

УДК 534.06.15

## КОЛЛИМАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУМЕРНЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ С НУЛЕВЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

© 2020 г. В. И. Голованов<sup>а</sup>, К. Ф. Шипилов<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

\*e-mail: kfship@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

После доработки 04.09.2019 г.

Принята к публикации 05.09.19 г.

Приведены результаты экспериментального исследования формирования акустического излучения периодическими структурами с нулевым показателем преломления. Частотные зависимости показателей преломления структур в акустическом диапазоне частот построены на основании ранее полученных данных в СВЧ диапазоне. Измерения показали, что в частотной области, где показатель преломления структуры меняет знак, генерируется плоская волна, нормальная к поверхности структуры, акустическое излучение которой концентрируется и обладает узкой диаграммой направленности. Отмечены направления исследований, где такие структуры могут найти приложения.

*Ключевые слова:* двумерная периодическая структура, нулевой показатель преломления, спиральные катушки, фононный кристалл, плоский волновой фронт

DOI: 10.31857/S0320791920010050

Пятьдесят лет тому назад В.Г. Веселаго [1] проанализировал особенности поведения необычных сред, обладающих одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей и отрицательным показателем преломления, и показал, что для таких сред характерна необычная реализация ряда явлений электродинамики и оптики: закона Снеллиуса, эффектов Доплера и Черенкова, формул Френеля, принципа Ферма и других.

Появление новых научных представлений, полученных в исследованиях физики фотонных кристаллов и метаматериалов с отрицательным и нулевым эффективными показателями преломления, вызывает необходимость решения конкретных научных проблем. В работе [2] рассмотрена возможность существования в акустике сред, аналогичных по ряду эффектов электродинамическим левым средам. Показано, что механическими аналогами отрицательных диэлектрической и магнитной проницаемостей являются плотность и сжимаемость среды. Использование уникальных свойств периодических структур с нулевым значением эффективного показателя преломления позволит формировать излучение с большой длиной волны и нулевым значением набега фазы на активной длине структуры, управлять пространственным распределением и расхо-

димостью акустического излучения, а также найти пути формирования так называемых экранирующих плащей-невидимок.

В материале с нулевым показателем преломления волна “раздвигается” настолько, что по всей своей длине в каждый момент времени обладает одним и тем же значением фазы. Волна осциллирует только во времени, но не в пространстве.

Последние несколько лет активно исследуются особенности поведения акустических метаматериалов с почти нулевым показателем преломления [3–6]. Так, в [3] сообщено о первой экспериментальной реализации согласования акустических импедансов с помощью метаматериала с дважды нулевым показателем преломления в частотном диапазоне конуса Дирака в центре зоны Бриллюэна. Это осуществлено в двумерном волноводе из метаматериала, который образован периодической структурой цилиндрических воздушных каналов. Изменяя высоту и диаметр воздушных каналов, можно управлять акустической дисперсией волноводной моды первого порядка. В работе [4] исследовано прохождение акустической волны через волновод из материала с нулевым показателем преломления, в котором имеется дефект среды. Экспериментально показано, что полную передачу и полное отражение акустического сигнала можно осуществить, меняя параметры введенного де-

фекта. В работе [5] теоретически исследовано пропускание волноводной структуры с нулевым показателем преломления, в которую введен прямоугольный дефект. Показано, что, вводя соответствующий прямоугольный дефект, можно добиться полного пропускания или отражения данной структурой. Кроме того, проведено компьютерное моделирование пропускания лабиринтоподобного метаматериала, плотность эффективной массы и эффективная сжимаемость которого одновременно близки к нулевому значению. Показано, что с помощью соответствующего прямоугольного дефекта можно изменять коэффициент пропускания такой структуры от 0 до 1. В работе [6] показано, что с помощью метаматериала с почти нулевым модулем всестороннего сжатия можно осуществить суперсвязь между рассогласованными акустическими каналами. Предложенный авторами метаматериал образован периодической структурой из микрорезонаторов Гельмгольца внутри узкого канала. Теоретические и экспериментальные исследования продемонстрировали, что этот метаматериал может обеспечить максимальное пропускание даже при сильном геометрическом рассогласовании звуковых каналов, а также значительную концентрацию энергии в узком канале на некоторых частотах. Показано, что механизм согласования импедансов обусловлен нулевым модулем всестороннего сжатия, а также резонансом Фабри–Перо.

