

УДК 534.6.08

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ МАСОК ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ

© 2022 г. Д. А. Николаев<sup>1</sup>, \*, С. А. Петросян<sup>1</sup>, С. А. Цысарь<sup>1</sup>,  
П. Б. Росницкий<sup>1</sup>, О. А. Сапожников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

\*E-mail: da.nikolaev@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Развит способ создания требуемого распределения ультразвукового поля мегагерцового диапазона частот в жидкости за счет комбинирования одноэлементного пьезоэлектрического излучателя с расположенной перед ним системой из двух профилированных твердотельных пластин (фазовых масок). Исследована возможность создания фазовых масок, позволяющих управлять пространственным распределением акустического поля за счет изменения частоты излучения.

DOI: 10.31857/S0367676522070237

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих приложениях акустических волн необходимо управлять пространственно-временным распределением волнового поля [1–3]. Для этого могут быть использованы многоэлементные излучатели, в которых каждый элемент работает независимо от остальных. В некоторых задачах для создания акустического поля может потребоваться большое их количество. Многоэлементные устройства сложны в изготовлении и управлении; кроме того, в процессе эксплуатации в большинстве случаев нет возможности контролировать работоспособность каждого излучающего канала [4]. В силу ряда технических ограничений реальные устройства к настоящему моменту имеют порядка 100–1000 элементов. Для создания сложного пространственного распределения поля даже этого количества может быть недостаточно. Кроме того, существующие многоканальные устройства не всегда доступны в силу их дороговизны.

Альтернативой многоэлементным излучателям могут служить фазовые маски – неоднородные по толщине пластины, которые позволяют заданным образом изменять распределение фазы проходящей через них волны и тем самым получать необходимое распределение поля в пространстве [5]. Такое управление фазой возможно

за счет различия скоростей звука в окружающей среде и в материале пластины.

Отметим, что с помощью одной фазовой маски можно модулировать лишь фазу волны (отсюда и название) – амплитуда волны при этом меняется слабо. Между тем, для создания требуемого пространственного распределения поля необходимо управлять не только фазой, но и амплитудой акустического поля. Нужно пространственное распределение амплитуды и фазы может быть получено посредством использования двух отстоящих друг от друга фазовых масок в виде профилированных пластин [6] за счет фазовой модуляции на обеих из них. Выбором профиля пластин и расстояния между ними можно подобрать условие, при котором ближняя из них к излучателю создает требуемое распределение амплитуды давления на поверхности второй маски, которая, в свою очередь, создает необходимую фазовую модуляцию для окончательного формирования заданного распределения амплитуды и фазы в пространстве.

Фазовые маски могут быть изготовлены, например, из фотополимерной смолы посредством 3D печати методом лазерной стереолитографии с точностью до 0.1 мм.

В работе реализован алгоритм расчета профиля толщины двух твердотельных пластин, которые в комбинации друг с другом дают возможность

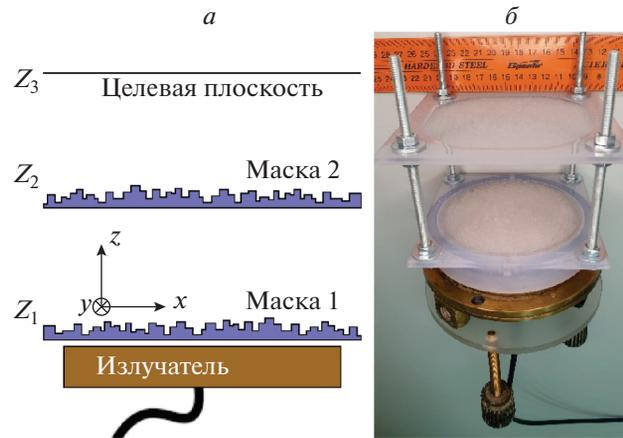


Рис. 1. Геометрия задачи (а), экспериментальный образец (б).

