

А. В. Леонова, В. В. Гривцов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОХОЖДЕНИЯ МОЩНЫХ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧЕРЕЗ СЛОИСТУЮ СТРУКТУРУ
БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД**

Работа посвящена исследованию изменения поля мощного фокусирующего пьезопреобразователя при взаимодействии ультразвука с различными биосредами, в том числе с биотканями организма. Рассматривается задача формирования акустического поля в биоткани как слоистой структуры, образованного при прохождении звуковых волн через границы раздела. Исследуется коэффициент прохождения в зависимости как от параметров системы слоев, так и от параметров источника мощного ультразвука.

Ультразвук; биосреда; коэффициент прохождения.

A. V. Leonova, V. V. Grivcov

**THE MODELLING PASSING PROCESSES OF A POWERFUL ULTRASOUND
OSCILLATIONS THROUGH SKIN STRUCTURE OF BIO MEDIUM**

The research about the change acoustical field the powerful ultrasound source by ultrasound interaction with bio tissue. The forming acoustical field problem is examine. We fined the acoustical field, which created after sound wave across passing the interfaces. The transmission factor is calculate depending on operation factors layers and operation factors the powerful ultrasound source.

Ultrasound; bio medium; transmission factor.

Использование поля мощных фокусирующих преобразователей в режиме излучения для целей диагностики и воздействий приводит к необходимости исследования влияния свойств различных биологических сред на распространение ультразвуковых волн. Так как область прохождения звука представляет собой слоистую структуру – вода, ил, донные отложения, то возникает вопрос о степени и характере влияния составляющих ее слоев на характеристики и параметры формируемого поля мощных фокусирующих излучателей.

В качестве источника мощного ультразвука широкое применение находят многоэлементные пьезоэлектрические фокусирующие излучатели ультразвуковых волн – силовая антенная решетка. Диаметр зрачка ударно-волновой головки колеблется от 300 мм до 400 мм, рабочая дистанция литотриптера, т.е. расстояние от среза зрачка до терапевтического фокуса, варьируется от 135 мм до 170 мм [1]. При таких параметрах ударно-волновой головки, ультразвуковые ударные волны будут входить в слоистую систему под углами в диапазоне от 0° до 45° (рис. 1).

В результате такой геометрии источника мощного ультразвука формируется фокальное пятно заданного размера (обычно 3-5мм). Представляется интересным проследить, каким образом изменятся параметры поля в фокальной области в зависимости от угла вхождения УЗ колебаний в среду. Задача формирования акустического поля в биосреде как слоистой структуры заключается в нахождении зависимости пространственного распределения поля от параметров слоя. Искомое поле представляет собой сформированное в слое ила поле, образованное исходной волной после прохождения полубезграничного пространства – воды. Такое поле

можно представить в виде волны, образованной в результате многократных преломлений на границе слоя.

Параметры искомого поля могут быть получены посредством введения соответствующих числовых значений коэффициентов прохождения.

Рассмотрим геометрию задачи прохождения звуковых волн через границы раздела: вода, ил, донные отложения (рис. 2). Полубесконечной среде, из которой падает плоская волна, присвоим номер 1, слою ила – номер 2, а полубесконечной среде, в которую проходит волна, донным отложениям присвоим номер 3. Пусть на нижнюю границу слоя 2 под произвольным углом падает плоская волна. Плоскость падения волны будем считать совмещенной с плоскостью xz .

