

## Расчетный комплекс с интерактивным интерфейсом для исследования акустических полей многоэлементных решеток для ультразвуковой хирургии

П. Б. Росницкий,<sup>\*</sup> С. А. Ильин,<sup>†</sup> О. А. Сапожников,<sup>‡</sup> В. А. Хохлова<sup>§</sup>

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

(Статья поступила 25.06.2013; Подписана в печать 29.08.2013)

В работе исследованы характеристики полей многоэлементных фазированных акустических решеток, находящихся в последнее время все более широкое применение в неинвазивной ультразвуковой хирургии. Для моделирования трёхмерных волновых полей использован асимптотический аналитический подход, позволяющий проводить расчёты на два порядка быстрее по сравнению с традиционным методом прямого численного интегрирования. Разработан программный комплекс с графическим интерфейсом для расчёта и визуализации ультразвуковых пучков, интерпретация особенностей структуры которых обычно достаточно сложна. Получены распределения амплитуды давления в различных плоскостях, а также построены трёхмерные изображения полей для типичной клинической терапевтической решётки. Определены области пространства, в пределах которых можно перемещать фокус фазированной решётки без проявления нежелательных побочных максимумов и при сохранении высокой интенсивности волны в основном фокусе.

PACS: 43.80.-n, 43.80.+p, 87.50.Y-

УДК: 534.7, 534.2

Ключевые слова: мощная фазированная решетка, программный комплекс, электронное смещение фокуса, неинвазивная ультразвуковая хирургия, интеграл Рэлея, побочные максимумы.

### ВВЕДЕНИЕ

В современной медицине широко используются ультразвуковые фокусирующие излучатели для проведения неинвазивных (без прямого хирургического вмешательства) операций [1, 2]. Локальное разрушение ткани происходит за счет фокусировки ультразвука и поглощения акустической энергии, что приводит к тепловому некрозу ткани в области фокуса, где интенсивность поля и тепловыделение максимальны. В последнее десятилетие применение фокусированного ультразвука в медицине для неинвазивного разрушения глубоко расположенных тканей организма стало распространенной и с успехом используемой в клинической практике технологией для лечения опухолей простаты, матки, печени, почек, молочной железы и костей [1].

Самый простой способ создания фокусированных полей связан с использованием одноэлементных вогнутых источников. Имеется большое количество клинических случаев, когда применение таких источников неэффективно и даже опасно из-за движения области облучения, вызванного дыханием и сердцебиением пациента, а также наличия сильно поглощающих и отражающих поверхностей на пути распространения ультразвукового пучка. Так, наличие костей грудной клетки при облучении печени или сердца приводит к ухудшению фокусировки пучка, недо-

статочному нагреву области воздействия, а также перегреву костей и вышележащих слоев ткани, включая кожу [3–8]. Для преодоления этих проблем в последнее время применяются мощные многоэлементные фазированные решетки, позволяющие независимо варьировать амплитуды и фазы полей, излучаемых отдельными элементами. Подходящим выбором амплитуд и фаз подаваемых на элементы электрических сигналов можно проводить «электронное» смещение фокуса или создавать различные комбинации из нескольких фокусов [9].

При электронном смещении фокуса необходимо учитывать возникающие побочные эффекты, обусловленные дискретной структурой решетки, такие как уменьшение амплитуды поля в основном фокусе и появление побочных максимумов [9]. Качество поля решетки определяется степенью проявления таких эффектов. Для их оценки необходимо проводить численные расчеты трехмерных полей при различных положениях фокуса, что является трудоемким процессом.

В данной работе представлен аналитический метод, позволяющий рассчитывать поля многоэлементных фазированных решеток более эффективно по сравнению с прямым численным расчетом. В основе метода лежит использование аналитического решения для дальнего поля каждого из элементов решетки и суммирование полученных полей от всех элементов. В качестве примера проанализировано качество поля, создаваемого фазированной решеткой с квазислучайным расположением элементов, которая является частью экспериментальной установки Имперского колледжа Лондона [9] и имеет следующие параметры: диаметр  $D = 170$  мм, радиус кривизны поверхности  $F = 130$  мм, радиус элементов  $a = 3.5$  мм, количество элементов  $N = 256$ , рабочая частота  $f = 1.0$  МГц.

\*E-mail: pavrosni@yandex.ru

†E-mail: sergey\_ilyin@acs366.phys.msu.ru

‡E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

§E-mail: vera@acs366.phys.msu.ru

Расчеты проводились для фокусировки в воде, скорость звука полагалась равной 1500 м/с. Оценка качества акустического поля при электронном смещении фокуса такой решетки проводилась ранее [9]. В связи с большими временными затратами на прямое численное интегрирование в указанной работе рассматривалось конечное число положений фокуса, а качество поля анализировалось только в плоскости его смещения. Применение в данной работе аналитического подхода позволило уточнить полученные ранее результаты: рассмотреть смещение фокуса и проанализировать качество создаваемых полей во всем объеме и с малым шагом смещения (0.1 мм).