формировать заданное распределение акустического давления в поперечной плоскости на фиксированном расстоянии от излучателя (рис. 1а). Исследовано влияние неоднородности колебательной скорости поверхности излучателя на качество модуляции поля указанным набором из двух фазовых масок. На основе полученных результатов был изготовлен экспериментальный образец конструкции из двух профилированных пластин (рис. 1б). Проведено исследование возможности создания многочастотной фазовой маски, с помощью которой заданные распределения амплитуды давления в целевой плоскости реализуются на нескольких частотах.

### РАСЧЕТ ФАЗОВЫХ МАСОК

Фазовая задержка прошедшей волны определяется не только толщиной, но и акустическими свойствами материала пластин и иммерсионной жидкости, в качестве которой в работе использовалась вода. Ее скорость звука и плотность при рабочей температуре 22°C составляет 1491 м/с и 998 кг/м<sup>3</sup>, соответственно. Имея в виду использование фотополимерной смолы для решения рассматриваемой задачи, было проведено предварительное измерение акустических параметров указанного материала. Скорость звука определялась по измерению времени прохождения ультразвукового импульса с частотой заполнения 1 МГц через плоскопараллельный образец известной толщины, и оказалась равной  $2509 \pm 10$  м/с. Измеренная плотность материала составила  $1198 \pm 1$  кг/м<sup>3</sup>.

Рассмотрим задачу в следующей постановке. С использованием плоского излучателя и фазовых масок требуется создать распределение интенсивности, например, в виде буквы “П” в целевой плоскости, параллельной поверхности излучате-

ля на некотором удалении от него (рис. 1а). Основным ограничением на точность создаваемого пространственного распределения акустического поля является дифракционный предел, поэтому характерный масштаб неоднородности предопределенного поля должен превышать длину волны в воде. Для расчета системы масок в настоящей работе использовался двухэтапный (I, II) подход. Сначала (I) в приближении фазового экрана, при котором маска считается бесконечно тонкой и не изменяющей амплитуду волны, осуществлялась итерационная процедура расчета требуемых фазовых сдвигов в плоскостях расположения масок. Далее (II) проводился расчет поля без указанного приближения, и определялся требуемый профиль пластин. Для итерационной процедуры первого этапа использовалась следующая последовательность действий:

1) Исходя из фиксированного распределения интенсивности в плоскости на расстоянии  $Z_3$  от излучателя (рис. 1а) задаются значения действительной амплитуды давления. Фаза волны выбирается произвольно, для определенности приравняем ее нулю. При больших волновых размерах системы достаточно учитывать только распространяющиеся волны, поэтому распределение комплексной амплитуды будем задавать в узлах квадратной сетки с шагом  $\Delta_{xy} = c_w / (2f)$ , где  $f$  — частота излучения,  $c_w$  — скорость звука в воде. Выбранный шаг составляет половину длины волны в среде и определяет разрешение, с которым будет рассчитана фазовая маска.

2) С плоскости  $Z_3$  на  $Z_2$  методом углового спектра [7] с использованием пропагатора обратного распространения рассчитывается комплексная амплитуда давления.

3) В соответствии с приближением фазового экрана рассчитанное на  $Z_2$  поле модифицируется, но лишь в отношении фазы, которая задается случайным образом в диапазоне  $(-\pi, \pi)$  для старта итерационного процесса на следующем шаге.

4) Исходя из модифицированного поля в плоскости  $Z_2$  делается следующий шаг в направлении излучателя: методом углового спектра рассчитывается комплексная амплитуда давления в плоскости  $Z_1$ , где расположена первая фазовая маска.

5) На плоскости  $Z_1$  фиксируется фаза акустического давления, а распределение амплитуды заменяется на заданное вдоль поверхности излучателя, что справедливо для маски, полностью прилегающей к поверхности преобразователя. В качестве первого приближения используем поршневую модель.

6) С плоскости  $Z_1$  также методом углового спектра, но с пропагатором прямого распространения, рассчитывается давление на  $Z_2$ . Полученное фазовое распределение используется для дальнейшего итерационного процесса вместо заданного исходно на шаге 3.