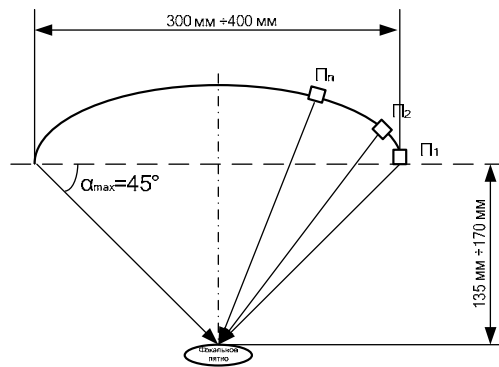


Рис. 1. Ударно-волновая головка пьезоэлектрического литотриптера

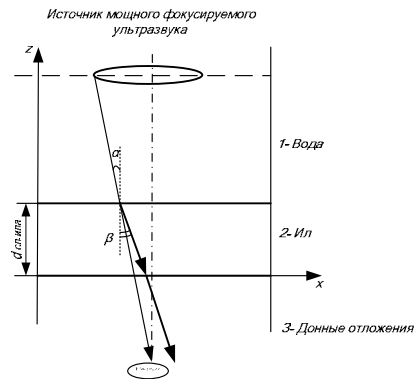


Рис. 2. Геометрия задачи – прохождение ультразвуковой волны через слои

Найдем коэффициент прохождения при произвольном угле падения плоской волны на границы раздела. Обозначим коэффициент прохождения или прозрачности через W . Предполагаем, что временная зависимость дается множителем $\exp(-i\omega t)$. Тогда выражения для преломленной волны в нижней среде запишется в виде (для сокращения множитель $\exp(-i\omega t)$ опускаем).

$$P_{\text{прош}} = WA e^{ik_j z}, \quad (1)$$

где $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – волновое число, k_j – волновое число для j -слоя.

Величины W определяются из условий на границе. Они заключаются в непрерывности p и v_z – нормальной к границе компоненты скорости частиц среды.

Коэффициент прохождения для произвольного числа слоев, равного по определению отношению амплитуд звукового давления в прошедшей и падающей волнах, задается формулой [2]:

$$W = A_1 / A_{n+1} = \prod_{j=1}^n (Z_{\text{ex}}^{(j)} + Z_j) / (Z_{\text{ex}}^{(j)} + Z_{j+1}) e^{i\varphi_j}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{ex}}^{(j)}$ – «входной» импеданс на верхней границе слоя, а $j = 1, 2, \dots, n$ – номер слоя.

Импеданс плоской волны в j -й среде находим по формуле

$$Z_j \equiv \alpha \rho_j / k_{jz} = \rho_j c_j / \cos \alpha_j \quad (3)$$

Входной импеданс j -го слоя $Z_{ex}^{(j)}$ задается следующей формулой [1]:

$$Z_{ex}^{(j)} = \frac{Z_{ex}^{(j-1)} - iZ_j \operatorname{tg}(k_{jz} d_j)}{Z_j - iZ_{ex}^{(j-1)} \operatorname{tg}(k_{jz} d_j)} Z_j \quad (4)$$

Толщина слоя d_j пересчитывается по формуле

$$d_j = \frac{d_{ил}}{\cos(\alpha_2)} \quad (5)$$

где $d_{ил}$ – толщина слоя ила.

Углы падения связаны между собой через закон преломления Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (6)$$

Значения импедансов сред и скорости распространения в них звука даны в табл.1

Проследим зависимость коэффициента прохождения от угла падения. Для формирования короткого импульса, используемого в локации, частота колебаний должна быть в пределах от 1 до 3 МГц. График зависимости коэффициента прохождения от угла падения для частот: 1МГц, 1,5МГц, 2МГц, 3 МГц представлен на рис. 3.

Таблица 1

Характеристики сред

№	Среда	Импеданс в среде, $кгм^{-2} \cdot с^{-1}$	Скорость звука в среде, $м/с$
1	Вода	$1,52 \cdot 10^6$	1496
2	Ил	$1,38 \cdot 10^6$	1450
3	Донные отложения	$1,68 \cdot 10^6$	1575

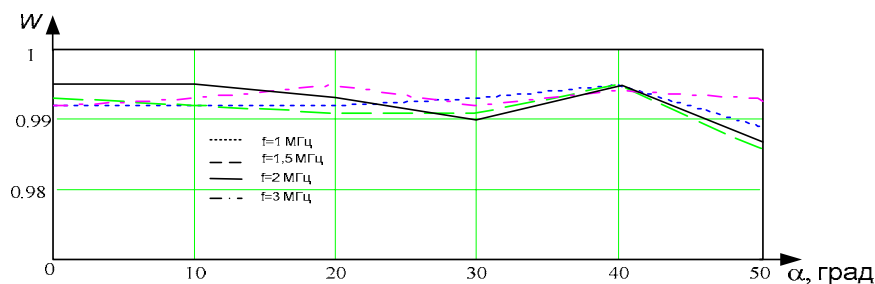


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения от угла падения

На рис.3 видно, что коэффициент прохождения при изменении угла ввода изменяется не линейно, имея свои максимумы и минимумы, характер изменения коэффициента прохождения в зависимости от частоты излучателя слабо выраженный.

Кроме этого, учитывая коэффициенты преломления сред, были учтены особенности фокусировки акустической волны внутри биообъекта. На рис. 4 представлена модель фокусирующей системы.

