

Численное моделирование рассеяния ультразвуковых импульсов на поверхностных газовых пузырьках применительно к задаче ультразвуковой визуализации почечных камней в доплеровском режиме

А. И. Полянский,^{*} О. А. Сапожников[†]

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 08.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

В работе рассмотрены особенности ультразвуковой визуализации почечных камней в условиях, когда на поверхности камней присутствуют пузырьки субмикронного размера. Построена численная модель, позволяющая наблюдать так называемый артефакт мерцания, заключающийся в образовании нестационарной цветной мозаичной структуры при ультразвуковом исследовании камней в доплеровском режиме. В основе модели лежит численное моделирование уравнений эластоупругости и уравнения Нолтинга–Непайреса, описывающего кавитацию пузырьков. Приведены результаты доплеровской обработки сигнала, показывающие, что кавитация пузырьков действительно приводит к появлению артефакта мерцания.

PACS: 43.20.+g

УДК: 534.292

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, кавитация субмикронных пузырьков, артефакт мерцания.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в медицине широко используются ультразвуковые исследования вследствие их неинвазивного характера. Одним из примеров является ультразвуковая диагностика различных органов человека.

Данная работа посвящена анализу так называемого «артефакта мерцания», возникающего при ультразвуковой (УЗ) визуализации почечных камней. Суть явления заключается в том, что при УЗ диагностике мочекаменной болезни на границе наблюдаемого изображения почечного камня в доплеровском режиме иногда появляются мерцающие участки в виде нестационарной разноцветной мозаичной структуры [1, 2]. Данное явление может сильно упростить и улучшить процесс обнаружения маленьких почечных камней. Механизмы возникновения артефакта мерцания при ультразвуковом исследовании (УЗИ) до сих пор являются предметом дискуссий. Интенсивность явления сильно зависит от биохимического состава камней и меняется от измерения к измерению. Одной из возможных причин может быть спорадическая активность пузырьков субмикронного размера, расположенных в углублениях неровной поверхности камня [3]. Настоящая работа посвящена численному моделированию указанного механизма возникновения артефакта мерцания.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

1.1. Распространение УЗ импульса

Ультразвуковая диагностика основана на эхоимпульсном методе визуализации неоднородностей

биотканей пациентов. При этом используются импульсы микросекундной длительности мегагерцового диапазона частот. В доплеровском режиме одиночный акт облучения заключается в послышке последовательности периодически следующих импульсов («доплеровского ансамбля») и приёме рассеянных сигналов. Таким образом, для теоретического анализа процесса УЗ визуализации требуется промоделировать распространение излученных импульсов, их рассеяние на исследуемых объектах (в качестве которых в рассматриваемой задаче выступают почечный камень и расположенные на его поверхности микропузырьки газа) и процесс распространения рассеянных акустических сигналов обратно к ультразвуковому приемо-передающему преобразователю. Наряду с указанными акустическими процессами, требуется промоделировать процесс обработки сигналов, принимаемых многоэлементной решеткой, и построить соответствующее изображение.

При исследовании распространения ультразвуковых волн в мягких биотканях традиционно используется подход, в котором ткань считается по своим акустическим свойствам аналогичной классическим жидкостям, поведение которых описывается уравнениями гидродинамики. Почечные камни являются твердыми телами, поэтому упругие волны в них должны быть описаны иными уравнениями, с учетом сдвиговой упругости. При совместном описании на границе камня и окружающей его ткани требуется ввести соответствующие граничные условия. Однако при численном моделировании удобнее использовать альтернативный подход, при котором вся исследуемая область рассматривается как единая неоднородная среда. Неоднородность заключается в изменении упругих модулей и плотности при переходе от одного участка среды к другому. Тогда условия на внутренних границах раздела выполняются автоматически. Такое упрощение позволяет не рассматривать отдельно разные области, а сразу перейти к единым уравнениям.