7) Пункты 4–6 повторяются до схождения суммы поточечного среднеквадратичного отклонения значений амплитуды давления, рассчитываемой на плоскости  $Z_2$ , от результата, полученного на шаге 2. Критерием прерывания итерационного процесса является остановка убывания разности с выходом на константу. Для случая, представленного в настоящей работе, было достаточно около 1000 итераций.

Таким образом определяются необходимые фазовые распределения за плоскостью  $Z_1$  и перед  $Z_2$ . Напомним, что перед  $Z_1$  она задается полем на поверхности излучателя, а за  $Z_2$  рассчитывается исходя из целевого поля на шаге 2. Необходимые фазовые задержки для обеих масок  $\Delta\varphi(x, y)$  определяются разностью фаз поля на входе и выходе каждой плоскости, что позволяет рассчитать профиль каждой маски  $z(x, y)$  в узлах координатной сетки по формуле:

$$z(x, y) = \frac{\Delta\varphi(x, y) - k_w Z_{max}}{k_m - k_w}, \quad (1)$$

где  $k_w = \omega/c_w$ ,  $k_m = \omega/c_m$  – волновые числа в воде и в материале маски, соответственно,  $Z_{max}$  – ее максимальная толщина.

На втором этапе без использования приближения фазового экрана проводилось моделирование прохождения волны с поверхности излучателя на  $Z_2$  через первую маску с учетом ее профиля, найденного после первого этапа по формуле (1).

Расчет поля осуществлялся с помощью программного пакета k-Wave MATLAB Toolbox с открытым исходным кодом [8], который основан на псевдоспектральном методе и позволяет проводить моделирование распространения акустической волны через среду с неоднородными скоростью звука, плотностью и поглощением. В результате такой процедуры уточнялась требуемая фазовая задержка в плоскости второй маски и определялась ее толщина по формуле (1). Далее с помощью того же пакета рассчитывалось прохождение волны через вторую маску на целевую поверхность  $Z_3$ .

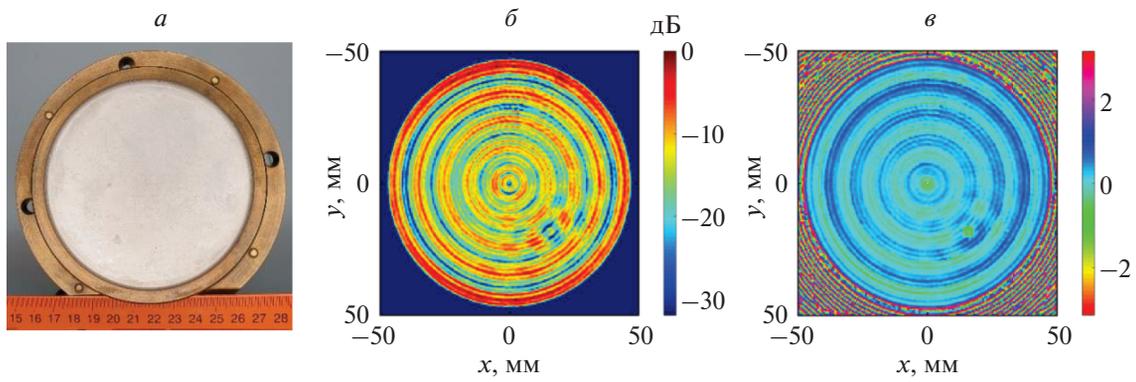
### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ КОЛЕБАНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Обычно расчет фазовых масок проводится с использованием поршневого приближения работы излучателя [6, 9], что не выполняется для реальных преобразователей [10, 11].

