

УДК 534.213, 519.688

© 2020 г. **В.И. Римлянд**, д-р техн. наук,

К.А. Драчев, канд. техн. наук,

Р.М. Хаит

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск),

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ДИОДА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методами численного моделирования проведено исследование амплитудно-частотных характеристик модели акустического диода в диапазоне частот 4-15 кГц. Моделирование производилось методом конечных элементов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, акустика, моделирование, акустический диод.

DOI: 10.22250/isu.2020.63.17-23

Введение

В последнее десятилетие в акустике сформировалось новое направление, связанное с разработкой и применением акустических метаматериалов. Значительное количество научных статей, обзоров посвящено поглощению звука [1, 2], разработке искусственных сред с отрицательным показателем преломления, созданию так называемых суперлинз [3, 4] и ряду других тем [5, 6].

В работе [7] рассматривается так называемый акустический диод (АД) – устройство, которое пропускает звук только в одном направлении. Авторы статьи подробно описывают принцип работы, предлагаемую конструкцию и конкретные геометрические параметры устройства. Предложенная в данной статье конструкция состоит из двух одинаковых частей, образующих воздушный звукопровод (рис. 1). При этом каждая из частей имеет внутреннюю поверхность, состоящую из двух гребенок с различной высотой и выступов. Промежутки и ширина выступов также различны.

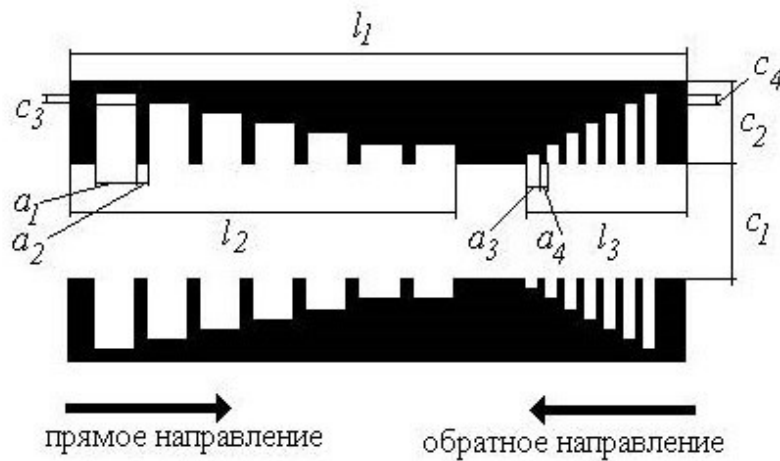


Рис. 1. Конструкция акустического диода.

В работе [7] приводятся результаты численного моделирования распространения звука сквозь двухмерный вариант данного устройства, а также результаты эксперимента на реальной конструкции акустического диода, изготовленной с помощью 3D принтера. Расчет конструкции проводился для частоты $f = 6\,064$ Гц. Результаты моделирования и эксперимента приведены в диапазоне f от $5\,467$ до $6\,670$ Гц для плоского волнового фронта. Из данных, представленных в работе, можно сделать два вывода.

Первый – на частоте $6\,064$ Гц отношение амплитуд волны в прямом направлении и в обратном направлении ($A_{np}/A_{обр}$) равно примерно двум. При этом результаты моделирования и эксперимента достаточно хорошо совпадают.

Второй вывод – амплитуда в прямом направлении на частоте $6\,064$ Гц примерно на 40% меньше, чем на близких частотах, а в обратном направлении – на 90%, т.е. конструкция работает как узкополосный фильтр.

Целью данной работы является исследование методами численного моделирования амплитудно-частотных характеристик предложенной в работе модели [7] в более широком диапазоне частот, а также влияния формы волнового фронта на амплитуду прошедшей волны.