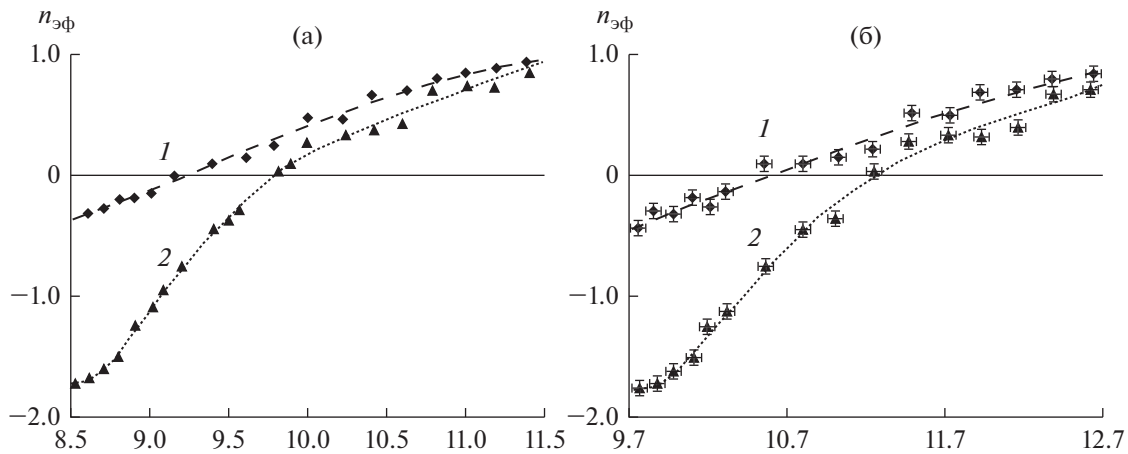
В последнее время активно исследуются особенности поведения и возможные практические приложения сплошных сред с близким к нулю значением диэлектрической проницаемости и, как следствие, с близким к нулю показателем преломления в электромагнитном диапазоне. Мы исследовали в этом диапазоне дискретные периодические структуры. Для них можно ввести эффективный показатель преломления, который позволяет описать поведение излучения, распространяющегося в периодической среде как в кристалле, характеристические параметры которого (постоянная кристаллической решетки, размеры элементов решетки) сравнимы с длиной волны излучения. Волновые свойства периодических структур обычно исследуются только для одного типа волн и соответствующего диапазона частот — электромагнитном или акустическом. Но одна и та же структура, при выполнении некоторых условий на параметры структуры и возбуждающее излучение, может, как показали наши исследования [7, 8], успешно работать в обоих диапазонах. В настоящей работе мы провели исследование двух периодических структур, специально разработанных для электромагнитного диапазона, и в акустическом диапазоне.

Одна периодическая 2D структура была образована из цилиндрических спиральных катушек (соленоидов), имеющих 30 витков из медной про-

волоки диаметром 2.5 мм. Внешний диаметр катушек — 20 мм, шаг намотки — 5 мм, высота — 150 мм. Катушки закручены в одну сторону, закреплены соосно и образуют в поперечном сечении двуремную треугольную периодическую структуру класса  $p_3$  — кристалл в виде плоскопараллельной пластины с внешними размерами  $90 \times 170 \times 150$  мм. Постоянная треугольной структуры здесь  $a = 30$  мм. Измерения частотной зависимости [8] эффективного показателя преломления в СВЧ-диапазоне от 8.5 до 12 ГГц проведены с помощью двухлучевого гибридного интерферометра по двум направлениям  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$ . Они показали, что при частоте излучения  $\sim 9.3$  ГГц для направления  $[\bar{1}\bar{1}0]$  и  $\sim 9.8$  ГГц для направления  $[110]$  эффективный показатель преломления периодической структуры меняет знак и при меньших значениях частоты излучения становится отрицательным, рис. 1а. Проведенные измерения показали, что в этом диапазоне частот, когда средняя длина волны излучения ( $\lambda = 3$  см) много больше шага намотки катушек и диаметра медной проволоки, а медь имеет малую глубину скин-слоя, цилиндрические спиральные катушки работают как медные цилиндры с высоким коэффициентом отражения.