^{*}E-mail: ai.polyanskiy@physics.msu.ru

[†]E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

В рамках модели использовались значения амплитуд УЗ сигналов, близкие к уровням, используемым в УЗ диагностике (не более 1 МПа). Эти амплитуды невелики, что позволяет рассматривать задачу в линейном приближении и использовать систему уравнений эластоупругости:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i, \\ \sigma_{ij} = \lambda \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где λ и μ — параметры Ламе, σ_{ij} — компоненты тензора напряжения, u_i — компоненты вектора деформации, f_i — внешняя сила, приходящаяся на единицу объема. Параметры λ , μ и ρ в неоднородной среде являются функциями пространственных координат.

Численное моделирование указанных уравнений в полной 3-мерной постановке требует значительных компьютерных мощностей, поэтому имеет смысл вводить разумные упрощения. С этой целью в настоящей работе рассеяние ультразвуковых импульсов на камне исследовалось в осесимметричном приближении, т.е. в 2-мерной геометрии. Рассматривался камень цилиндрической формы, на который падает распространяющаяся в направлении вдоль его оси плоская акустическая волна (рис. 1). В качестве окружающей камень среды была взята вода (плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, параметры Ламе $\mu = 0$, $\lambda = 2.25 \text{ ГПа}$), а в качестве материала камня использовался цемент марки У30 ($\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 3.83 \text{ ГПа}$, $\lambda = 7.65 \text{ ГПа}$) [4]. Зондирующий УЗ импульс представлял собой квази-гармонический сигнал с гауссовой огибающей.

Акустические волны, рассеянные на камне и распространяющиеся в обратном направлении, регистрировались многоэлементной периодической приемной решеткой датчиков, расположенной на прямой, перпендикулярной оси симметрии и проходящей через эту ось. На рис. 1 принимающая решетка показана слева зелеными штрихами. Параметры приёмных датчиков были взяты схожими с УЗ датчиком Philips/ATL HDI L7-4 [5] (ширина $w = 0.25 \text{ мм}$, интервал между датчиками $g = 0.05 \text{ мм}$, число датчиков $M = 128$). Рабочая частота выбиралась равной $\omega_0/2\pi = 5 \text{ МГц}$. На границе находился идеальный согласованный слой (PML — см. рис. 1), введенный для поглощения паразитных отражений.

1.2. Динамика пузырька

Существует несколько моделей, описывающих динамику кавитационных пузырьков. Для данной работы была взята модель Нолтинга-Непайреса, предполагающая колебания сферического пузырька, наполненного идеальным газом. Вывод уравнения можно найти в [6]. Здесь же приведем уравнение для $R(t)$ — радиуса пузырька:

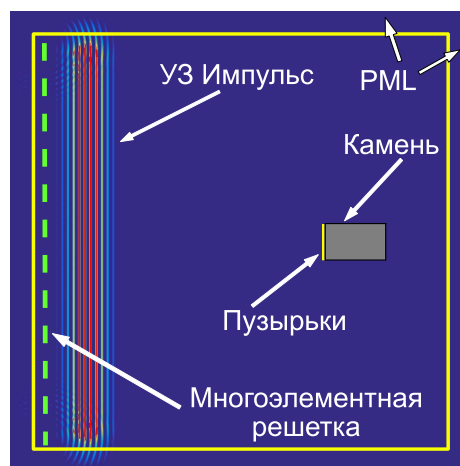


Рис. 1: Геометрия задачи

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_0} \left[\left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - 4\frac{\mu}{R}\dot{R} - p_0 - p_{ac}(t) \right],$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости, R_0 — начальный радиус пузырька, p_0 — атмосферное давление, ρ_0 — плотность окружающей жидкости, μ — динамическая вязкость жидкости, γ — показатель адиабаты газа в пузырьке, $p_{ac}(t)$ — акустическое давление УЗ импульса, представляющее собой комбинацию падающей волны и волны, рассеянной на камне. При моделировании предполагается, что пузырьки расположены на поверхности камня.

