

УДК 620.179.16+620.19+534.231

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОХОДНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК В ТРУБАХ И ПРУТКАХ

*Ю. В. МЫШКИН, К. В. ПЕТРОВ*

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова»

Ижевск, Россия

UDC 620.179.16+620.19+534.231

## MODELING THE ACOUSTIC FIELD OF THROUGH-TYPE ULTRASONIC TRANSDUCER AND PHASED ARRAYS IN PIPES AND BARS

*YU. V. MYSHKIN, K. V. PETROV*

### **Аннотация**

В работе представлены основные подходы к моделированию акустических полей проходных электромагнитно-акустических преобразователей и фазированных решеток для контроля прутков и труб. Рассмотрены особенности моделирования распространения акустических волн методом конечных элементов.

### **Ключевые слова:**

численное моделирование, акустическое поле, электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП), метод конечных элементов, фокусировка, фазированная решётка, труба, пруток.

### **Abstract**

In this work the basic approaches to modeling the acoustic fields of through-type electromagnetic-acoustic transducers and phased arrays for testing of bars and pipes are represented. The features of modeling the propagation of acoustic waves by finite element method are considered.

### **Key words:**

numerical simulation, acoustic field, electromagnetic-acoustic transducer (EMAT), finite element method, focusing, phased array, pipe, bar.

На сегодняшний день неотъемлемым этапом при разработке эффективных ультразвуковых преобразователей, а также фазированных решеток является компьютерное моделирование. Моделирование позволяет на этапе проектирования выявить недостатки конструкции преобразователей, оптимизировать их с позиций максимальной эффективности преобразования [1, 2], исследовать и оптимизировать диаграмму направленности преобразователей и фазированных решеток [3, 4]. Также моделирование позволяет исследовать акустический тракт при контроле ультразвуковыми преобразователями [5], выявить закономерности взаимодействия акустиче-

ских волн с дефектами различного типа [6, 7] и их местоположения в различных объектах контроля, тем самым определить влияние конкретного дефекта на результаты контроля.

При моделировании акустических полей и распространения акустических волн, как правило, используют специализированные программные продукты [8, 9]. Для учёта взаимодействия с другими видами полей, например, электромагнитным, применяют комплексный подход [6, 10–12] или возможности пакетных САЕ-программ, одним из которых является COMSOL Multiphysics.

Вызывают интерес акустические поля электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей и фазированных решеток в ограниченных пространствах, таких как прутки и трубы. Формирование акустических полей в ограниченных пространствах подчинено сложным процессам распространения и взаимодействия ультразвуковых волн, таким как отражение, трансформация, интерференция, дифракция и т.д., поэтому, использование классических подходов к расчету акустического поля затруднено. Эффективным способом расчета акустических полей ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток является моделирование методом конечных элементов. Одной из наиболее функциональных и перспективных программных сред для моделирования физических процессов является среда COMSOL Multiphysics. Данная программная среда позволяет рассчитывать электрические, магнитные, электромагнитные и акустические поля, что в целом дает возможность комплексного моделирования ЭМА преобразователя [1, 2, 6, 10–12].

Многие авторы используют метод конечных элементов для расчёта собственных частот трубопроводов [9, 13], моделирования подмагничивающих систем ЭМА преобразователей для труб [6, 10], распределения акустических полей в пластинах в частотной области [8, 14–16], при этом процессы распространения акустических волн в программе COMSOL Multiphysics не моделируются. В последнее время наибольший интерес учёной общественности в области волноводного метода контроля проявляется при исследовании влияния вязкоупругих контактных сред, таких как глина, песок, бетон, на затухание крутильных и продольных волн в трубах различного диаметра [9, 17].

Важным моментом при моделировании акустических полей методом конечных элементов является соблюдение условия по критерию Куранта–Фридрихса–Леви [18], которое выражает собой необходимое условие устойчивости явного численного решения и задается формулой:





$$\frac{C\Delta t}{\Delta x} < 0,1 \quad , \quad (1)$$

где  $C$  – скорость распространения волны;  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;  $\Delta x$  – шаг дискретизации по расстоянию (максимальный размер конечных элементов).