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ РЕШЕТКИ

Устройство многоэлементной решетки, исследуемой в данной работе, схематично показано на рис. 1. Решетка представляет собой сферическую чашу, на которой расположены круглые элементы, нормали к которым направлены в геометрический центр кривизны чаши [8]. Предполагается, что скорость колебаний вдоль поверхности каждого элемента распределена равномерно («поршневые» источники), а фазы сигналов на элементах могут варьироваться независимо, что используется для создания фокуса в точке, отличной от центра кривизны поверхности решетки. Начало системы координат выбрано в центре решетки, а ось  $z$  направлена вдоль оси симметрии.

В линейном приближении поле давления, создаваемое всей решеткой, представляет собой сумму акустических полей каждого из ее элементов. Поле одного элемента можно рассчитать с помощью интеграла Рэлея [1]:

$$p_j(\mathbf{r}, t) = -\frac{i\omega\rho_0 e^{-i\omega t}}{2\pi} \int_{S_j} \frac{v_n(\mathbf{r}') e^{ikR}}{R} dS', \quad (1)$$

где  $p_j(\mathbf{r}, t)$  — комплексная амплитуда акустического давления, создаваемого элементом в точке наблюдения  $\mathbf{r}$  в момент времени  $t$ ,  $\rho_0$  — плотность среды,  $k = \omega/c_0$  — волновое число,  $\omega$  — циклическая частота излучателя,  $c_0$  — скорость звука,  $S_j$  — поверхность излучателя,  $v_n$  — амплитуда нормальной компоненты скорости колебаний в точке  $\mathbf{r}'$  поверхности,  $dS'$  — элемент площади с центром в указанной точке,  $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$  — расстояние от указанного элемента поверхности до точки наблюдения.

Обычно расчет интеграла (1) для каждого из элементов проводится численно путём разбиения поверхности  $S_j$  на большое количество элементов малого размера (много меньшего длины волны) и приближением интеграла соответствующей суммой. Однако возможен и иной подход. Учтём, что характерный размер элементов решеток, использующихся на практике, много меньше размеров самой решетки ( $a \ll D$ ),

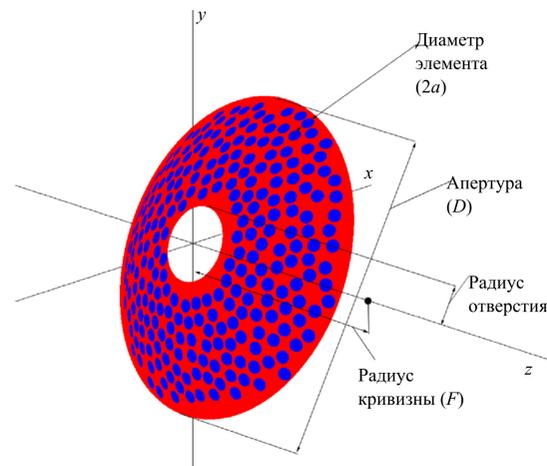


Рис. 1: Схема исследуемой решетки

а протяжённость ближней зоны одиночного элемента гораздо меньше радиуса кривизны поверхности решетки  $F$ . В этом случае уже на небольших расстояниях от поверхности решетки поле каждого из элементов можно аппроксимировать аналитическим решением для дальнего поля элемента [10]. Отметим, что аналитическое решение для поля в дальней зоне может быть выписано не только для круглого излучателя, но и для источников другой формы, т. е. метод является довольно общим. Ранее указанный асимптотический метод для расчета полей многоэлементных терапевтических решеток не применялся.

Решение задачи (1) в приближении дальнего поля для  $j$ -го плоского круглого элемента решетки имеет вид [10]:

$$p_j(\theta, r) = -\frac{ip_0 z_R e^{ikr}}{r} \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}, \quad (2)$$

где  $p_0 = \rho_0 c_0 v_n$  — характерная амплитуда акустического давления на поверхности элемента,  $a$  — радиус элемента,  $z_R = ka^2/2$  — дифракционная длина Рэлея,  $r$  — расстояние от центра элемента до точки наблюдения поля,  $\theta$  — угол между нормалью к поверхности элемента и лучом, направленным из центра элемента в точку наблюдения,  $J_1$  — функция Бесселя первого порядка.