Осциллирующие парогазовые пузыри излучают сферические волны. В таком случае потенциал скорости можно искать в виде $\varphi(r, t) = F(t - \frac{r}{c_0})/r$. С учетом связи давления и потенциала, а также начального условия (пузырьки предполагались покоящимися), получаем следующую формулу для излучения пульсирующего пузырька:

$$p(r, t) = \frac{\rho_0}{3r} \frac{d^2(R^3)/d\tau^2}{1 + c_0^{-1}dR/d\tau}$$

где τ — момент излучения, $t = \tau + [r - R(\tau)]/c_0$, c_0 — скорость звука в воде. Отметим, что пузырьки предполагаются микронного размера, поэтому их вклад в полученный сигнал очень мал. Это позволяет нам рассчитывать давление от пузырька отдельно от УЗ импульса, а полученный результат просто прибавить к сигналу на датчиках.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Уравнения эластоупругости

Для моделирования уравнений системы (1) с учетом упомянутых упрощений использовался конечно-разностный метод на смещенных сетках. Данный метод основан на схеме с центрированными производными, имеющий 2-й порядок точности [7, 8]. Распишем для наглядности одно из уравнений системы (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \rightarrow \frac{\sigma_{rz,j,k}^{i+1} - \sigma_{rz,j,k}^i}{h_t} = \\ &= \mu \left(\frac{v_{r,j,k+\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} - v_{r,j,k-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}}}{h_z} + \frac{v_{z,j+\frac{1}{2},k}^{i+\frac{1}{2}} - v_{z,j-\frac{1}{2},k}^{i+\frac{1}{2}}}{h_r} \right). \quad (2) \end{aligned}$$

Здесь (i, j, k) — индексы узлов по времени, r - и z -координате соответственно, h_m — шаг дискретизации по соответствующей координате. Определение функций на полушагах приводит к необходимости введения нескольких сеток, смещенных друг от друга на полшага по определенным направлениям. В задаче исследуется плоский случай (центральное сечение камня), поэтому смещение происходит по (r, z, t) -координатам.

2.2. Уравнение Нолтинга–Непайреса

Для численного решения уравнения (2) использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Сделаем замену переменных $R_1(t) = R(t)$ и $R_2(t) = dR/dt$ в и сведем уравнение к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dR_1}{dt} = R_2 \equiv f_1(R_1, R_2, t), \\ \frac{dR_2}{dt} = -\frac{3(R_2)^2}{2R_1} + \frac{1}{\rho_0 * R_1} \left[\left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R_1} - 4\frac{\mu}{R_1} R_2 - p_0 - p_{ac}(t) \right] \equiv f_2(R_1, R_2, t), \\ R_1(0) = R_0, \quad R_2(0) = 0. \end{cases}$$

Здесь учтено, что в начальный момент времени пузырек покоился. Начальный радиус принимался равным $R_0 = 0.8$ мкм. Переход к следующему временному шагу осуществляется в 4 этапа. Полное описание метода можно посмотреть, например, в [9]. Стоит отметить, что метод позволяет рассчитать функции только в половине узлов по времени, поэтому необходимо уменьшать шаг дискретизации h_t .

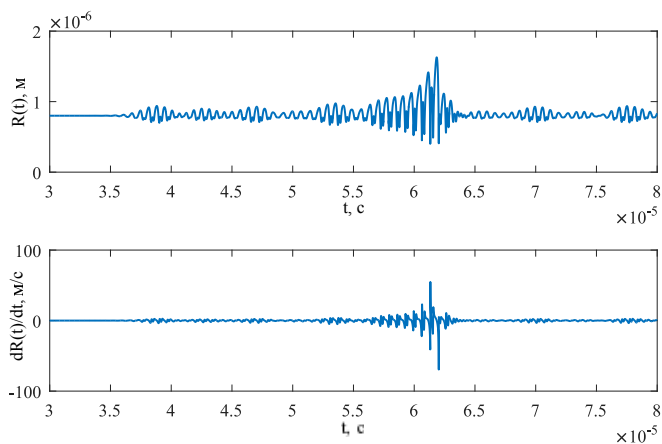


Рис. 2: Зависимость радиуса $R(t)$ и скорости поверхности пузырька $dR(t)/dt$ от времени