Между тем, для получения точных результатов моделирования, необходимо учитывать условие соотношения размера конечных элементов к длине волны, которое должно составлять не менее одной пятой. Таким образом, в любой модели, содержащей распространение акустических волн, с учётом всех вышеизложенных условий, известной частоты и скорости распространения волны, должно выполняться следующее неравенство:

$$\frac{C}{5f} > \Delta x > \frac{C}{50f} > C\Delta t \quad . \quad (2)$$

Как правило, при моделировании возбуждения акустической волны в качестве зондирующего импульса используется форма импульса в виде окна Хэннинга с пятью [6, 7, 9–11] и реже другим количеством [12, 14, 16] периодов в импульсе.

Для создания касательных или нормальных напряжений при возбуждении крутильной, продольной или поперечной волны используется условие *Boundary Load*, при этом для того, чтобы получить форму импульса в виде экспоненциально затухающей синусоиды, как форму ударного зондирующего импульса, необходимо в качестве формы прикладываемой силы взять дифференциал по времени от формы импульса. С использованием данного подхода при форме импульса (рис. 1, а), описываемой формулой:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t) e^{-(\beta t)^2} \quad , \quad (3)$$

дифференциал по времени выглядит следующим образом (рис. 1, б):

$$F(t) = F_0 e^{-(\beta t)^2} (\omega \cos(\omega t) - 2\beta \sin(\omega t)) \quad , \quad (4)$$

где  $U_0$  – амплитуда смещений;  $F_0$  – амплитуда силы;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\beta$  – коэффициента затухания.

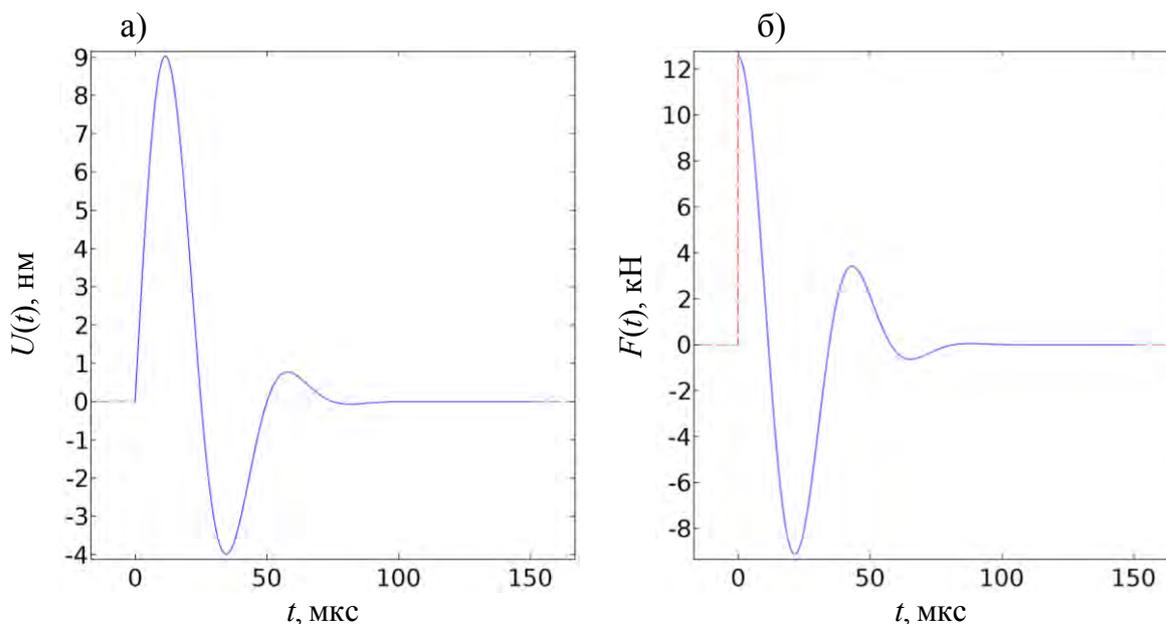


Рис. 1. Примеры форм импульса упругих смещений акустической волны (а) и силы, прилагаемой к поверхности объекта контроля (б), на частоте 20 кГц

Другим важным условием является наличие области идеально согласованного слоя (*Perfectly Matched Layer, PML*) на концах модели, позволяющей учесть распространение волны в бесконечность, ограничив тем самым область расчётов. Протяжённость данной области должна составлять более одной длины волны, распространение которой моделируется в программе. Например, на частоте 50 кГц для крутильной волны эта область должна быть не менее 65 мм. Начало области *PML* выбирается исходя из размеров интересующей области, в которой моделируется распространение волны. В общем случае расстояние до данной области можно определить соотношением, сопоставив его с линейными размерами модели и длиной волны.