Так как выписанное выше решение применимо только для дальнего поля элемента, возникает вопрос о его применимости к реальным полям. Для ответа на этот вопрос было проведено сравнение полученного решения с точным аналитическим решением вдоль оси преобразователя, которое рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$\frac{p(z)}{p_0} = -2i \exp \left[ i \frac{k}{2} (\sqrt{a^2 + z^2} + z) \right] \times \sin \left[ \frac{k}{2} (\sqrt{a^2 + z^2} - z) \right]. \quad (3)$$

Как видно на рис. 2, уже начиная с расстояний 3.5 см от элемента приближенное решение (2) практически не отличается от точного решения (3). Это позволяет использовать решение в дальнем поле каждого из элементов для расчета общего поля решетки путем суммирования решений для каждого элемента:

$$p(\mathbf{r}) = \sum_j p_j(\theta, r). \quad (4)$$

Для проверки точности метода, получаемое приближенное решение (4) сравнивалось с рассчитанным численно интегралом Рэля (1) по всей поверхности решетки. При численном расчете интеграла (1) вся поверхность решетки проецировалась на касательную плоскость, которая затем разбивалась на треугольники. Те треугольники, которые не принадлежали области проекции элементов решетки на плоскость, исключались из рассмотрения, а оставшиеся проецировались на поверхность решетки. Затем рассчитывалась площадь каждого треугольника и расстояние от его центра до точки поля. Тогда поле всей решетки можно рассчитать по следующей формуле, полученной после преобразования (1):

$$p(\mathbf{r}) = -\frac{ikp_0}{2\pi} \sum_S \frac{e^{ikR_m}}{R_m} S_m, \quad (5)$$

где суммирование ведётся по всем треугольникам, из которых составлен данный элемент,  $R_m$  — расстояние от каждого треугольника до точки наблюдения поля,  $S_m$  — площадь треугольника. Точность численного расчета зависит от количества треугольников, на которые делится поверхность решетки и обычно требует длительного машинного расчета.

Результаты сравнения полученного приближенного решения для поля всей решетки с решением, полученным путем прямого численного расчета интеграла Рэля, представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что аналитическое решение практически не отличается от численного. При этом показано, что расчет на основе аналитического подхода происходит на несколько порядков быстрее, чем при получении численного решения. Для смещения фокуса начальная фаза волны каждого элемента решетки задаётся с учетом задержки прихода волны от центра элемента в новый фокус (рис. 2).

## 2. ПРОГРАММА РАСЧЕТА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Для удобства использования представленного аналитического алгоритма и анализа получаемых результатов создан специальный комплекс программ. Он включает программу аналитического расчёта поля, создаваемого многоэлементной фазированной решеткой в различных плоскостях, и графический интерфейс для задания параметров решетки и визуа-

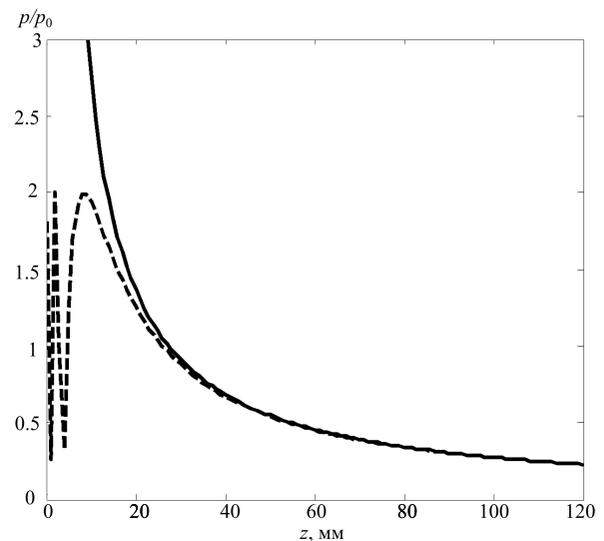


Рис. 2: Сравнение распределений давления вдоль оси единичного элемента решетки в случае точного аналитического решения (штрих-пунктирная линия) и аналитического решения в дальнем поле излучателя (сплошная линия)

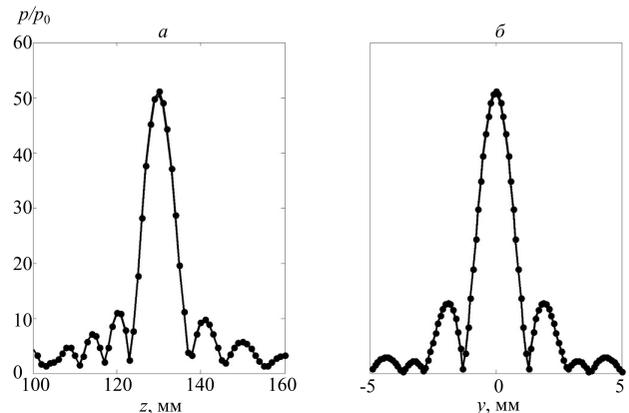


Рис. 3: Распределения амплитуды давления всей решетки вдоль оси решетки (а) и прямой, перпендикулярной оси решетки и проходящей через ее центр кривизны (б) в случае аналитического решения (сплошная линия) и прямого численного расчета интеграла Рэля (точки)