Проведено исследование формирования излучения периодической структурой, образованной катушками, в той области частот, где значение эффективного показателя преломления приближается к нулю. Если эффективный показатель преломления периодической структуры достаточно мал, то, согласно закону преломления Снеллиуса, поле излучения от структуры будет сосредотачиваться вокруг направления, перпендикулярного к ее границе. Следовательно, будет генерироваться плоская волна, нормальная к поверхности структуры. Действительно,  $\sin\varphi/\sin\psi = n_2/n_1$ , где  $\varphi$  — угол падения волны из среды,  $\psi$  — угол преломления,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления среды и воздуха. В качестве источника излучения использован полуволновый вибратор, помещенный в середину структуры, между катушками. Выходящее из структуры излучение с частотой 9.45 ГГц, где эффективный показатель преломления структуры близок к нулевому значению ( $n_{эф} \approx 0.09$ ), концентрировалось в узкий лепесток с полной шириной диаграммы направленности  $\sim 9^\circ$  на половине интенсивности. С другой стороны, полная ширина диаграммы направленности излучения с частотой 9.0 ГГц ( $n_{эф} \approx -0.8$ ) составляла около  $50^\circ$  и излучения с частотой 10.2 ГГц ( $n_{эф} \approx 0.4$ ) — около  $30^\circ$  [8].

Несмотря на разную природу формирования электромагнитных и акустических волн, закономерности, которые определяют их распространение, имеют между собой много общего. Поэтому было проведено исследование этой же периодической структуры в акустическом диапазоне частот от 9.7 до 13.8 кГц. В этом диапазоне частот



**Рис. 1.** Частотные зависимости эффективного показателя преломления кристалла из спиралей: 1 – направление  $[\bar{1}\bar{1}0]$ , 2 – направление  $[110]$ ; (а) – в СВЧ диапазоне 8.5–11.5 ГГц; (б) – в акустическом диапазоне 9.7–12.7 кГц при  $T = 18^\circ\text{C}$ ,  $h = 85\%$ .

длина волны акустического излучения в воздухе изменяется от приблизительно 2.5 до 4 см, как и в случае электромагнитного излучения СВЧ диапазона. Здесь также средняя длина волны излучения ( $\lambda = 3$  см) много больше шага намотки катушек и диаметра медной проволоки, цилиндрические спиральные катушки работают как медные цилиндры с высоким характеристическим импедансом по сравнению с характеристическим импедансом окружающей их воздушной среды и коэффициент проникновения акустической волны в медные цилиндры менее чем  $10^{-5}$ . Поэтому эффективные граничные условия в обоих диапазонах будут аналогичны, и можно предположить, что как электромагнитная, так и акустическая волны будут распространяться в этой периодической структуре одинаковым образом в соответствии с общими волновыми законами. Следовательно, эффективный показатель преломления периодической структуры, измеренный в электромагнитном диапазоне, будет справедлив и для акустических волн с теми же длинами волн.

Проведено исследование формирования акустического излучения периодической структурой, образованной катушками, в той области частот, где значение эффективного показателя преломления приближается к нулю. Эти экспериментальные измерения мы проводили в осенний период, когда существенно изменялись температура  $T$ , влажность  $h$  и давление воздуха в лабораторном помещении. Данное обстоятельство требует учета немонотонности, характерной для зависимости скорости звука в воздухе от его температуры и влажности. Для оценки скорости звука во влажном воздухе при разных температурах и давлениях были использованы данные из работ [9, 10]. С учетом этих оценок были пересчитаны и пере-

несены в акустический диапазон частотные зависимости эффективного показателя преломления периодической структуры в двух направлениях  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$ , измеренные в микроволновом диапазоне. При частоте акустического излучения  $\sim 10.5$  кГц для направления  $[\bar{1}\bar{1}0]$  и  $\sim 11.2$  кГц для направления  $[110]$  эффективный показатель преломления меняет знак, рис. 1б.