Акустическое поле преобразователя зависит от многих параметров, в том числе рабочей частоты, апертуры, размера единичного элемента для фазированной решетки, расстояния между ними, количества элементов, расстояния между преобразователем (фазированной решеткой) и объектом контроля.

### Особенности моделирования распространения акустических волн в прутках

Для исследования акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных волн была разработана трехмерная модель (рис. 2, а). Согласно принципу работы такого преобразователя, ультразвуковая волна возбуждается с поверхности прутка, расположенной непосредственно под катушкой индуктивности. При моделировании для задания начальных смещений с помощью условия *Boundary load* к участку поверхности прикладывается сила  $F(t)$  (4). Под действием силы  $F(t)$  на поверхности прутка возникают упругие смещения  $U(t)$  (3), вызывающие появление акустиче-

ской волны, которая распространяется в радиальных направлениях по сечению, многократно отражаясь от противоположных границ прутка.

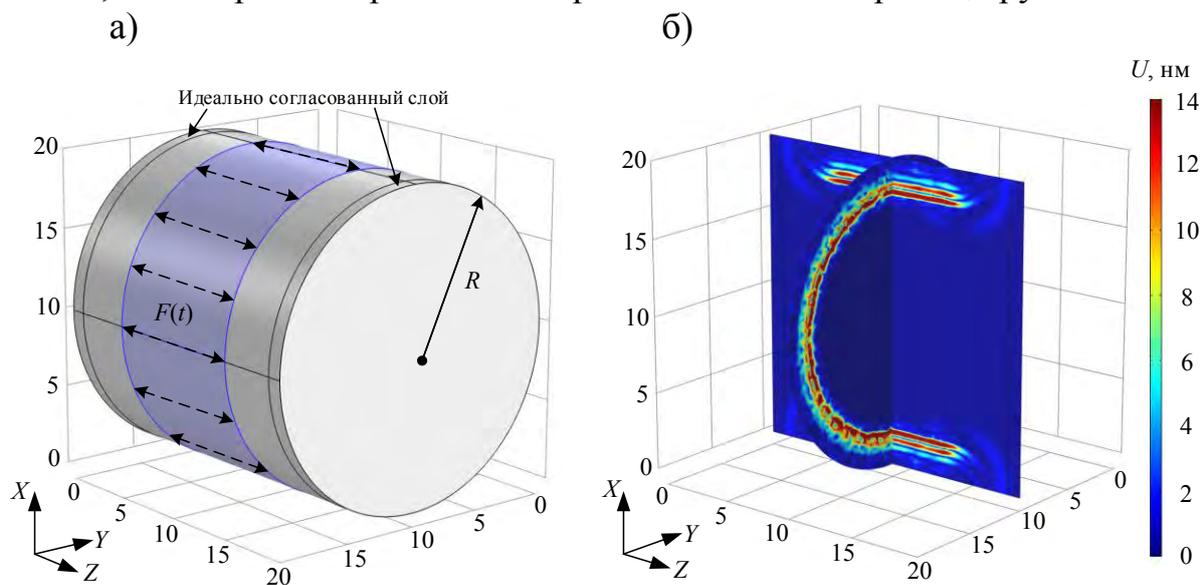


Рис. 2. Разработанная трехмерная модель (а), распределение смещений в акустической волне (б)

В результате моделирования был получен фронт распространения акустической волны в трехмерном пространстве (рис. 2, б). В радиальной плоскости сечения фронт волны имеет круглую форму, при этом в осевой плоскости сечения его форма близка к форме фронта плоской волны. Таким образом, в прутке формируется поперечная акустическая волна с цилиндрическим фронтом распространения.