2.3. Построение изображений рассеивателей в доплеровском режиме

Используется алгоритм, описанный в работе [3]. Пусть в доплеровском ансамбле имеется N импульсов. Частота следования импульсов в ансамбле выбирается из расчета, чтобы падающий и отраженные импульсы не накладывались. Принимаемый рассеянный аналоговый сигнал $W_n(t)$ дискретизируется. Запишем оцифрованный сигнал в следующем виде $W_{nm} = W_n(t_m = mh_t)$, где n — номер импульса в ансамбле, $n = 1, 2, \dots, N$, N — общее число импульсов в ансамбле, m — номер отсчета времени, h_t — временной шаг (в эксперименте $h_t \sim 2$ нс). Дальнейшая обработка заключается в проведении преобразования Гильберта для полученного оцифрованного сигнала, на основе чего формируется аналитический (комплексный) сигнал V_{nm} . После этого используется фильтрация для подавления низкочастотных помех, которыми обычно являются пульсации стенок сосудов (wall-filtering). Данная процедура основана на том, что при медленном движении источника от приемника дополнительная фаза в сигнале мала, что дает возможность выделить линейный вклад движения в полученный сигнал. Поэтому, используя метод наименьших квадратов (МНК) для ансамбля из N импульсов, получим отфильтрованный сигнал в виде $(a_m, b_m$ — коэффици-

енты, рассчитанные из МНК): $\bar{V}_{nm} = V_{nm} - \bar{V}_{nm}$, $\bar{V}_{nm} = a_m + b_m n$. После этого для узла строится амплитуда сигнала $U_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\bar{V}_{nm}|^2$, часто называемая доплеровской мощностью («Doppler power») и характеризующая флуктуацию сигнала [3]. Далее проводится стандартное построение изображения с учетом задержек сигнала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

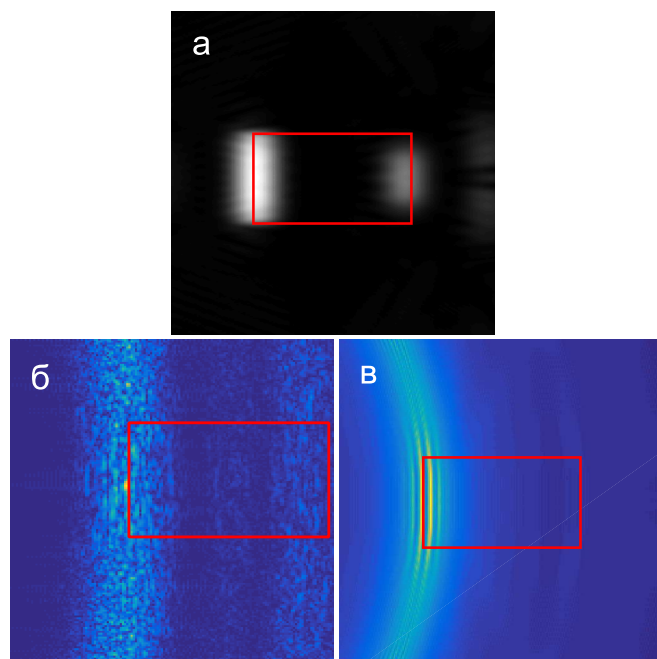


Рис. 3: а — Изображение камня в В-режиме; б — Доплеровское изображение камня с одним пузырьком; в — Доплеровское изображение камня с набором пузырьков

