

УДК: 534.83
OECD: 01.03.AA

Акустическая эффективность экрана с цилиндрической насадкой на верхней кромке

Мусаева Р.Н.¹, Комкин А.И.^{2*}

¹Аспирант, ²Д.т.н., профессор

^{1,2}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, РФ

Аннотация

На основе конечно-элементного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics исследованы акустические экраны с цилиндрической насадкой на верхней кромке экрана. Рассматривались насадки со звукопоглощающим материалом внутри нее и без него. Эффективность насадки оценивалась по разности уровней звукового давления в расчетной точке для экранов одинаковой высоты без насадки и с насадкой. Исследовалось влияние расстояния от источника звука до экрана, а также коэффициента перфорации поверхности насадки и плотности звукопоглощающего материала в насадке на акустическую эффективность экрана. Установлено, что звуковое поле в пространстве за экраном на некоторых режимах характеризуется сложной интерференционной картиной. Получены зависимости эффективности насадок в расчетной области от частоты и определены области максимальной и минимальной эффективности каждой из насадок в области за экраном.

Ключевые слова: экран, цилиндрическая насадка, звукопоглощающий материал, конечно-элементное моделирование, акустическая эффективность.

Acoustic efficiency of the screen with a cylindrical cap on the upper edge

Musaeva R.N.¹, Komkin A.I.^{2}*

¹PhD student, ²DSc, Professor

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

Acoustic screens with a cylindrical cap on the upper edge of the screen are studied on the basis of finite element modeling in the COMSOL Multiphysics software package. Caps with and without sound-absorbing material inside it were considered. The effectiveness of the cap was estimated by the difference in sound pressure levels at the design point for screens of the same height without a cap and with a cap. The influence of the distance from the sound source to the screen, as well as the perforation coefficient of the cap surface and the density of the sound-absorbing material in the cap on the acoustic efficiency of the screen was studied. It is established that the sound field in the space behind the screen in some modes is characterized by a complex interference pattern. The dependences of the efficiency of the caps in the calculated area on the frequency are obtained and the areas of maximum and minimum efficiency of each of the caps in the area behind the screen are determined.

Keywords: *screen, cylindrical cap, sound-absorbing material, finite element modeling, acoustic efficiency.*

Введение

Проблема акустического загрязнения окружающей среды относится к главным экологическим проблемам современной цивилизации. К основным источникам такого загрязнения среды обитания относится автотранспорт. Для того, чтобы уменьшить негативное воздействие автотранспортного шума на человека, разрабатываются и применяются различные средства защиты от шума. К таким средствам относятся акустические экраны, которые находят широкое применение для снижения шума в районах жилой застройки.

Был проведен значительный объем исследований экранов и их характеристик, в том числе и исследования по модификации верхней кромки экрана. Новые конструкции барьеров были впервые предложены Виртом [1], Мэем и Османом [2] и вызвали большое количество исследований, связанных с оценкой эффективности использования такого рода насадок. Обзор публикаций, связанных с развитием данного направления исследований приведен в [3-5]. Экспериментальные исследования влияния формы акустического экрана на его акустическую эффективность выполнены Аистовым [6].

Наряду с экспериментальными методами широкое применение получили и расчетные методы исследования экранов. Существует несколько теоретических методов оценки акустических характеристик экранов, основанных на теории дифракции, именно данные методы стали предметом обзора Ли и Вонга [7]; сами методы довольно сложны и приводят к громоздким формулам, неудобным для использования в инженерной практике. Поэтому для практических методов оценки эффективности экранов широко используется формула Маекавы и ее разновидности [8, 9]. Они справедливы для полубесконечного экрана и являются очень простыми и удобными для применения. В настоящее время численные методы становятся основным средством для анализа характеристик акустических экранов, так как они позволяют исследовать гораздо более сложные конфигурации экранов, чем аналитические методы [10, 11].

Так [12] на основе конечно-элементного моделирования исследовались акустические характеристики экрана со звукопоглощающей облицовки на передней поверхности экрана. Определена зависимость эффективности экрана от размера звукопоглощающего слоя.