Для сокращения времени вычисления, длина прутка была принята равной 20 мм, при этом для имитации прутка бесконечной длины, граничные условия на торцах были сформированы с помощью функции *PML*. Основные параметры разработанной модели представлены в табл. 1.

Табл. 1. Основные параметры разработанной модели

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Плотность	$\rho$	7810	кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	$E$	$210 \times 10^9$	Па
Коэффициент Пуассона	$\mu$	0,3	-
Амплитуда силы	$F_0$	10000	Н
Радиус объекта	$R$	10	мм
Частота колебаний	$f$	3	МГц
Скорость УЗ волны в материале	$C$	3250	м/с

При приближении волны к центру прутка наблюдается увеличение амплитуды смещений, а в центре прутка происходит фокусировка акустических колебаний с локальным увеличением амплитуды практически в 10 раз, по сравнению с амплитудой волны на поверхности.

Разработанная модель также позволяет построить серию многократных отражений (рис. 3, а), которая имеет значительные сходства с реальной осциллограммой, получаемой при контроле проходным ЭМА преобразователем (рис. 3, б). Различия между осциллограммами могут быть вызваны низкой точностью расчета, связанной с ограничениями, вызванными низкой мощностью вычислительного оборудования.

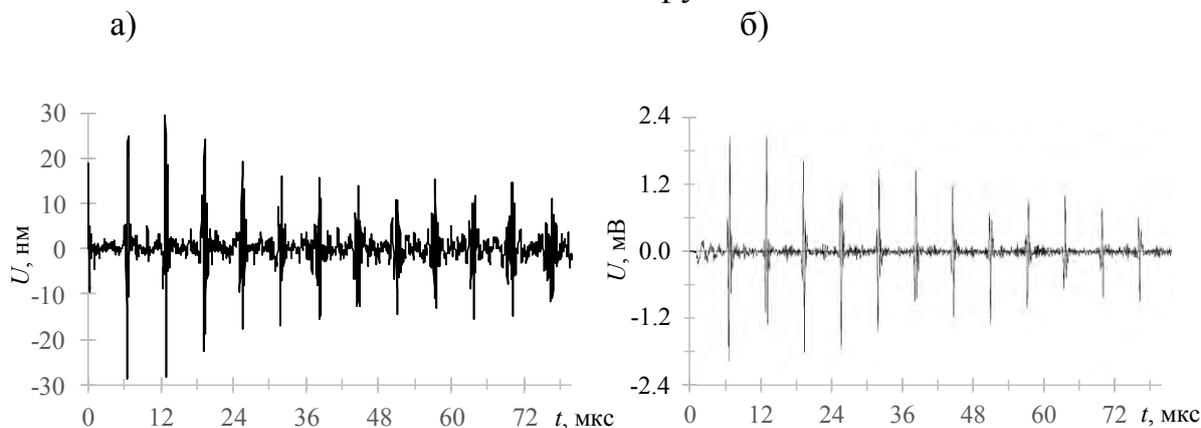


Рис. 3. Смоделированная (а) и реальная (б) осциллограммы многократных отражений

В результате моделирования распространения акустических волн в прутках можно выделить следующие основные особенности построения модели:

- поскольку акустические волны распространяются по сечению, нет необходимости в моделировании большого отрезка прутка, однако для исключения влияния отражений волны от торцов, необходимо использовать условие *PML*;

- участок поверхности, к которому прикладывается сила  $F(t)$ , удобнее описывать функцией, зависящей от координаты  $Z$  по оси прутка, при этом нет необходимости в разбиении прутка на отдельные участки.

### Особенности моделирования фокусировки акустических волн в трубах

Трёхмерные модели распространения акустической волны в трубе крайне сложны, для их решения требуются большие вычислительные мощности. Модель в общем случае упрощается из трёхмерной в двухмерную, при этом на края модели накладываются дополнительные граничные условия в виде периодического условия *Periodic Condition*. Данное условие позволяет перенести упругие колебания с одной грани на другую, тем самым двухмерная модель представляется в виде развёртки трубы с двумя продольными швами вдоль осевого направления трубы.

