

## Распространение упругих волн в системе волноводной визуализации с тепловыми неоднородностями

С.А. Петросян<sup>1</sup>, С.А. Цысарь<sup>1</sup>, В.Д. Свет<sup>2</sup>, О.А. Сапожников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет

<sup>2</sup>Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева

[sa.petrosjan@physics.msu.ru](mailto:sa.petrosjan@physics.msu.ru)

Акустические волноводы для передачи и приёма информации применяются во многих областях науки, таких как медицина, электроника, энергетика, геология и ряде других. Акустические поля могут служить удобным инструментом для исследования непрозрачных жидкостей с тепловыми неоднородностями, где применение электромагнитных волн зачастую затруднено или просто невозможно. К таким средам можно отнести, например, агрессивные химически активные жидкости и расплавленные металлы с неоднородным распределением температуры, где прямое применение акустических преобразователей для излучения и приёма ультразвуковой (УЗ) волны сопряжено с рядом практических трудностей, которых можно избежать при использовании акустических волноводов.

В настоящей работе изучается распространение упругих волн в металлических стержнях-волноводах с неоднородным распределением температуры для дальнейшего получения ультразвукового изображения структуры объектов, помещенных в жидкость.

Рассмотрим систему, состоящую из стального стержня, помещенного в кварцевый бокс с воздухом, погруженную в жидкий свинец при температуре 400 °С таким образом, чтобы выходной торец системы (верхний на рис. 1а) выступал над поверхностью свинца на 5 мм. Диаметр стержня, изготовленного из стали типа 316L – 1 мм, длина – 500 мм. Распределение температуры системы через 2 минуты после погружения представлено на рисунке 1. Расчет распределения температуры проводился с использованием уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = 0 \\ \mathbf{q} = -k \nabla T \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>),  $C_p$  – теплоёмкость при постоянном давлении (Дж/(кг·К)),  $T$  – температура (К),  $\mathbf{q}$  – тепловой поток, связанный с теплопроводностью (Вт/м<sup>2</sup>),  $k$  – теплопроводность (Вт/(м·К)) [1]. Температура свинца в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) составляла 400 °С, температуры окружающей среды и бокса со стержнем составляли 25 °С. Для данной системы, зная распределение температуры, были найдены резонансные частоты, при которых амплитуда колебания стержня становится максимальной и имеет гармонический характер.

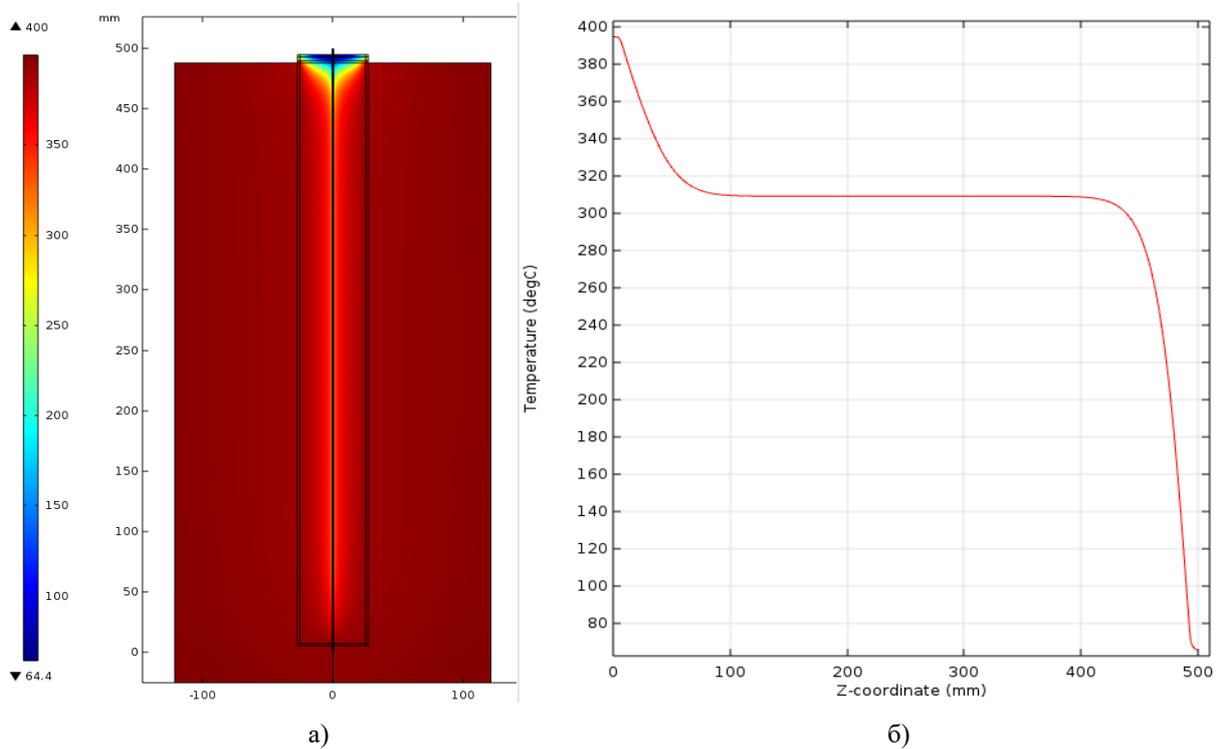


Рис.1. Распределение температуры в градусах Цельсия при погружении стержня на 2 минуты в свинец при  $T=400^{\circ}\text{C}$  а) всей системы, б) на центральной оси стального стержня от длины.