Моделирование производилось методом конечных элементов. Для расчета использовались уравнения:

Гельмгольца

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p_t \right) = Q_m, \quad (1)$$

$$p_t = p + p_0,$$

где ρ – плотность среды; c – скорость звука в среде; p – акустическое давление, обусловленные распространяющейся волной; p_t – абсолютное давление; p_0 – начальное значение давления; Q_m – внешняя сила;

движения упругого тела

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \nabla \vec{\sigma} + \vec{F}, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды, u – поле смещения частиц среды, σ – вектор напряжений, F – внешняя сила.

Граничные условия на границах областей выражались в виде баланса сил, действующих с двух сторон границы. Нормальное напряжение на границе равно давлению в воздухе, взятому с обратным знаком; касательные напряжения равны нулю; нормальные скорости твердого тела и воздуха на границе равны между собой.

Для проверки правильности работы используемых алгоритмов было проведено моделирование распространения акустических волн для нескольких простых моделей. На рис. 2 показан результат моделирования прохождения акустического фронта, созданного сферическим источником 1, в воздушной среде, сквозь щель 3 шириной 4 см в алюминиевом препятствии 2 толщиной 1 см. Построение сделано для момента времени 90 мс. Анализ результата позволяет сделать вывод о совпадении результата моделирования с реальным процессом: наблюдаются процессы интерференции как отраженных, так и прошедших сквозь щель волн.

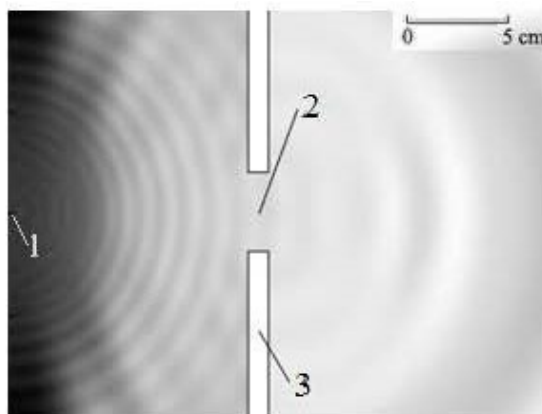


Рис. 2. Моделирование распространения звуковой волны сквозь щель (1 – источник, 2 – щель, 3 – препятствие).

Моделирование акустического диода

Как указано выше, при моделировании акустического диода была использована конструкция, предложенная в работе [7]. Расчет геометрических размеров был сделан на основе формул в статьях [7] и [8]. Геометрические параметры модели АД (рис.1): $l_1 = 377,6$ мм, $l_2 = 250$ мм, $l_3 = 89,2$ мм, $a_1 = 23,6$ мм, $a_2 = 4,7$ мм, $a_3 = 8,4$ мм, $a_4 = 1,7$ мм, $c_1 = 100$ мм, $c_2 = 70$ мм, $c_3 = 8,49$ мм, $c_4 = 8,48$ мм. Геометрическая модель акустического диода для расчета

построена с использованием инструментов системы автоматизированного проектирования AutoCAD. Данный программный продукт позволил точно и быстро корректировать геометрические параметры модели, а также с большой точностью формировать модель для численного расчета.

Результат моделирования – построение амплитуды волны как функции времени для различных частот, возбуждаемых виртуальным излучателем. Виртуальный излучатель представлял собой плоский излучатель размером 150 мм и размещался с различных сторон от АД.

Зависимость амплитуды от времени «измерялась» виртуальным приемником, располагаемым с противоположной стороны от АД по отношению к излучателю. На рис. 3а приведено положение излучателя 2 и приемника 3 для прямого положения прохождения сигнала сквозь АД 1. Обратному направлению соответствует разворот АД на 180 градусов.