Модель развёртки трубы с сеткой конечных элементов представлена на рис. 4. С использованием условия из формулы (2) для трубы диаметром 530 мм при фокусировке на расстоянии 3 м с частотой возбуждения крутильной волны 20 кГц количество конечных элементов составило 22978.

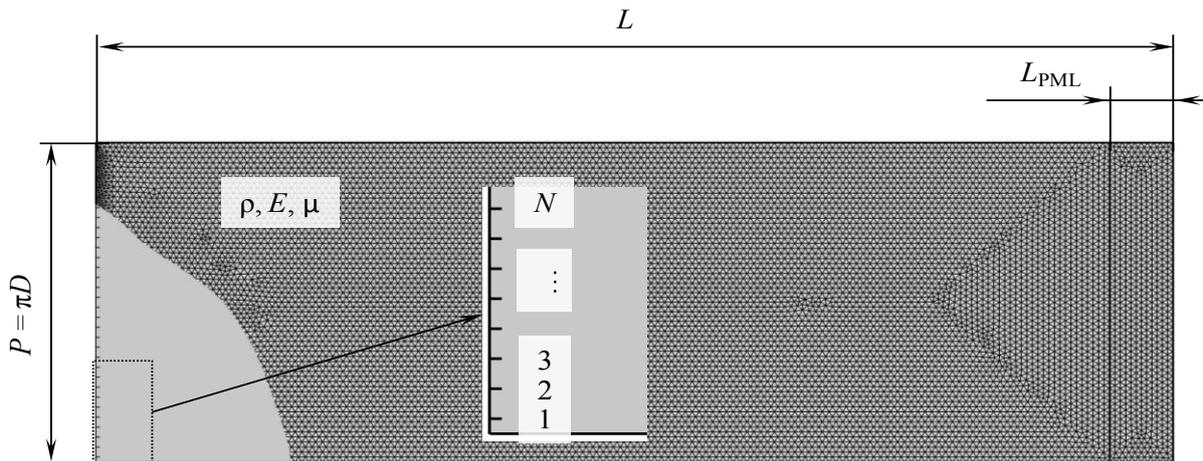


Рис. 4. Модель развёртки трубы с конечно-элементной сеткой

Параметры модели приведены в табл. 2. Поскольку изготовить универсальные преобразователи с переменным радиусом кривизны протектора очень сложно, то при моделировании считаем, что контакт преобразователя с цилиндрической поверхностью трубы осуществляется по линии, направленной вдоль оси трубы. Длина данной линии ограничивается продольными размерами преобразователя, в нашем случае она составляет 20 мм.

Табл. 2. Основные параметры модели распространения крутильной волны в трубе

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Диаметр трубы	$D$	530	мм
Периметр трубы	$P, P = \pi D$	1,665	м
Расстояние до точки фокуса	$R_f$	3000	мм
Длина трубы	$L, L = 1,7R_f$	5,1	м
Толщина стенки трубы	$H$	12	мм
Количество элементов решётки	$N$	32	-
Частота колебаний	$f$	20	кГц
Период колебаний	$T, T = 1/f$	$5 \cdot 10^{-5}$	с
Амплитуда колебаний	$A$	10000	Н
Плотность	$\rho$	7810	кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	$E$	212	ГПа
Коэффициент Пуассона	$\mu$	0,291	-
Скорость крутильной волны	$C_T,$ $C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$	3242,4	м/с
Протяжённость области PML	$L_{PML}, L_{PML} = 2 \cdot C_T/f$	324,24	мм

Для получения фокусировки акустических волн на заданном расстоянии используется следующая формула в условии *Boundary Load*:

$$F_y = f \left( t - \frac{\sqrt{R_f^2 + (\pi R)^2} - \sqrt{R_f^2 + (\pi R - y)^2}}{C} \right), \quad (5)$$

где  $F_y$  – сила, направленная по оси  $Y$ ;  $f(t)$  – функция силы, определяемая по формуле (4);  $t$  – время;  $R_f$  – расстояние до точки фокуса;  $R$  – радиус трубы;  $y$  – координата по оси  $Y$ .

Поскольку условие *Boundary Load* применено на гранях, направленных вдоль оси  $X$ , отстоящих друг от друга на одинаковом расстоянии по оси  $Y$ , то данное условие выполняется дискретно с наступлением определённого момента времени  $t$ . Таким образом, с использованием формулы (5) и условия *Boundary Load* реализованы временные задержки в фазированной решётке.