В [13, 14] с помощью 2D модели, построенной в программе COMSOL Multiphysics, выявлены особенности снижения звука экранами с насадками различной конфигурации на их верхней кромке и проведен сравнительный анализ эффективности этих насадок. В [15] проведены обстоятельные исследования экрана Т-образного профиля. Выявлено, что дифракция звука на таком экране сочетается с процессами интерференции звука на передней и задней кромках экрана, что приводит к появлению локальных минимумов и максимумов звукового давления в расчетной области за экраном. При этом интерференция на задней кромке экрана оказывает существенное влияние на звуковое поле в области за экраном лишь в ближней зоне, при расстояниях менее 8 м от задней поверхности экрана, в то время как интерференция звука на передней кромке экрана является определяющей для уровней звукового давления в дальней зоне этой области.

Целью настоящей работы является выявление на основе численных расчетов в программном пакете COMSOL Multiphysics, как это было осуществлено ранее для Т-образного экрана, особенностей дифракции звука на экране с цилиндрической насадкой на верхней кромке и определение зависимости эффективности такого экрана от характеристик цилиндрической насадки.

1. Конечно-элементная модель экрана

При моделировании использовалась двумерная (2D) конечно-элементная модель экрана. Расчетная область ограничивалась окружностью радиусом 40 м (рис. 1). Граничные условия на окружности, ограничивающей расчетную область, соответствовали согласованной (безэховой) нагрузке с импедансом $Z = \rho c = 411,6 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}$, где ρ – плотность воздуха, а c – скорость звука в воздухе. В центре расчетной области находился точечный источник звука, который при 2D моделировании является по существу линейным источником, характеризуемым интенсивностью I ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Акустический экран (АЭ) с эффективной высотой $h = 5,5$ м располагался вертикально на расстоянии l от источника шума.

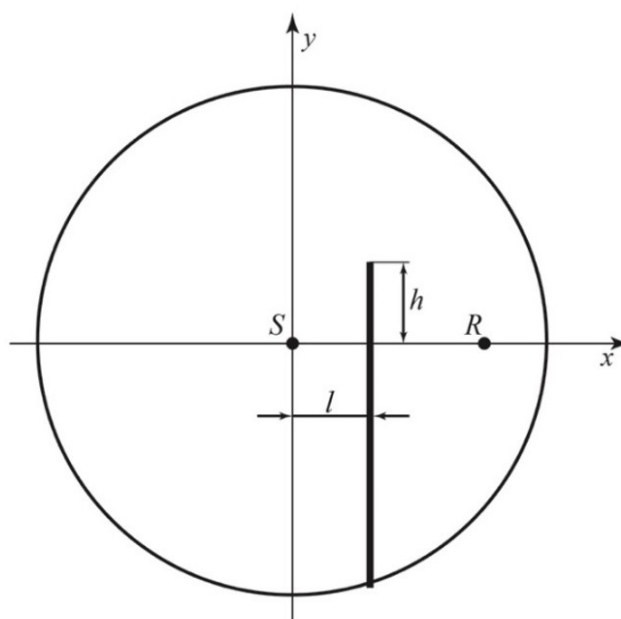


Рис. 1. Расположение экрана в расчетной области

В конечно-элементной модели использовалось неравномерное разбиение на тетраэдры. Вычисления проводились на частотах 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц и 1000 Гц, совпадающих с соответствующими среднегеометрическими частотами октавных полос частот. При этом для обеспечения приемлемой точности вычислений на длине волны, соответствующей наибольшей из этих частот, укладывалось четыре конечных элемента максимального размера.

При моделировании рассматривались три конфигурации экрана, представленные на рис. 2. При этом цилиндрические насадки рассматривались как со звукопоглощающим материалом (ЗПМ) внутри них, так и без него. Экраны рассматривались тонкими и абсолютно жесткими. Кроме того, для упрощения последующего анализа наличие подстилающей поверхности, на которую опирается экран, не учитывалось, т.е. экраны рассматривались полубесконечными. Экраны определялись эффективной высотой h , а также радиусом цилиндрической насадки r . Эффективность использования насадки на верхней кромке экрана оценивалась с помощью такого показателя как вносимые потери IL , которые определялись соотношением:

$$IL = L_I - L_H, \text{ дБ},$$

где L_I и L_H – уровни звукового давления в расчетной точке соответственно для экранов с насадкой и без насадки.