На рис. 5 представлена зависимость координаты точки фокусировки в зависимости от угла падения волны. Так как координата положения точки фокусировки зависит еще и от толщины слоя (толщина ила колеблется от 1 мм до 7 мм), были построены зависимости для следующих значений толщин слоя ила: 1мм, 5мм, 7мм.

На рис. 5 видно, что в зависимости от угла ввода акустический луч смещается относительно начального положения, так если бы он входил в среду нормально. Толщина илового слоя значительно влияет на изменение координаты точки фокусировки. Если при малых толщинах (порядка 1 мм) жирового слоя такое смещение не значительно, то уже при толщине 5 мм смещение достигает размеров больших, чем фокусное пятно. Таким образом, при различных углах вхождения, а также в зависимости от толщины слоя имеет место расфокусировка ультразвукового луча, в результате чего происходит размывание фокусного пятна. А учитывая, что диаметр фокусного пятна соответствует диаметру конкреций и варьируется в пределах от 3 мм до 5 мм, допускать такую расфокусировку невозможно.

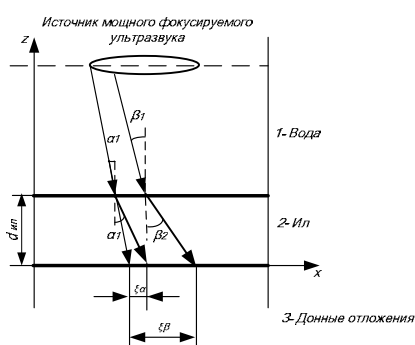


Рис. 4. Модель фокусирующей системы

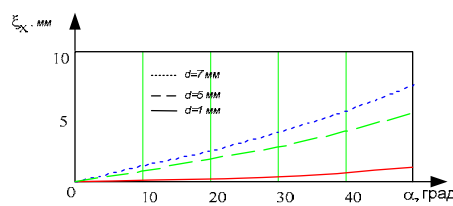


Рис.5. Зависимость координаты точки фокусировки от угла падения

Решение поставленной задачи позволит проводить корректировку сфокусированного терапевтического луча и повысить точность при диагностике донных отложений и визуализации внутренних структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка пьезоэлектрического генератора ударно-волновых импульсов для комплекса «Литотриптер-Медолит». Отчет о НИР № ГР 01200800986. Договор № 13649 от 1.09.2007. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2008. – С.115.
2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах: учебное пособие для вузов. – М.: АН СССР, 1973. – 504 с.

Леонова Антонина Валерьевна

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: antonina_tsure@mail.ru

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8 (8634) 37-17-95

Гривцов Владимир Владиславович

E-mail: gvv@tsure.ru

Leonova Antonina Valerievna

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: antonina_tsure@mail.ru

44, Nekrasovsky, GSP-17a, Taganrog, 347928, Russia, Ph.: +7 (8634) 37-17-95

Grivcov Vladimir Vladislavovich

E-mail: gvv@tsure.ru

УДК 517.958:550.3 + 27.41.77

А. С. Черепанцев

ОЦЕНКА СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЯ В МОДЕЛИ БЛОКОВ С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ¹

В работе рассмотрена механическая модель блоковой упругосвязанной среды. Получено достаточное условие сходимости решения системы нелинейных уравнений, определяющих эволюцию модели. Проведена оценка скорости сходимости итерационного процесса.

Модель прерывистого скольжения; самоорганизованное критическое состояние; достаточное условие локальной сходимости.

A. S. Cherepantsev

THE ESTIMATION OF SOLUTION CONVERGENCE SPEED IN BLOCK MODEL WITH ELASTIC INTERACTION

The mechanical model of elastical block media is explored. The sufficient condition of solution convergence of nonlinear system of equations for model evolution is obtained. The estimation of convergence speed in iteration process is carried out.

Stick-slip model; self-organized criticality; sufficient condition of convergence.

Одна из моделей для описания закономерностей в пространственной, временной и энергетической областях тектонического процесса в дискретной среде – модель прерывистого скольжения [1] системы блоков с упругими связями вызвала огромный интерес, став мощным инструментом в понимании динамики геофизической среды и сейсмичности. Одной из наиболее значимых в семействе моделей на основе модели прерывистого скольжения явилась клеточная двумерная модель

¹ Работа выполнена при поддержке гранта НШ-799.2008.5, гранта РНПВШ 2.1.1./6584