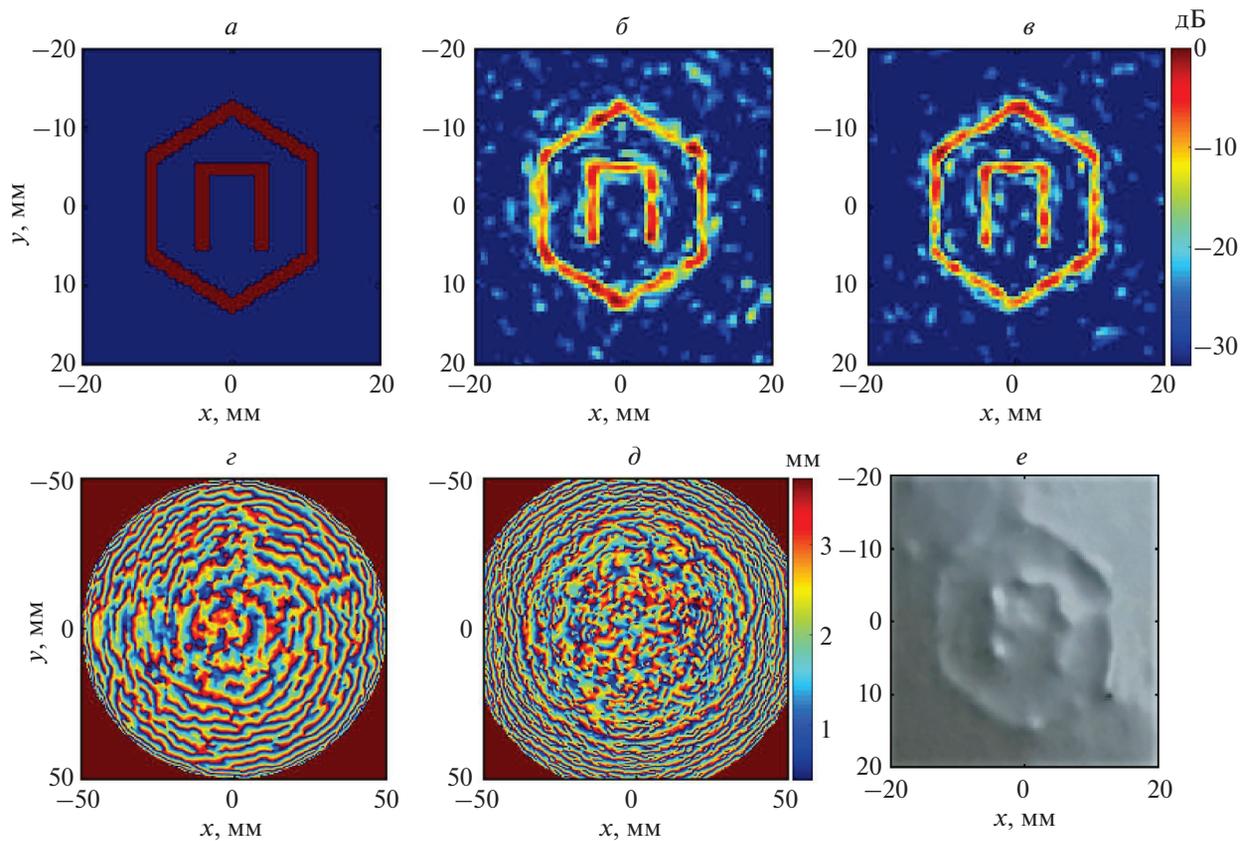
Задачу определения колебательной скорости поверхности помогает решить метод импульсной акустической голографии [12–14], активно развивающийся в последние годы. Данный способ позволяет рассчитать пространственные распределения давления и колебательной скорости, в том числе на поверхности излучателя. В настоящей работе для учета реальной пространственной структуры поля было проведено измерение голограммы преобразователя диаметром 93.5 мм и резонансной частотой 1.12 МГц (рис. 2а) с помощью капсульного гидрофона с диаметром чувствительного элемента 200 мкм (HGL-0200, Onda, США), перемещаемого системой микропозиционирования (UMS-3, Precision Acoustics, Великобритания). Получены распределения амплитуды и фазы нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности излучателя, представленные на рис. 2б и 2в соответственно.

Видно, что распределения амплитуды и фазы нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности излучателя сильно неоднородны. Концентрическая структура вызвана суперпозицией мод Лэмба [11]. Кольца с большей по сравнению с окружающими участками скоростью соответствуют местам пучностей стоячих волн, где излучение в воду происходит наиболее эффективно.