лизации результатов расчета. Программа реализована с использованием кроссплатформенной библиотеки «Qt» языка «C++». Преимуществами программы являются возможность ее запуска в различных операционных системах и отсутствие необходимости использования каких-либо коммерческих программных продуктов (например, «Mathworks Matlab»).

Главное окно программы позволяет задавать параметры решетки, ее элементов и характеристики среды

(рис. 4). Параметры задают геометрические свойства решетки и её элементов. Массив положений элементов вводится из внешнего текстового файла. После задания параметров программа может отобразить решетку в двух режимах: «вид спереди» и «3D». В режиме «3D» решетка отображается в виде трехмерной чаши с расположенными на ней элементами, на которую можно посмотреть с любого направления.

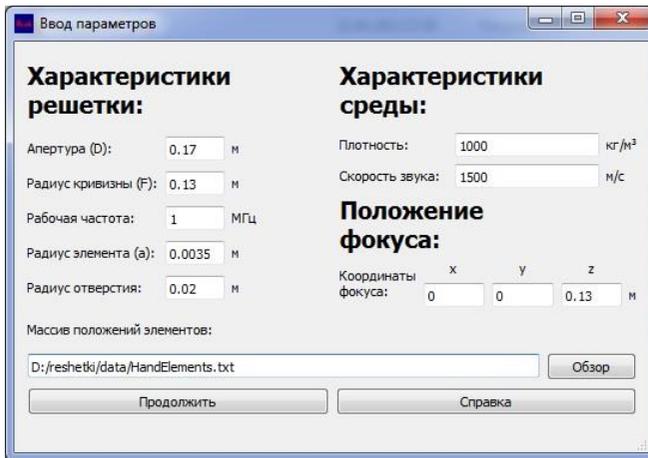


Рис. 4: Главное окно программы

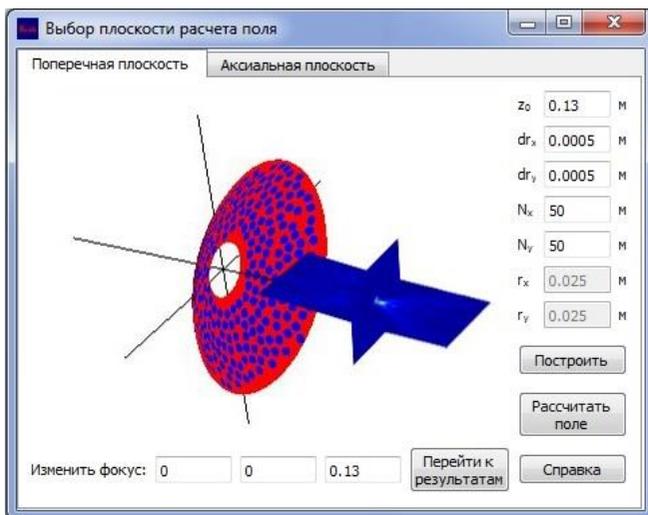


Рис. 5: Окно выбора плоскости расчета поля

Следующее окно программы служит для выбора плоскости расчёта поля (рис. 5). Здесь же задается шаг выдачи результатов, определяющий те точки в выбранной плоскости, в которых поле решетки будет рассчитано с помощью аналитического метода. По полученным значениям амплитуды давления в узлах сетки с помощью билинейной интерполяции рассчитываются амплитуды давления во всех остальных точках плоскости. Наибольший интерес представляют два типа плоскостей: поперечная (перпендикуляр-

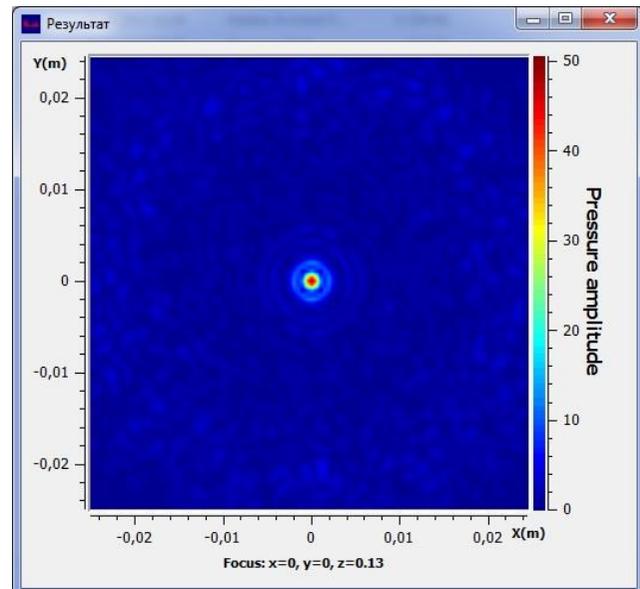


Рис. 6: Окно результатов

ная оси решетки) и аксиальная (проходящая через её ось). После ввода параметров плоскости, её изображение появляется рядом с трёхмерным изображением решетки (рис. 5).