При выполнении численного моделирования параметры сетки в методе конечных элементов выбирались таким образом, чтобы узлы попадали на границу раздела сред. Использовалась неструктурная сетка из треугольников, размеры соседних элементов различались по своим размерам – на границе раздела сред, а также внутри диода плотность сетки возрастает. Линейные размеры ячеек сетки в расчетах составляли диапазон от 0,023 до 11,5 мм. Требования к треугольникам только два – они должны покрывать полностью всю грань и быть по форме близкими к равносторонним треугольникам. К тому же необходимо учесть, что в МКЭ не может быть независимой сетки для каждого исследуемого объекта, тем более, если объекты соприкасаются и образуют границу раздела сред. Узлы, получаемые на такой границе, должны относиться к обоим объектам. На рис. 3б приведен примерный вид расчетной сетки с АД.

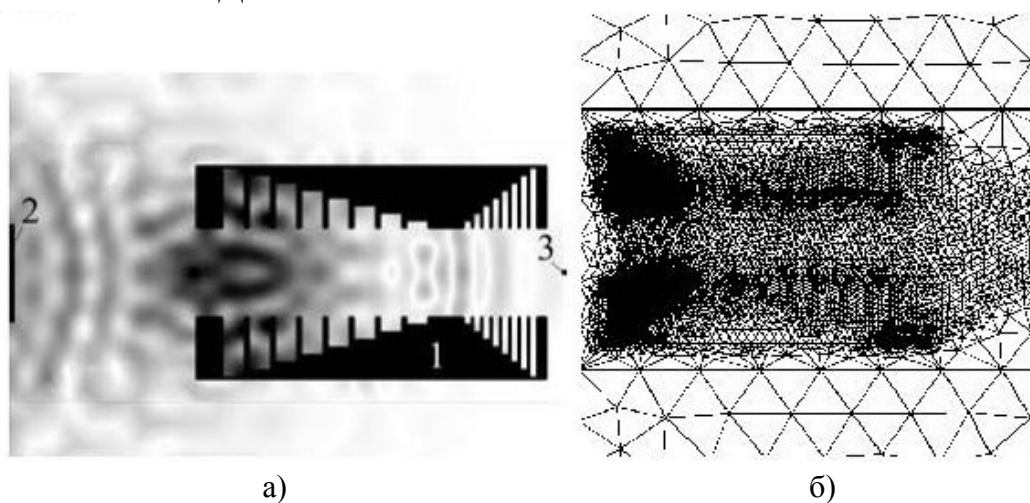


Рис.3. Моделирование распространения звуковой волны сквозь акустический диод (1 – акустический диод, 2 – плоский источник, 3 – приемник).

Основные результаты

На рис. 4 показаны рассчитанные «осциллограммы» сигналов с излучателя и приемника для прямого (сплошная линия) и обратного (пунктир) направлений распространения плоского акустического фронта для частот 6,5 кГц и 4 кГц. Частота 6,5 кГц соответствует максимальной эффективности работы АД, при 4 кГц амплитуды сигнала в прямом и обратном направлении примерно одинаковы.