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Помимо крутильной волны, а с учётом переноса на двухмерную модель её можно считать поперечной волной с горизонтальной поляризацией, возбуждается продольная и изгибная волна. Поскольку временные задержки настроены на фокусировку крутильных волн, прочие возбуждаемые моды не оказывают существенного влияния на окончательный результат.

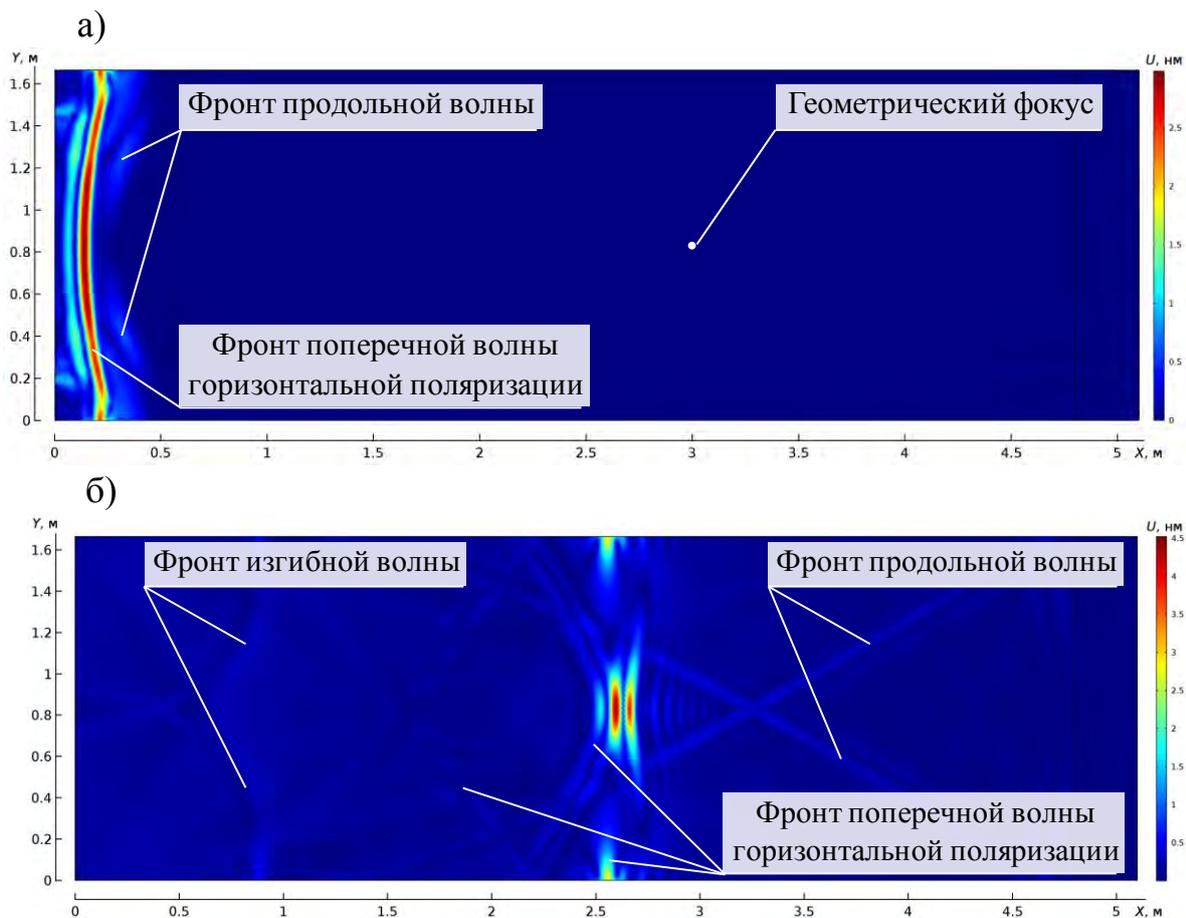


Рис. 5. Картины распределения смещений в момент формирования фронта волны (а) и момент схождения поперечных волн горизонтальной поляризации в точке акустического фокуса (б)

На рис. 6 приведена иллюстрация распределения акустического поля. Распределение акустического поля строится как максимальные смещения в волне за указанный промежуток времени при помощи функции  $timemax(t_{нач}, t_{кон}, f(t))$ . В исследуемой модели время ограничено началом возбуждения волны  $t_{нач}$  и полным прохождением волны в область  $PML$   $t_{кон}$ , при этом в качестве анализируемой функции  $f(t)$  используется функция абсолютных смещений.