Вблизи этих частот, где значение эффективного показателя преломления приближается к нулю, проведено исследование формирования излучения периодической структурой, образованной катушками. Для измерения диаграммы направленности излучения, выходящего из кристалла в направлении  $[\bar{1}\bar{1}0]$ , излучатель (низкопрофильный компактный динамик 28cR08FB) помещали внутри 2D кристалла, а приемник излучения (конденсаторный электретный односторонне направленный микрофон МКЭ-9) устанавливали в дальней зоне на расстоянии 250 см от образца. Сигнал с приемника излучения подавали на усилитель Selective Nanovoltmeter type 237 Unipan. На рис. 2а представлены диаграммы направленности излучения с частотой 10.4 кГц ( $n_{эф} \leq 0.1$ ), с частотой 11.5 кГц ( $n_{эф} \approx 0.5$ ) и с частотой 9.5 кГц ( $n_{эф} \approx -0.3$ ). Как можно видеть, излучение концентрировалось в узкий лепесток с полной шириной диаграммы направленности  $\sim 10^\circ$  на половине интенсивности. Проведено также измерение диаграммы направленности излучения, выходящего из кристалла в направлении  $[110]$ , но теперь излучатель располагали снаружи кристалла. Излучение с частотой 11.3 кГц, где эффективный показатель преломления структуры близок к нулевому значению ( $n_{эф} \leq 0.1$ ), концентрировалось в узкий лепесток с полной шириной диаграммы направленности  $\sim 10^\circ$  на половине интенсивности, рис. 2б.

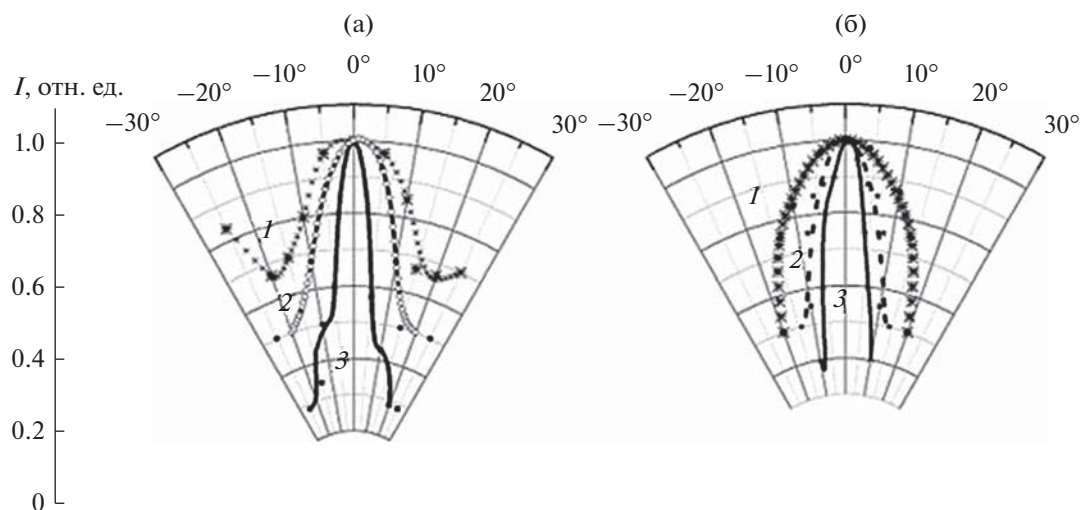


Рис. 2. Диаграмма направленности акустического излучения кристалла из спиралей: (а) — направление  $[1\bar{1}0]$ : 1 — 11.5, 2 — 9.5, 3 — 10.4 кГц; (б) — направление  $[110]$ : 1 — 12, 2 — 10, 3 — 11.3 кГц