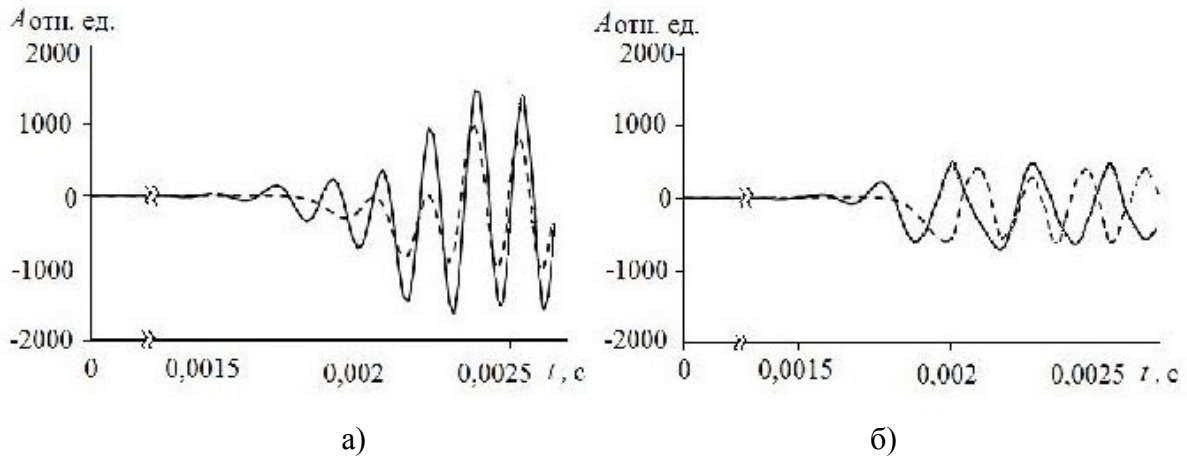


Рис. 4. Рассчитанные осциллограммы сигналов для прямого и обратного направлений на частоте возбуждающего сигнала: а) $f = 6,5$ кГц; б) $f = 4$ кГц.

Как видно из рисунка, амплитуда сигнала нарастает до максимальных слабо меняющихся значений примерно за три периода. Это связано со спецификой метода конечных элементов при расчете зависимостей от времени. Эффективность АД оценивалась как среднее значение отношений амплитуд, равное

$$\frac{A_{обр.}}{A_{пр.}} = \frac{1}{3} \sum_{i=3}^5 \frac{A_{обр.i}}{A_{пр.i}}. \quad (3)$$

где i – номер периода и изменяется от 3 до 5, $A_{пр.i}$ – амплитуда соответствующего периода в прямом направлении, $A_{обр.i}$ – в обратном направлении. Таким образом, величина $A_{обр.}/A_{пр.}$ равна среднему значению соответствующих отношений для трех периодов, когда «сигнал» является достаточно установившемся.

Рассчитанные по осциллограммам значения $A_{обр.}/A_{пр.}$ для частоты f от 4 кГц до 16 кГц приведены на рис. 5. Как видно из рисунка отношение $A_{обр.}/A_{пр.}$ достигает минимального значения при $f = 6,5$ кГц ($A_{обр.}/A_{пр.} = 0,49$), что соответствует данным статьи [7]. Из представленных данных следует, что наиболее эффективно АД работает на частоте 6,5 кГц, т.е. на частоте, для которой была рассчитана его геометрия. На частоте 11 кГц наблюдается второй минимум величины ($A_{обр.}/A_{пр.} = 0,56$), но эта частота не соответствует

второй гармонике – 13 кГц. Изменения в области частот от 13 до 16 кГц, видимо, связаны с погрешностью расчетов.

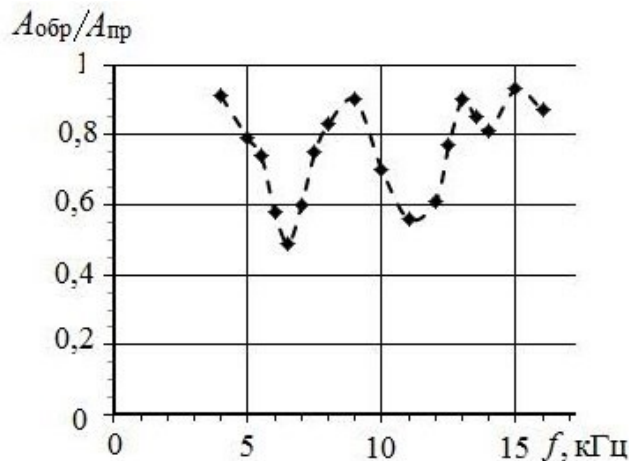


Рис. 5. Зависимость от частоты отношения амплитуды волны в прямом и обратном направлении.

Дополнительно было проведено численное моделирование для сферического фронта волны (рис. 6) для частот 5; 5,5; 6; 6,5 и 7 кГц. Рассматривался предельный случай – точечный излучатель располагался на оси АД, на его условном входе или выходе (черная точка на рис. 6).