На рисунке 2а представлено распределение квазипродольного смещения стержня при резонансе на частоте равной 1.0004 МГц. Данное распределение смещения рассчитано из уравнения движения  $\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i}{\partial t^2} = \sigma_{ij,j}$ :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla(\mathbf{F}\mathbf{S}) \\ \mathbf{F} = \mathbf{I} + \nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{u} , \\ f = -\frac{\lambda}{2\pi j} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}=[u,v,w]^T$  – вектор смещения  $\mathbf{u}=\mathbf{u}_{amp} \cos(\omega t+\varphi_u)=\text{Re}(\tilde{\mathbf{u}} e^{j\omega t})$ ,  $f$  – собственная частота,  $\lambda$  – собственное значение ( $j\omega=-\lambda$ ),  $\rho$  – плотность,  $\sigma$  – тензор напряжений,  $\mathbf{I}$  – метрический тензор, в декартовых координатах равен единичной матрице  $(\delta_{ij})$ ,  $\nabla_{\mathbf{x}}=e_i \frac{\partial}{\partial x_i}=[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}]$  – оператор Гамильтона или набла,  $\mathbf{F}=\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}}$  – материальный тензор градиента деформации,  $\mathbf{S}$  – тензор напряжений (симметричный второй тензор напряжений Пиола — Кирхгофа) [2,3,4].

В частном случае, используя закон Гука для изотропного упругого тела, из (2) получим уравнение Ламе:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\Delta\varphi \\ \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \mu\Delta\psi \\ \mathbf{u} = \text{rot}\psi + \text{grad}\varphi \end{cases} \quad (3)$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – постоянные Ламе. Эти уравнения описывают два типа волн: волны расширения-сжатия (дилатационные волны) для потенциала  $\varphi$ , распространяющиеся со

скоростью  $c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$  и волны искажения или сдвига для потенциала  $\psi$ , распространяющиеся со скоростью  $c_t = \sqrt{\mu/\rho}$  [5].

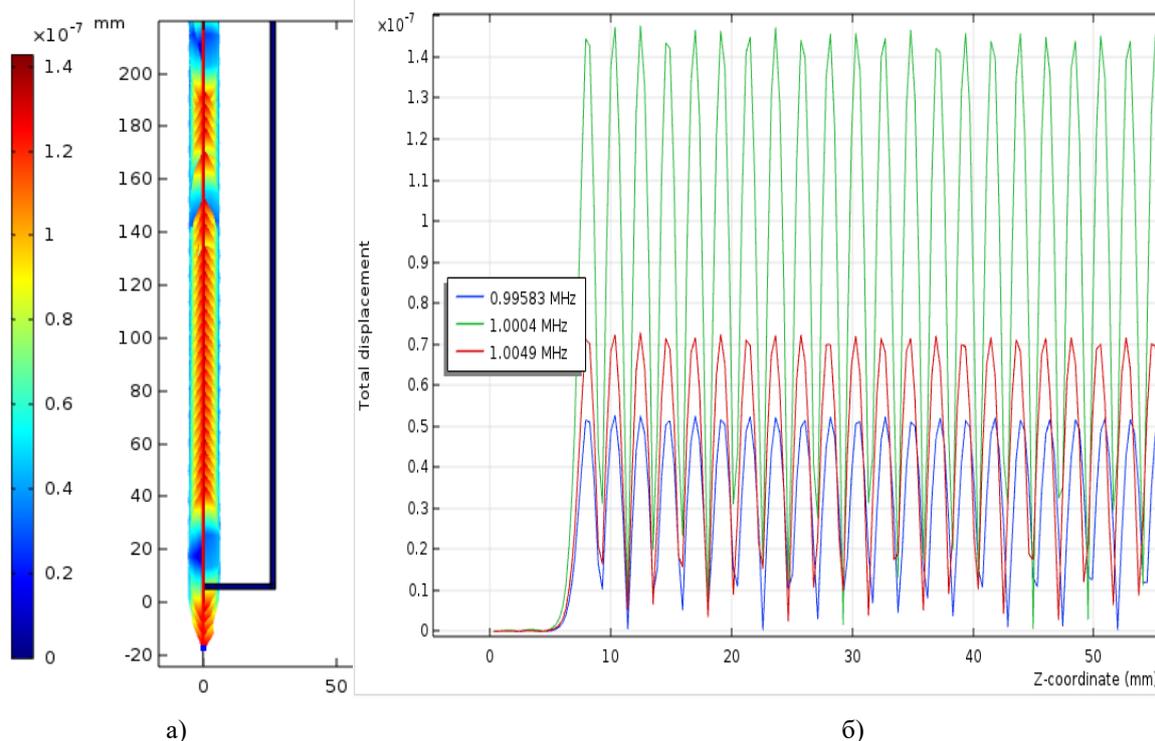


Рис.2. Распределение смещения стального стержня а) в плоскости на его оси (1.0004 МГц), б) на центральной оси стального стержня от длины (0.99583, 1.0004, 1.0049) МГц.