Для сравнения результатов метода с использованием поршневого приближения и с учетом реального распределения поля излучателя был проведен расчет набора масок для создания в целевой плоскости  $Z_3$  заданного распределения в виде буквы “П” (рис. 3а). На рис. 3б показана получен-



**Рис. 2.** Пьезокерамический излучатель (а). Определенные методом акустической голографии на его поверхности нормированная амплитуда (б) и фаза (в) нормальной компоненты колебательной скорости при работе в воде.



**Рис. 3.** Заданное распределение амплитуды давления в целевой плоскости (а). Результат расчета масок в поршневом приближении работы излучателя (б), с учетом измеренной голограммы (в). Профиль рассчитанных масок на расстоянии  $Z_1$  (г) и  $Z_2$  (д). Рельеф поверхности воды при совпадении целевой плоскости и поверхности воды (е).

ная на  $Z_3$  амплитуда давления с использованием приближения равномерного колебания преобразователя, а на рис. 3в — с учетом его реальной колебательной скорости. Заметно, что во втором

случае (рис. 3в) рассчитанное пространственное распределение давления на  $Z_3$  является более близким к заданному распределению (рис. 3а) с менее выраженными спеклами излучения. Отме-

тим также, что различие между этими подходами относительно мало, и для определенных приложений можно ограничиться поршневым приближением при расчете акустических масок.

Для экспериментальной иллюстрации были напечатаны фазовые маски (рис. 1б), рассчитанные с учетом реальной колебательной скорости поверхности излучателя. Профили первой и второй пластин показаны соответственно на рис. 3г и 3д. Печать деталей проведена из материала Accura 60 на работающем по технологии SLA 3D принтере Prox 800. На рис. 3е продемонстрирован рельеф поверхности воды, проявляющийся под действием радиационной силы акустического излучения. Маски с излучателем были выставлены параллельно целевой плоскости, которая совпадала с поверхностью воды. Выпуклости рельефа соответствуют высокому значению амплитуды акустического давления.

### МНОГОЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ПОЛЯ

Изготовленная описанным способом конструкция из двух фазовых пластин позволяет изменять акустическое поле заданным образом только на одной частоте, что ограничивает их практическое применение. В настоящем разделе предложен способ многочастотной модуляции путем деления фазовой маски на области, каждая из которых рассчитана на определенную частоту.

В случае, если целевое распределение давления достаточно компактно в сравнении с размером излучателя, но при этом значительно превышает длину волны в среде, то после распространения акустический пучок на плоскости второй (дальней от преобразователя) маски также будет иметь небольшой поперечный размер. Следовательно, для эффективной модуляции на нескольких частотах следует направить акустические пучки с целевой плоскости на различные участки плоскости  $Z_2$  (подбирая фазу на шаге 1), которые будут формировать требуемое распределение поля на заданных частотах. При этом области на обеих масках удобно выбирать аналогичными по форме и расположению, тогда соответствующий участок излучателя под первой маской будет эффективно задействован для создания заданного распределения давления в целевой плоскости. Алгоритм подбора фазовых сдвигов и толщины масок для каждой частоты аналогичен пунктам 3–7 описанного выше алгоритма.

Частоты, на которые настраивается каждая область маски в рамках полосы работы преобразователя, следует выбирать достаточно отдаленными друг от друга для того, чтобы остальные участки вносили как можно более однородное

возмущение акустического поля в целевое распределение. Необходимо также учитывать, что при разбиении маски на большее количество элементов энергия акустического поля, задействованная для модуляции на конкретной частоте, уменьшается. Из-за этого результирующее распределение давления в целевой плоскости будет в большей степени отклоняться от заданного.