Результаты расчета отображаются в виде двумерных пространственных распределений: по осям  $x$  и  $y$  откладываются соответствующие направления в выбранной плоскости, а цвет точки на плоскости  $xy$  соответствует амплитуде давления в этой точке (рис. 6). Сопоставление цвета и значения давления производится по шкале, расположенной справа от распределений. При работе с программой можно выбирать различные положения фокуса и плоскости отображения, а также изменять шаги для расчета поля. Каждое вновь полученное распределение появляется в новом окне с обозначением основных данных о выбранной конфигурации (рис. 6). Таким образом, можно одновременно проводить исследования поля решетки для разных конфигураций, что существенно упрощает процесс анализа сложного для визуализации трехмерного поля решетки.

Побочные эффекты, возникающие при электронном смещении фокуса решетки, можно наблюдать на двумерном распределении амплитуды давления, полученном с использованием данной программы.

Из сравнения распределений, полученных при смещении фокуса на 20 мм от центра кривизны решетки вдоль оси  $y$ , т.е. при фокусировке в точку ( $x = 0$  мм,  $y = 20$  мм,  $z = 130$  мм) (рис. 7), и при фокусировке в центр кривизны решетки ( $x = 0$  мм,  $y = 0$  мм,  $z = 130$  мм) (рис. 8), видно, что на первом распределении наблюдаются уменьшение амплитуды давления в основном максимуме примерно на 60% по сравнению со случаем без смещения фокуса (рис. 8), а также возникновение побочных максимумов в нижних частях

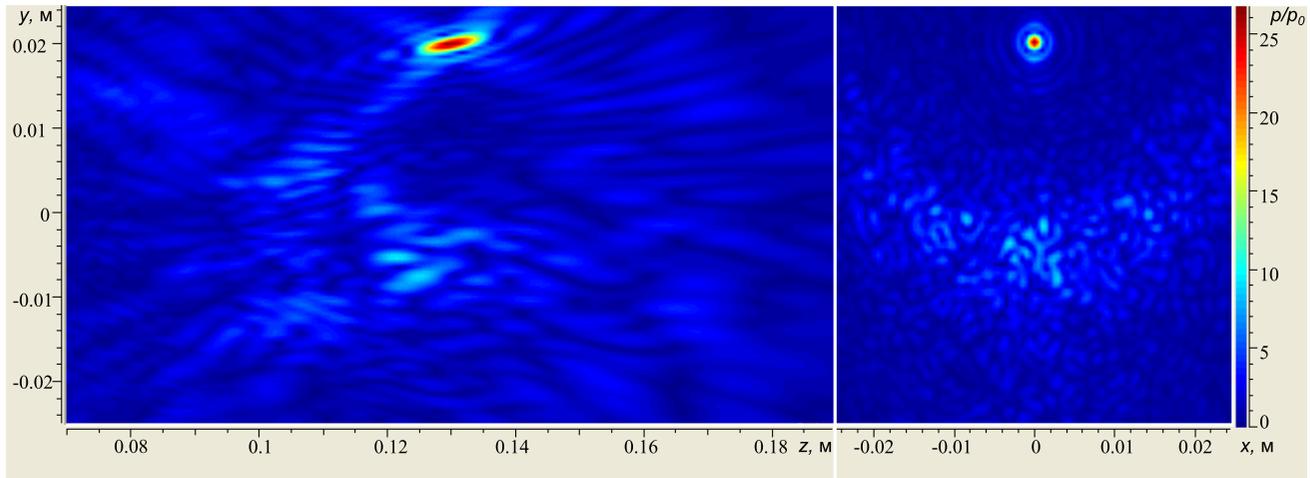


Рис. 7: Двумерное распределение амплитуды давления при смещении фокуса в точку ( $x = 0$  мм,  $y = 20$  мм,  $z = 130$  мм): слева — плоскость вдоль оси решетки, справа — плоскость, перпендикулярная оси решетки и проходящая через центр её кривизны