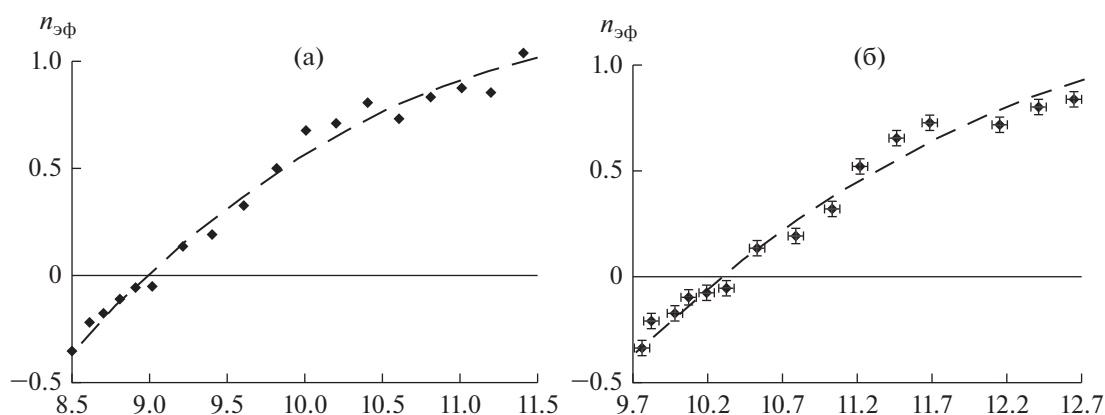


Рис. 3. Частотные зависимости эффективного показателя преломления кристалла из цилиндров в направлении  $[110]$ : (а) — в СВЧ диапазоне 8.5–11.5 ГГц, (б) — в акустическом диапазоне 9.7–12.7 кГц при  $T = 19^\circ\text{C}$ ,  $h = 90\%$ .

Представлялось чрезвычайно важным обеспечить минимальные потери звука в периодической структуре. Это условие легко выполнимо для воздуха при длине волны  $\lambda \sim 3$  см, когда длина затухания волны составляет  $\sim 250$  м. Потери в стальных стержнях также невелики, тем более что коэффициент отражения от них чрезвычайно близок к единице из-за огромной разницы акустического импеданса стали и воздуха. Поэтому другая двумерная периодическая структура была образована стальными цилиндрическими стержнями диаметром 16 мм и длиной 220 мм. Она имела треугольную периодическую структуру класса  $p_3$ , с постоянной  $a = 30$  мм. Проведены измерения частотной зависимости эффективного показателя преломления этой структуры в направлении  $[110]$ , рис. 3а. Затем эти данные были пересчитаны по описанной выше методике в акустический

диапазон и представлены на рис. 3б. Проведены измерения диаграммы направленности точечного источника излучения, формируемого 2D структурой в области частот, где эффективный показатель преломления близок к нулевому значению. Результаты измерений представлены на рис. 4. Как видно, и в этом случае излучение с частотой 10.3 кГц концентрировалось в узкий лепесток с полной шириной диаграммы направленности  $\sim 12^\circ$  на половине интенсивности.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы в дальнейшем для теоретического рассмотрения, описания и сопоставления волновых процессов взаимодействия обоих видов излучения с подобными периодическими структурами и формирования с их помощью полей излучений с необходимой диаграммой направленности.

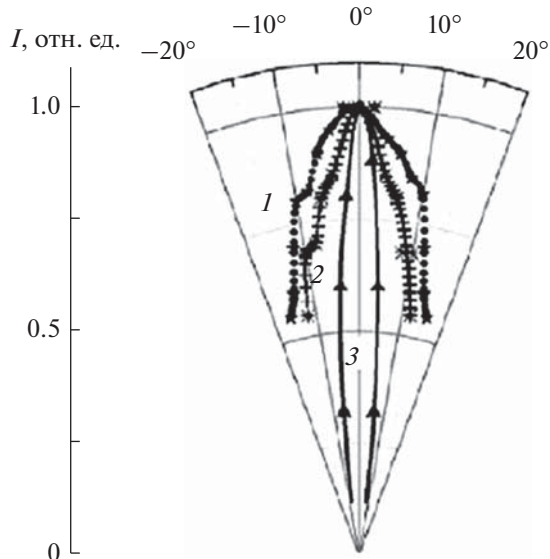


Рис. 4. Диаграмма направленности акустического излучения кристалла из цилиндров в направлении [110]: 1 – 11.7, 2 – 10, 3 – 10.3 кГц.