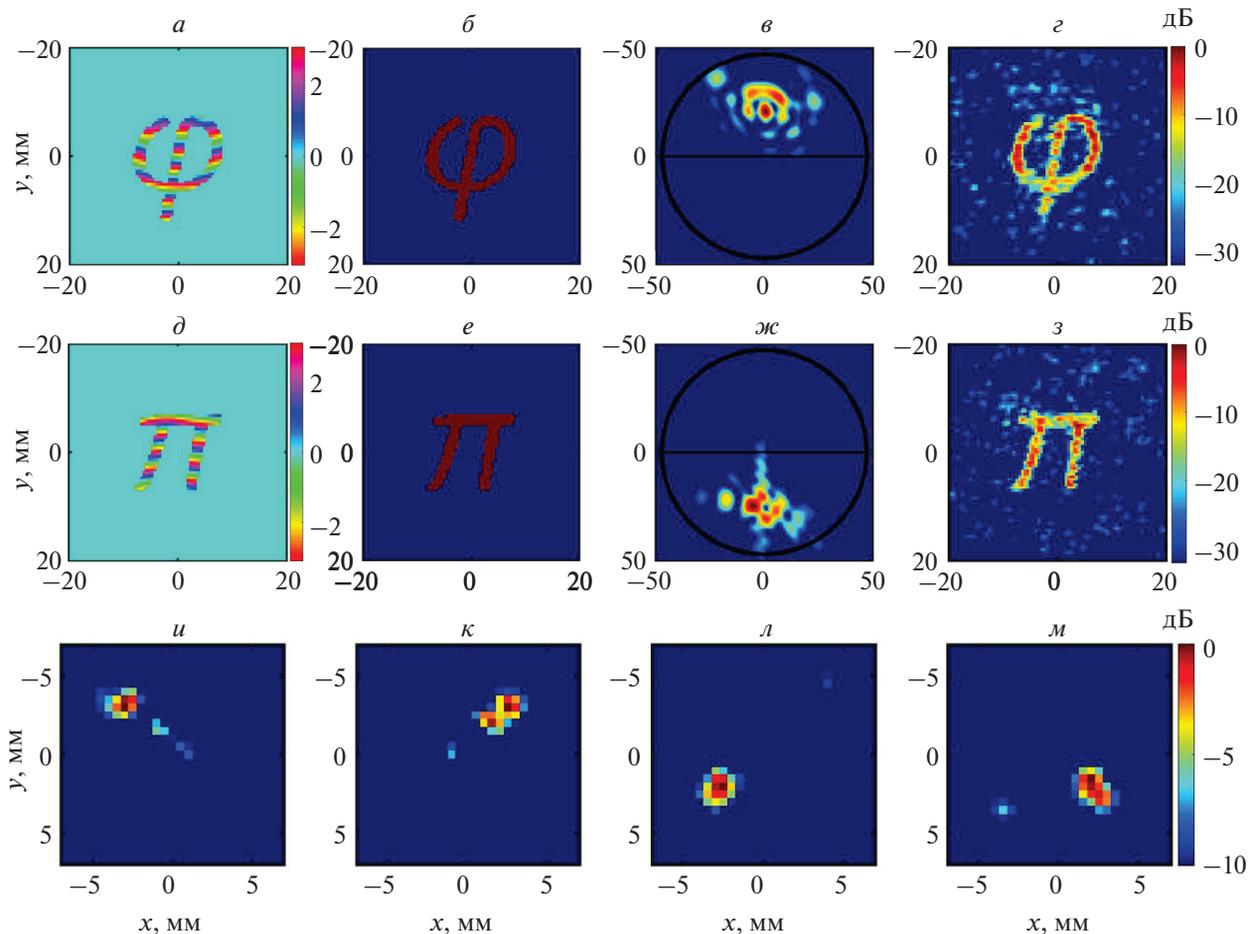
Для проверки работы системы в многочастотном режиме сначала был проведен расчет двух распределений поля в виде символов  $\varphi$  и  $\pi$  (рис. 4б и 4е) при 1.12 и 1.3 МГц, соответственно. Акустическая маска была разделена на две половины. Фаза в целевой плоскости (рис. 4а и 4д) на шаге 1 была подобрана таким образом, чтобы пучок был максимально сфокусирован в центр своей области маски (рис. 4в и 4ж). Части, ответственные за модуляцию на своей частоте, объединялись после вычислений. Далее через комбинированную маску проводился расчет распространения волны, результат которого показан на рис. 4г и 4з.