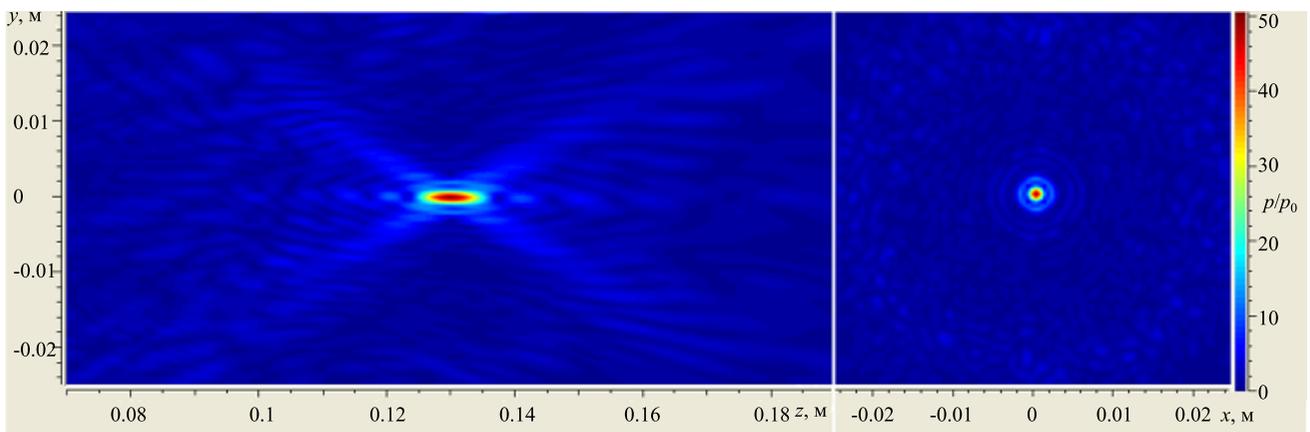


Рис. 8: Двумерное распределение амплитуды давления при фокусировке в центр кривизны решетки ( $x = 0$  мм,  $y = 20$  мм,  $z = 130$  мм). Слева — плоскость вдоль оси решетки, справа — плоскость, перпендикулярная оси решетки и проходящая через центр её кривизны

распределения.

Побочные эффекты проявляются тем сильнее, чем дальше фокус отклоняется от центра кривизны решетки. Таким образом, возникает необходимость нахождения той области пространства, при помещении фокуса в которую оба побочных эффекта не превышают некоторого задаваемого допустимого уровня.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛЯ РЕШЕТКИ

При рассмотрении различных положений фокуса решетки были определены области смещения фокуса, в пределах которых амплитуда давления основного максимума уменьшается на 10, 30 и 50% от максимально достигаемого значения. Эти области показаны на рис. 9 в виде контуров в плоскости оси решетки  $yz$

и плоскости  $xy$ , проходящей через центр кривизны решетки перпендикулярно ее оси. Видно, что максимум амплитуды давления достигается при фокусировке не в центр кривизны, а ближе к излучателю (рис. 9 а); область уменьшения давления симметрична относительно оси решетки (рис. 9 б).

Область, в которой интенсивность поля составляет более половины от максимального значения (амплитуда давления составляет 0.7 от максимума), имеет характерные размеры около 30 мм в поперечном сечении и 60 мм вдоль оси.

Уменьшение интенсивности в основном максимуме при смещении фокуса можно компенсировать путём увеличения полной мощности, излучаемой решеткой. При этом будут также усиливаться и побочные максимумы (рис. 8), что нежелательно при проведении облучения ввиду сложности прогнозирования места их возникновения. Поэтому в работе были рассчитаны

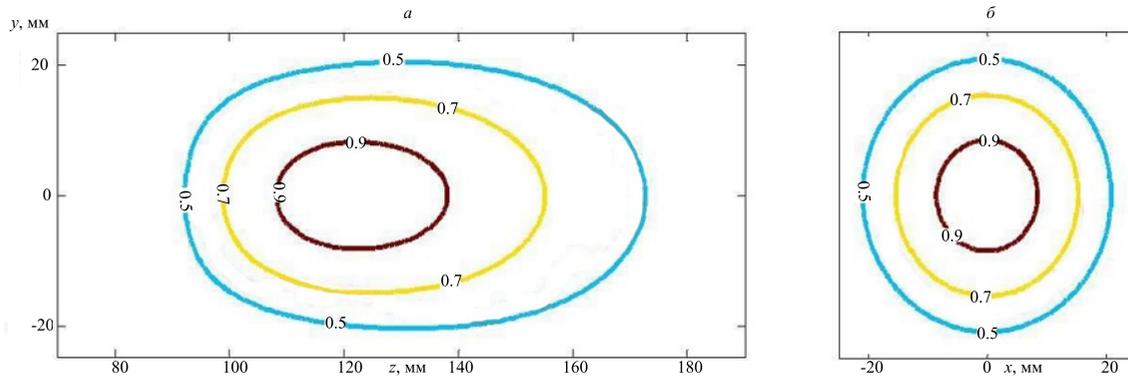


Рис. 9: Области уменьшения амплитуды давления в основном максимуме на 10, 30 и 50% от наибольшего значения. (а) — плоскость вдоль оси решетки, (б) — плоскость, перпендикулярная оси решетки и проходящая через центр её кривизны