Параметры, используемые в модели, были описаны

в предыдущих разделах. Для расчета доплеровского эффекта были получены данные для 30 пузырьков, расположенных на фронтальной торцевой части камня размером 5×3 мм. Типичные зависимости для $R(t)$ и dR/dt для исследованных пузырей представлены на рис. 2. Из реального эксперимента [3, 10] известно, что активность пузырьков носит спорадический характер. Поэтому вклад пузырьков учитывался только в нескольких импульсах из ансамбля. Используя сигнал одного из импульсов, было построено изображение в В-режиме, которое позволило локализовать камень в исследуемой области (рис. 3,а). Далее, используя описанный выше алгоритм, была построена картина в доплеровском режиме для случаев, когда на поверхности находится один пузырек (рис. 3,б) и когда на поверхности находится набор пузырьков (рис. 3,в). Видно, что на границе камня в области локализации пузырей действительно возникает цветное пятно в случае одного пузырька и полоса в случае набора пузырьков. Пространственные размеры данных изображений порядка длины волны диагностического импульса, что определяется разрешением приемной решетки. Появление пятен указывает на вклад рассеяния на пузырьках в доплеровский сигнал и соответствует мерцающим изображениям, которые наблюдаются при реальных УЗ обследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе построена численная модель, которая позволила удостовериться в том, что одной из причин артефакта мерцания может служить активность газовых пузырей на поверхности почечных камней.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-02-00261 и грантом Президента РФ по программе поддержки ведущих научных школ № НШ-7062.2016.2.

- [1] Rahmouni A., Bargoin R., Herment A., Bargoin N., Vasile N.C. Radiology. 1996. **199**. P. 269.
- [2] Васильев А. Ю., Громов А. И. Военно-медицинский журнал. 1997. **318**, № 4. С. 33.
- [3] Lu W., Sapozhnikov O. A., Bailey M. R., Kaczkowski P. J., Crum L. A. Ultrasound Med. Biol. 2013. **39**, N 6. P. 1026.
- [4] Sapozhnikov O. A., Maxwell A. D., MacConaghy B., Bailey M. R. J. Acoust. SoC. Am. 2007. **112**, N 2. P. 1190.
- [5] Sapozhnikov O. A., Bailey M. R. J. Acoust. SoC. Am. 2013 **133**, N 2. P. 661.
- [6] Leighton T. G. Academic Press Limited. London, 1994.
- [7] Vireux J. Geophysics. 1986. **51**. P. 889.
- [8] Cleveland R. O., Sapozhnikov O. A. J. Acoust. SoC. Am. 2005. **118**, N 4. P. 2667.
- [9] Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978.
- [10] Li T., Khokhlova T. D., Sapozhnikov O. A., O'Donnell M., Hwang J. H. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2014. **61**, N 10, P. 1698.

Numerical simulation of the scattering of ultrasonic pulses on surface gas bubbles applied to the problem of ultrasonic imaging of kidney stones in doppler mode

A. I. Polyanskiy^a, O. A. Sapozhnikov^b

*Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aai.polyanskiy@physics.msu.ru, ^boleg@acs366.phys.msu.ru

In this work, the features of ultrasonic imaging of kidney stones are considered in conditions when submicron size bubbles are present on the surface of the stones. A model is constructed that makes it possible to observe the so-called twinkling artifact, which consists in the formation of a nonstationary colored mosaic structure in ultrasound examination of stones in the Doppler regime. The model is based on the numerical simulation of the elastic equations and the Nolting-Nepayres equation describing cavitation of bubbles. The results of Doppler signal processing are given, which show that cavitation of bubbles does lead to the appearance of a twinkling artifact.

PACS: 43.20.+g

Keywords: ultrasonic diagnostic, cavitation of submicron size bubbles, twinkling artifact.

Received 08 July 2017.

Сведения об авторах

1. Полянский Андрей Иванович — студент; тел. (495) 939-29-52, e-mail: ai.polyanskiy@physics.msu.ru.
2. Сапожников Олег Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел. (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.