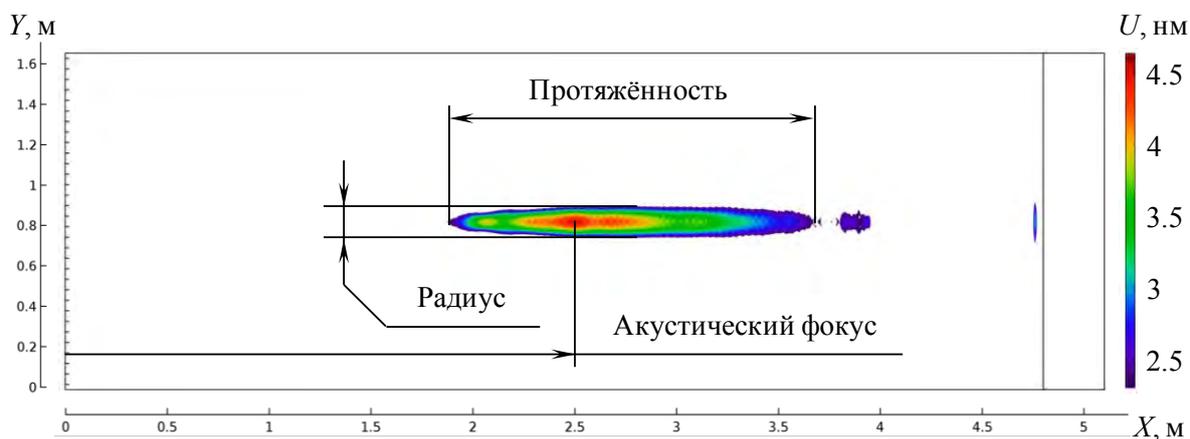


Рис. 6. Картина пространственного распределения акустического поля

Как следует из теории, фокусное пятно формируется на расстоянии, не соответствующем геометрическому фокусу. При фокусировке на больших расстояниях центр фокусного пятна находится ближе к области установки фазированной решётки по отношению к геометрическому фокусу. Фокусное пятно можно охарактеризовать с помощью трёх величин: протяжённости вдоль оси трубы, радиуса по периметру трубы и уровня выделения фокусного пятна относительно его максимума. На рис. 6 приведено фокусное пятно по уровню 6 дБ (ослабление амплитуды волны в 2 раза) при геометрическом фокусе равном 3 м.

Из приведённых результатов основными особенностями моделирования фокусировки акустических волн в трубах можно считать следующие положения:

- для упрощения модели и ускорения процессов расчёта необходимо переходить на двухмерную развёртку трубы, при этом использовать дополнительное граничное условие в виде условия периодичности для учёта переноса смещений с одной грани на другую;
- для ограничения модели и исключения отражений от противоположной грани (торца трубы) необходимо добавлять область  $PML$ , размеры которой должны быть не менее одной длины волны;
- для автоматизации определения временных задержек в фазированной решётке можно использовать формулу задающей силу воздействия на поверхность трубы.

## Заключение

Таким образом, по результатам моделирования акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решёток в трубах, прутках можно сделать следующие выводы:

- разработана модель, позволяющая исследовать влияние форм, размеров, местоположения дефектов в прутке, а также геометрических параметров прутков, в частности, эллиптичности, на формирование эхограммы;
- в моделировании акустических полей важную роль играет критерий Куранта–Фридрихса–Леви, согласно которому выбирается шаг дискретизации по расстоянию (максимальный размер конечных элементов) и времени;

- на формирование акустического поля в трубах и прутках влияет ряд параметров, наиболее существенными из которых являются рабочая частота, размер апертуры, количество элементов (витков) в катушке индуктивности или фазированной решётке, расстояние между ними, зазор между преобразователем и объектом контроля;

- упрощение из трёхмерной в двухмерную модель при моделировании акустического поля фазированной решётки в трубе даёт возможность исследовать фокусировку акустических волн с меньшими временными затратами;

- для ограничения распространения акустических волн в бесконечность необходимо использовать область Perfectly Matched Layer.