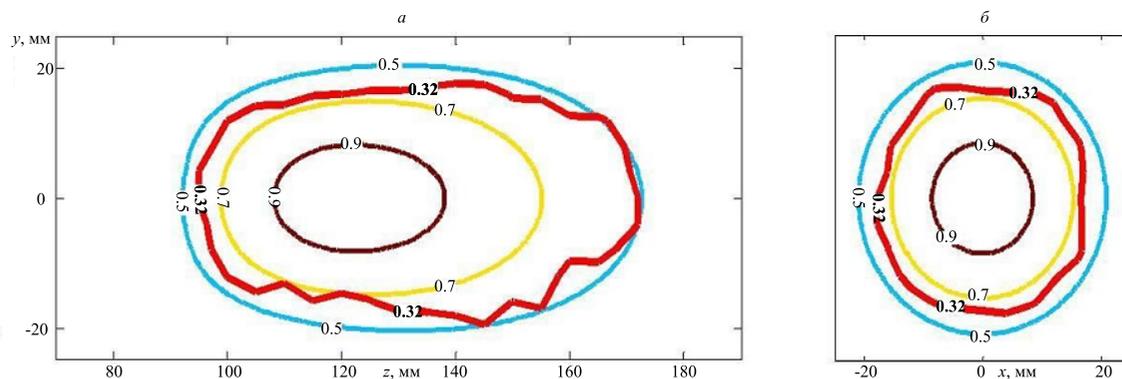


Рис. 10: Совмещенные области смещения фокуса, соответствующие уменьшению амплитуды давления в основном максимуме на 10, 30 и 50% от наибольшего значения (тонкая линия), и области, в которых интенсивность побочных максимумов не превышает 10% от интенсивности основного максимума (жирная линия): (а) — плоскость вдоль оси решетки, (б) — плоскость, перпендикулярная оси решетки и проходящая через центр её кривизны

области смещения фокуса, в которых интенсивность побочных максимумов не превышала 10% от интенсивности (32% от амплитуды давления) в основном максимуме, что является принятым критерием безопасности облучения [9, 11–13]. На рис. 10 показаны эти области вместе с областями уменьшения амплитуды поля в основном максимуме.

Как видно из рисунка, область, в которой пик интенсивности побочных максимумов составляет не более 10% от интенсивности в основном максимуме, превышает по размерам область уменьшения интенсивности основного максимума в два раза. Это означает, что для данной решетки область смещения фокуса, в которой интенсивность в основном максимуме уменьшается менее чем в два раза, определяет пространственные границы, в пределах которых можно смещать фокус так, чтобы обеспечить безопасность облучения, так как в этом случае достаточно мощные побочные максимумы еще не возникают. При этом возможна компенсация уменьшения интенсивно-

сти в фокусе с помощью увеличения общей излучаемой мощности решетки без снижения уровня безопасности облучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан программный комплекс с графическим интерфейсом для расчёта параметров и визуализации ультразвуковых пучков, интерпретация особенностей структуры которых обычно достаточно сложна. Для моделирования трёхмерных волновых полей был использован асимптотический аналитический подход, позволяющий проводить расчёты более чем на порядок быстрее по сравнению с традиционным методом прямого численного интегрирования. На основе созданного комплекса исследованы характеристики поля многоэлементной фазированной акустической решетки, типичной для неинвазивной ультразвуковой хирургии.

Получены распределения амплитуды давления в различных плоскостях, а также построены трёхмерные изображения поля решетки при электронном смещении ее фокуса. Рассмотрены возникающие при этом основные побочные эффекты, состоящие в уменьшении амплитуды в основном максимуме и возникновении сильных побочных максимумов. Определены области пространства, в пределах которых можно перемещать фокус фазированной решетки без проявления нежелательных побочных максимумов при сохранении высокой интенсивности волны в основном фокусе.

Для конкретной рассмотренной решетки показано, что размеры области смещения фокуса от центра её кривизны, в которой возникают сильные побочные максимумы ( $> 10\%$  по интенсивности по сравнению с основным), превышают размеры области смещения, в которой интенсивность в основном максимуме уменьшается менее чем в два раза.