Для описанной системы, состоящей из стального стержня, находящегося в стеклянном боксе с воздухом, которая погружена в расплавленный свинец при температуре 400 °С были найдены 3 резонансные частоты вблизи 1 МГц: 0.99583 МГц, 1.0004 МГц, 1.0049 МГц. Полученные данные свидетельствуют о том, что с применением сборки из стальных акустических волноводов возможно получить акустическое изображение объектов, помещенных в жидкий металл, подавая сканирующее акустическое поле на частоте около 1 МГц и регистрируя частоту и амплитуду смещения выходных концов стержней с помощью пьезопреобразователей или оптических методов.

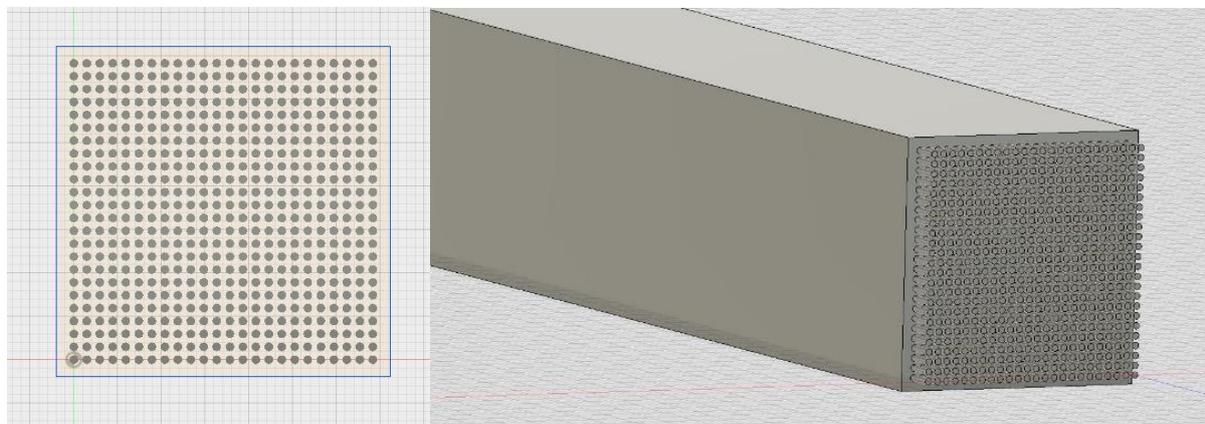


Рис. 3. Предполагаемый экспериментальный макет сборки акустических волноводов (32x32), выполненных из нержавеющей стали диаметром 1 мм, длиной 1000 мм и расстоянием между ними 0.5 мм, помещенных в пластиковый бокс с воздухом.

В дальнейшем планируется собрать систему стержней, изготовленных из нержавеющей стали типа 316LSi: 28x28 шт., длина = 1000 мм, диаметр = 1 мм, расстояние между стержнями 1 мм и 0.5 мм и 32x32 шт., длина = 500 мм, диаметр = 1 мм расстояние между стержнями 1 мм и 0.5 мм. Данные сборки на первом будут помещены в пластиковый бокс с воздухом. Стержни будут удерживаться пластиковыми пластинами с отверстиями диаметром 1 мм (рис. 3). После этого будет проведен эксперимент по акустической визуализации объектов в жидкостях при небольших (до 20 градусов) градиентах температур с применением данных сборок для проверки численных результатов, после чего планируется модернизация системы и проведение измерений в среде с сильными температурными градиентами.

Предлагаемый метод является уникальным, быстрым, достаточно точным, простым в использовании и эффективным для изучения пространства агрессивных жидких сред, таких как расплавленные металлы и непрозрачные химически активные смеси, с неоднородным распределением температуры. Это, как уже отмечалось, обусловлено невозможностью использования электромагнитных волн в металлах, а также тем, что существующие пьезопреобразователи не рассчитаны на работу при таких высоких температурах, либо имеют малую чувствительность и низкое разрешение ультразвуковых изображений, что свойственно для высокотемпературной пьезокерамики по сравнению с обычной.

Работа поддержана грантом РФФ 17-72-10284.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J.L. Monteith, M.H. Unsworth, "Principles of Environmental Physics", Edward Arnold, London, 290 pp., 1990.
2. Ю.Н. Работнов "Механика деформируемого твердого тела" М. Изд-во Наука. 1988.
3. Дж. Мейз "Теория и задачи механики сплошных сред" М. Изд-во ЛКИ. 2007.
4. С.Н. Коробейников "Нелинейное деформирование твердых тел" Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. - 262 с.
5. Ю.Н. Новичков "Вибрации в технике: Справочник" В 6-ти т. — М.: Машиностроение, Т. 1. Колебания линейных систем. Под ред. В.В. Болотина. 1978. - 352 с.