Таким образом, структура с нулевым эффективным показателем преломления позволяет управлять пространственным распределением и расходимостью акустического излучения, проходящего через структуру. Несомненно, что эта особенность структуры – формирование полей излучения с плоским волновым фронтом – может найти разнообразные применения, например, в методе радиоакустического дистанционного зондирования атмосферы в акустическом диапазоне частот [11]. Метод основан на зависимости скорости распространения звука от температуры, давления, влажности и скорости движения среды. Для определения скорости звука используется явление частичного отражения радиоволн от движущейся в атмосфере пространственной решетки неоднородностей плотности воздуха, создаваемой относительно мощным источником звука. Путем доплеровской радиолокации цуга акустических волн можно дистанционно, с поверхности Земли, измерить вертикальные профили таких метеорологических параметров, как температура, влажность воздуха и скорость ветра. Другое возможное приложение структура может найти в методе резонансного распределенного отражения пучка электромагнитного излучения от прошедшего через границу раздела вода–воздух акустического пучка [12]. Здесь тоже существенное влияние на эффективность регистрации имеет кривизна волнового профиля акустического излучения.

В дальнейшем мы предполагаем исследовать нелинейные взаимодействия в периодических структурах с нулевым показателем преломления, помещенных в жидкие среды.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Оптические и акустические методы исследования многофазных конденсированных сред и воздействия на их структуру” (номер государственной регистрации АААА-А18-118021390190-1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физ. наук. 1967. Т. 92. Вып. 3. С. 517–526.
2. *Буров В.А., Дмитриев К.В., Сергеев С.Н.* Акустические “дважды отрицательные” среды // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 292 – 306.
3. *Wei Zh., Yuting Y., Zhi T., Zhi H.H.* Tunable transmission and deterministic interface states in double-zero-index acoustic metamaterials // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24773-6>
4. *Wang Z., Yang F., Liu L.B., Kang M., Liu F.* Total transmission and total reflection of acoustic wave by zero index metamaterials loaded with general solid defects // J. Applied Physics. 2013. V. 114(19). P. 2–12.
5. *Ji W.-Q., Wei Q., Zhu X.-F.* Manipulation of acoustic transmission by zero-index metamaterial with rectangular defect // J. Applied Physics. 2017. V. 122(21). P. 215103–215133. <https://doi.org/10.1063/1.4997801>
6. *Zhang X., He Z., Wang G.* Extraordinary sound transmission through geometrical mismatched channels based on near zero bulk modulus and Fabry–Pérot resonance // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. V. 52. 055301 (7pp).
7. *Виноградов Е.А., Бабинцев В.А., Веселаго В.Г., Голованов В.И., Шипилов К.Ф.* // О сверхразрешении плоских линз на основе фононных и фотонных кристаллов // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2011. № 8. С. 3–10.
8. *Golovanov V.I., Martynov A.P., Shipilov K.F.* // 2D periodic structure for acoustic and electromagnetic radiation // Phys. Wave Phenomena. 2018. V. 26. № 4. P. 323–326.
9. Handbook of the speed of sound in real gases. V.3. Speed of sound in air. Ed. by *Zuckerwar A.J.* San Diego, USA: Academic Press, 2002. 290 p.
10. *Shipilov K.F.* Calculation of humidity dependence on speed of sound in air using Kramers–Kronig relations // Phys. Wave Phenomena. 2004. V. 12. № 4. P. 228–232.
11. *Калистратова М.М., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 222 с.
12. *Ассман В.А., Бункин Ф.В., Виноградов Е.А., Голованов В.И., Ляхов Г.А., Суязов Н.В., Шипилов К.Ф.* Распределенное отражение электромагнитного излучения от бегущей акустической решетки в двухслойной среде // ЖТФ. 1991. Т. 15. № 5. С. 72–76.