Требования к структуре поля акустических решеток отличаются от требований к хорошо изучен-

ным полям диагностических ультразвуковых датчиков [1, 2]. На сегодняшний день особенности полей решеток для систем ультразвуковой хирургии до конца не изучены. Поэтому предложенный аналитический метод можно использовать для прогнозирования работы решеток, применяемых в ультразвуковой хирургии. Следует отметить, что при рассмотрении многоэлементных решеток иных конфигураций и с другими волновыми размерами элементов необходимо проводить дополнительные исследования на основе представленного алгоритма. Например, использование многофокусных конфигураций может значительно изменить области уменьшения амплитуды в основном максимуме и области появления побочных максимумов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-02-00183\_а, 12-02-31388\_мол\_а) и программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-2631.2012.2).

- 
- [1] Хилл К., Бэмбер Дж., тер Хаар Г. (ред.). Ультразвук в медицине. Физические основы применения. (М.: Физматлит, 2008).
- [2] Гаврилов Л. Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине. (М.: ФАЗИС, 2013).
- [3] Бэйли М. Р., Хохлова В. А., Сапожников О. А., Каргл С. Г., Крам Л. А. Акуст. журн. **49**, №4. С. 437–464. (2003).
- [4] Бобкова С. М., Цысарь С. А., Хохлова В. А., Андреев В. Г. Акуст. журн. **55**, №4-5. С. 457–465. (2009).
- [5] Bobkova S., Shaw A., Gavrilov L., Khokhlova V., Hand J. Ultrasound in Medicine and Biology. **36**, N 6. P. 888–906. (2010).
- [6] Хохлова В. А., Бобкова С. М., Гаврилов Л. Р. Акуст. журн. **56**, №5. С. 622–632. (2010).
- [7] Гаврилов Л. Р., Хохлова В. А., Бобкова С. М., Шоу А., Хэнд Дж. Медицинская физика. **3**, №47, С. 53–64. (2010).
- [8] Ilyin S. A., Bobkova S. M., Khokhlova V. A., Gavrilov L. R. Physics of Wave Phenomena. **19**, N1. P. 1–6. (2011).
- [9] Gavrilov L. R., Hand J. W. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. **47**, N1. P. 125–139. (2000).
- [10] O'Neil H. T. J. Acoust. Soc. America. **21**, N5. P. 516–526. (1949).
- [11] Goss S. A., Frizell L. A., Kouzmanoff J. T., Barich J. M., Yang J. M. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. **43**, N 6. P. 1111–1121. (1996).
- [12] Ebbini E. S., Cain C. A. IEEE Trans. Biomed. Eng. **38**, N7. P. 634–643. (1991).
- [13] Hutchinson E. B., Buchanan M. T., Hynynen K. Med. Phys. **23**, N5. P. 767–776. (1996).

---

## A software package with an interactive interface for the study of acoustic fields of multi-element arrays for ultrasonic surgery

P. B. Rosnitskiy<sup>a</sup>, S. A. Ilyin<sup>b</sup>, O. A. Sapozhnikov<sup>c</sup>, V. A. Khokhlova<sup>d</sup>

M. V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, Department of Acoustics. 119991, Moscow, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>pavrosni@yandex.ru, <sup>b</sup>sergey\_ilyin@acs366.phys.msu.ru, <sup>c</sup>oleg@acs366.phys.msu.ru, <sup>d</sup>vera@acs366.phys.msu.ru

We study the acoustic field of a powerful phased array at different positions of the focus by using an analytical method. Due to the fact that the speed of the analytical calculation is much higher than the rate of the numerical one, the distributions of the pressure amplitude in different planes and in a wide spatial area were obtained. Three-dimensional fields generated by arrays are quite difficult to interpret. For the convenience of the application of the analytical method, a software package that creates a graphical interface for the calculation of the array field and visualization of the results were developed. In the data analysis we determined a region of focusing space, in which strong side effects do not appear.

PACS: 43.80.-n, 43.80.+p, 87.50.Y-

*Keywords:* powerful phased array, software package, electronic displacement of the focus, noninvasive ultrasonic surgery, Rayleigh integral, side maxima.

Received 26.06.2013.

**Сведения об авторах**

1. Росницкий Павел Борисович — студент физического факультета; e-mail: pavrosni@yandex.ru.
  2. Ильин Сергей Андреевич — аспирант физического факультета; e-mail: sergey\_ilyin@acs366.phys.msu.ru.
  3. Сапожников Олег Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, доцент кафедры акустики; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.
  4. Хохлова Вера Александровна — докт. физ.-мат. наук, доцент кафедры акустики; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: vera@acs366.phys.msu.ru.
-