Аналогичным образом были получены фазовые маски с четырехчастотной модуляцией в диапазоне 1–1.3 МГц с шагом 0.1 МГц. В качестве целевого распределения выбирались четыре круга диаметром 1.5 мм, центры которых располагались в вершинах квадрата со стороной 4.5 мм. За фокусировку в центр каждого круга отвечала четверть маски. Результат расчета показывает, что управление положением фокуса представленной системы можно осуществлять только за счет переключения частоты сигнала, подаваемого на излучатель (рис. 4и, 4к, 4л и 4м).

Совершенствуя технологию расчета фазовых масок, можно обеспечить фокусировку поля в большем количестве точек. Таким образом, при переключении частоты в определенном диапазоне данная система будет работать как двумерная антенная решетка, позволяя сканировать область пространства без механических перемещений одноэлементного излучателя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ создания необходимого пространственного распределения поля в плоскости с помощью системы из двух фазовых масок. Показано, что использование реальной колебательной скорости поверхности излучателя для расчета фазовых масок улучшает качество целевого распределения акустического давления, что может быть существенно для некоторых приложений. Продемонстрировано, что предлагаемый подход позволяет управлять пространственным распределением поля путем изменения частоты сигнала.



**Рис. 4.** Первый ряд: расчет для акустической волны частотой 1.12 МГц, второй ряд — для частоты 1.3 МГц. Фаза (а, д) и амплитуда (б, е) целевого распределения. Поле на поверхности второй маски (в, ж). Полученное распределение на целевой плоскости (г, з). Третий ряд: четырехчастотный режим работы системы для перемещения фокуса на частотах 1 (и), 1.1 (к), 1.2 (л), 1.3 МГц (м).

Исследование выполнено при поддержке Политехнического музея г. Москвы, Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-90022) и Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parfenov V.A., Koudan E.V., Krokhmal A.A. et al. // Adv. Health. Mater. 2020. Art. No. 2000721.
2. Lee J., Lee C., Shung K.K. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2010. V. 57. No. 10. P. 2305.
3. Baresch D., Garbin V. // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2020. V. 117. No. 27. Art. No. 15490.
4. Цысарь С.А., Николаев Д.А., Сапожников О.А. // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 3. С. 1.
5. Lalonde R.J., Worthington A., Hunt J.W. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1993. V. 40. No. 5. P. 592.
6. Brown M.D. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 115. Art. No. 053701.
7. Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. // Изв. РАН Сер. физ. 2021. Т. 85. № 6. С. 854; Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 6. P. 658.
8. Treeby B.E., Jaros J., Rohrbach D. et al. // Proc. IUS Int. Ultrason. Symp. (Chicago, 2014). P. 146.
9. Jun Zhang, Yang Yang, Benpeng Zhu et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. Art. No. 243502.
10. Canney M.S., Bailey M.R., Crum L.A. et al. // J. Acoust. Soc. Amer. 2008. V. 124. No. 4. P. 2406.
11. Cathignol D., Sapozhnikov O.A., Zhang J. // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. No. 3. P. 1286.

12. Sapozhnikov O.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A. et al. // J. Acoust. Soc. Amer. 2015. V. 138. No. 3. P. 1515.
13. Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A. et al. // J. Acoust. Soc. Amer. 2021. V. 149. No. 1. P. 386.
14. Петросян С.А., Николаев Д.А., Цысарь С.А. и др. // Изв. РАН Сер. физ. 2021. Т. 85. № 6. С. 842; Petrosyan S.A., Nikolaev D.A., Tsysar S.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 6. P. 647.

## Using phase masks to control the structure of the ultrasound field

D. A. Nikolaev<sup>a, \*</sup>, S. A. Petrosyan<sup>a</sup>, S. A. Tsysar<sup>a</sup>, P. B. Rosnitsky<sup>a</sup>, O. A. Sapozhnikov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: da.nikolaev@physics.msu.ru

A method for creating the required distribution of an ultrasound field in the megahertz frequency range in a liquid by combining a system of two profiled solid-state plates (phase masks) located in front of a single-element piezoelectric transducer has been studied. The possibility of creating phase masks to control the spatial distribution of the acoustic field by changing the radiation frequency has been investigated.