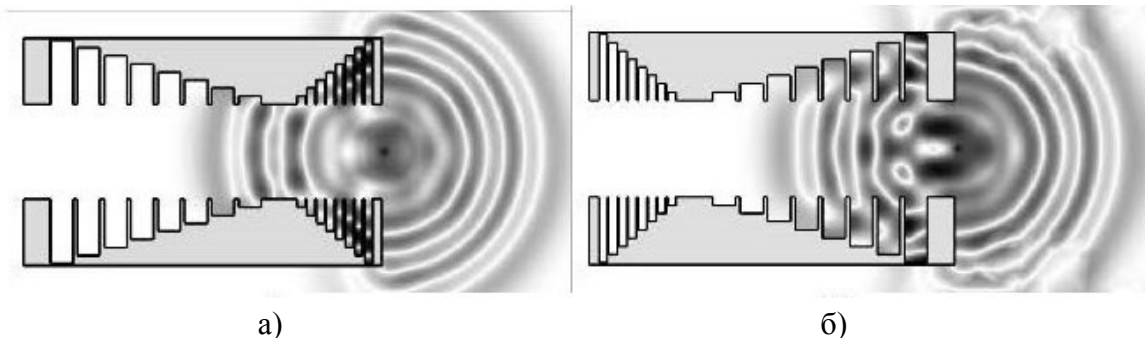


Рис. 6. Результаты моделирования для сферического излучателя а – прямое направление, б – обратное, $f = 6$ кГц.

Для всех частот значения $A_{обр}/A_{пр}$ находятся в интервале 0,8-0,74, т.е. во-первых, отсутствовал минимум на частоте 6,5 кГц, во-вторых, рассматриваемая конструкция АД в данном интервале частот показывает низкую эффективность для сферического фронта волны.

Как видно из рис. 6, на начальном этапе при прямом распространении волны гребенка с маленьким шагом не оказывает существенного влияния на сферический фронт волны. При обратном распространении гребенка с большим шагом (сравнимым с длиной волны) существенно изменяет волновой фронт и его амплитуду. Это приводит к тому, что для всего рассматриваемого диапазона частот отношение $A_{обр}/A_{пр} < 1$. Сравнивая этот результат вместе с результатами моделирования для плоского волнового фронта, можно сде-

лать вывод, что при отклонении волнового фронта от плоского и изменения угла падения от нуля эффективность АД будет уменьшаться.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что рассматриваемая модель акустического диода работает эффективно только в достаточно узком диапазоне частот и при условии плоского волнового фронта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Martin Maldovan* Sound and heat revolutions in phononics // *Nature*. – 2013. – Vol. 503. – P. 209-217.
2. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М.* Поглощение звука и метаматериалы (обзор) // *Акустический журнал*. – 2018. – Т. 64, № 5. – С. 517–525.
3. *Shu Zhang* Acoustic metamaterial design and applications: dissertation doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. – Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
4. *Chen Meng, Jiang Heng, Zhang, Han, Li Dongsheng, Wang, Yuren* Design of an acoustic superlens using single-phase metamaterials with a star-shaped lattice structure // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8.
5. *Richard Craster, Sébastien Guenneau* Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking. –Springer, 2013.
6. *José Sánchez-Dehesa* Review on acoustic metamaterials. URL: https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/EVENTS/acoustic_workshop/ACT-PRE-0914-valencia-review_acoustic_metamaterial.pdf (дата обращения: 23.12.2019).
7. *Yi-Fan Zhu, Xin-Ye Zou, Bin Liang, Jian-Chun Cheng* Acoustic one-way open tunnel by using metasurface // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 107. – P. 113501-1 – 113501-4.
8. *Shulin Sun* Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves / *Shulin Sun, Qiong He, Shiyi Xiao [and all]* // *Nature Materials*. – 2012. – Vol. 11. – С. 426-431.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

E-mail:

Драчев Кирилл Александрович – kirill@pnu.edu.ru;

Римлянд Владимир Иосифович – rimpl@pnu.edu.ru;

Хаит Роман Михайлович – kirill@pnu.edu.ru.