERENCES

1. Dombrugova E.G., Chernov N.N. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya sposobnosti upravleniya ul'trazvukovym puchkom pri ego prohozhdenii cherez sloistye sredy. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2014;4-2(32). Available from: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2646> (accessed: 25.09.2019).
2. Dombrugova E.G., Chernov N.N. Ispol'zovanie perekhodnogo sloya dlya upravleniya formirovaniem fokal'nogo pyatna. *Sbornik trudov nauchnoj konferencii «Sessiya nauchnogo soveta RAN po akustike i XXV sessiya Rossijskogo akusticheskogo obshchestva»*. –Taganrog: GEOS. 2012;1:232-235.
3. Dombrugova E.G., Chernov N.N. Metod upravleniya parametrami vozdeystvuyushchego sfokusirovannogo ul'trazvukovogo polya na biologicheskie ob"ekty. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2016;3(42). Available from: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3737> (accessed: 25.09.2019).
4. Dombrugova E.G., Chernov N.N. Issledovanie sposobov upravleniya formirovaniem fokal'nogo pyatna fazirovannoj antennoj reshetkoj v sloisto-neodnorodnoj srede. *Sbornik trudov vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Medicinskie informacionnye sistemy MIS-2016»*. Rostov-na-Donu: izdatel'stvo YUzhnogo federal'nogo universiteta; 2016:211-213.
5. Dombrugova E.G. Eksperimental'nye issledovaniya prohozhdeniya ul'trazvukovogo puchka cherez izmenyaemuyu sloistuyu strukturu. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2014;2(29).

Available from: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2411> (accessed: 25.09.2019).

6. Rozenberg L.D. Fokusiruyushchie izluchateli ul'trazvuka. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka*; Pod red. L.D. Rozenberga. Kn.1. Istochniki moshchnogo ul'trazvuka. M.: Nauka; 1967:149-206.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Домбругова Елена Георгиевна**, ООО «НПП «Тяжпрессмаш-Деталь», Таганрог, Российская Федерация.

**Elena G. Dombrugova**, ООО «NPP “Tyazhpressmash-Detal”», Taganrog, Russian Federation.

**Чернов Николай Николаевич**, Профессор, доктор технических наук, Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, кафедра гидроакустической и медицинской техники, Таганрог, Российская Федерация.  
ORCID: 0000-0002-2438-4825

**Nikolay N. Chernov**, Professor, Doctor of Engineering sciences, Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering, Department of Hydroacoustic and Medical Engineering, Taganrog, Russian Federation.