Результаты исследований могут быть использованы при моделировании взаимодействия акустических волн с дефектами, формирования акустического поля прутка при его эллиптичности, фокусировки звука в трубах под углом к плоскости апертуры.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00051).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петров, К. В.** Моделирование систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей для контроля неферромагнитных объектов / К. В. Петров, О. В. Муравьева // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. матер. III Всероссийской науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. – 2014. – С. 136–140.

2. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева [и др.] // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 2–9.

3. **Мышкин, Ю. В.** Влияние конструктивных параметров фазированных преобразователей на распределение поперечных волн горизонтальной поляризации при их фокусировке в трубопроводах большого диаметра / Ю. В. Мышкин, О. В. Муравьева, С. В. Ленков // Приборостроение в XXI веке – 2014. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Ижевск : ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2014. – С. 233–237.



4. **Муравьева, О. В.** Эффективность фокусировки волн горизонтальной поляризации в трубопроводах большого диаметра / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, Ю. В. Мышкин // Сварка и диагностика : сб. докл. междунар. форума. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 272–277

5. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 17–23.

6. Evaluating an SH wave EMAT system for pipeline screening and extending into quantitative defect measurements / M. Clough [et al.] // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2016. – Т. 1706. – №. 1. – P. 160001.

7. Parametric Study of Defect Detection in Pipes with Bend Using Guided Ultrasonic Waves / J.J. Tan [et al.] // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – Т. 71. – P. 02003.

8. Shear horizontal feature guided ultrasonic waves in plate structures with 90 transverse bends / X. Yu [et al.] // Ultrasonics. – 2016. – Т. 65. – P. 370–379.

9. **Leinov, E.** Investigation of guided wave propagation in pipes fully and partially embedded in concrete / E. Leinov E., M. J. S. Lowe, P. Cawley // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2016. – Т. 140. – №. 6. – P. 4528–4539.

10. **Clough, M.** Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound / M. Clough, M. Fleming, S. Dixon // NDT & E International. – 2017. – Т. 86. – P. 20–27.

11. Longitudinal mode magnetostrictive patch transducer array employing a multi-splitting meander coil for pipe inspection / Z. Liu [et al.] // NDT & E International. – 2016. – Т. 79. – P. 30–37.

12. **Xu, J.** Research on the Lift-off Effect of Receiving Longitudinal Mode Guided Waves in Pipes Based on the Villari Effect / J. Xu, Y. Sun, J. Zhou // Sensors. – 2016. – Т. 16. – №. 9. – P. 1529.

13. Investigations of mechanical guided waves propagation in pipes repaired locally by composite patches / S. Yaacoubi [et al.] // ECCOMAS Congress. – 2016.

14. **Zuo, P.** Numerical studies of nonlinear ultrasonic guided waves in uniform waveguides with arbitrary cross sections / P. Zuo P., Y. Zhou, Z. Fan // AIP Advances. – 2016. – Т. 6. – №. 7. – P. 075207.

15. **Belanger, P.** Development of a low frequency omnidirectional piezoelectric shear horizontal wave transducer / P. Belanger, G. Boivin // Smart Materials and Structures. – 2016. – Т. 25. – №. 4. – P. 045024.

16. **Zuo, P.** Numerical and experimental investigation of nonlinear ultrasonic Lamb waves at low frequency / P. Zuo, Y. Zhou, Z. Fan // Applied Physics Letters. – 2016. – Т. 109. – №. 2. – P. 021902.

17. A theoretical study of the fundamental torsional wave in buried pipes for pipeline condition assessment and monitoring / J.M. Muggleton [et al.] // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Т. 374. – P. 155–171.

18. **Курант, Р.** О разностных уравнениях математической физики / Р. Курант, К. О. Фридрихс, Г. Леви // Успехи математических наук. – 1941. – №. 8. – С. 125–160.