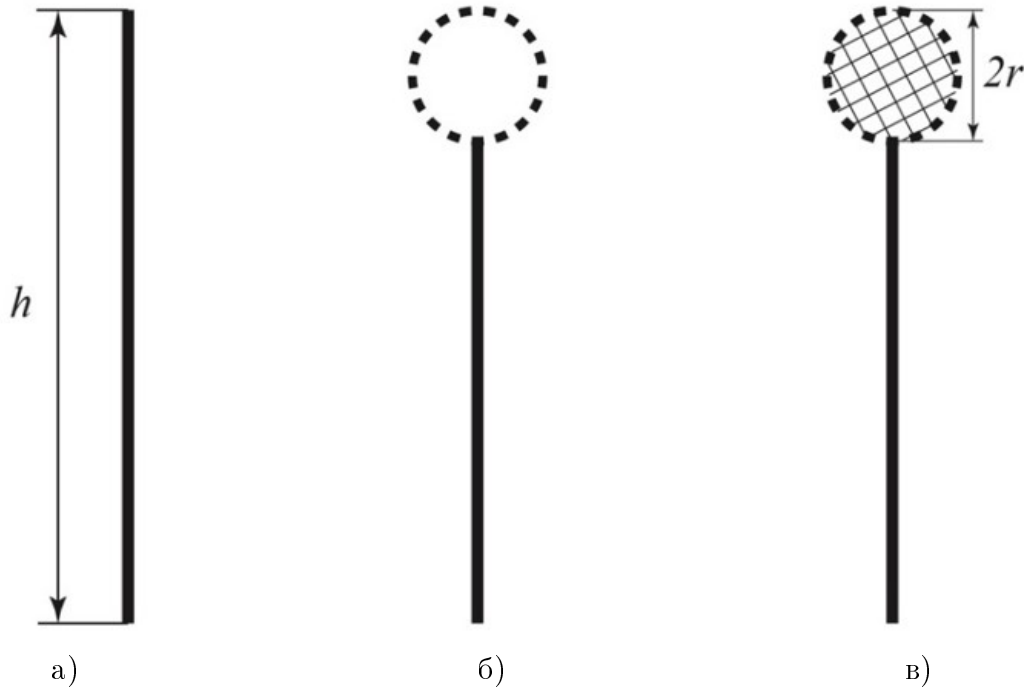


Рис. 2. Конфигурации акустических экранов: без насадки (а); с цилиндрической насадкой без ЗПМ (б); с цилиндрической насадкой с ЗПМ (в)

2. Эффективность цилиндрической насадки без ЗПМ

Была определена эффективность такой насадки в зависимости от положения расчетной точки R , располагающейся на горизонтальной оси x . Расчеты были проведены для трех значений пористости поверхности насадки σ , определяемой через отношение общей площади отверстий перфорации S_0 к общей площади поверхности насадки S : $\sigma = S_0/S$. При этом значение $\sigma = 0$ фактически соответствует предельному случаю гладкой поверхности насадки без перфорации. Результаты расчета на частоте 125 Гц (рис. 3) показали, что в случае неперфорированной поверхности насадки ее использование дает некоторый эффект, который мало зависит от положения расчетной точки и который может достигать 8 дБ. Возможно, такой эффект объясняется наличием поверхностных звуковых волн и их взаимодействием при распространении по поверхности насадки. При наличии перфорации эффективность насадки резко падает и даже принимает небольшие отрицательные значения. Такой результат, по-видимому, объясняется тем обстоятельством, что наличие перфорации ослабляет на этой низкой частоте звукоизоляцию верхней части экрана, так что звук частично проникает в расчетную точку через саму насадку и таким образом общее ослабление звука таким экраном оказывается ниже, чем у исходного экрана без насадки.

На рис. 4 представлены аналогичные результаты расчета для частоты 1000 Гц. В этом случае эффективность насадки с неперфорированной поверхностью существенно возрастает с уменьшением расстояния до экрана насадки. В этой области на расстоянии порядка 1 м от экрана имеет локальный максимум эффективности, где ее значение превышает 20 дБ. При пористости $\sigma = 0,1$ кривая эффективности имеет ярко выраженный локальный максимум на расстоянии порядка 4 м, на котором значение эффективности достигает значения 25 дБ, и второй меньшей амплитуды и более пологий на расстоянии порядка 11 м. При большей пористости ($\sigma = 0,3$) локальных максимумов уже не наблюдается, и кривая эффективности колеблется около нулевого значения.

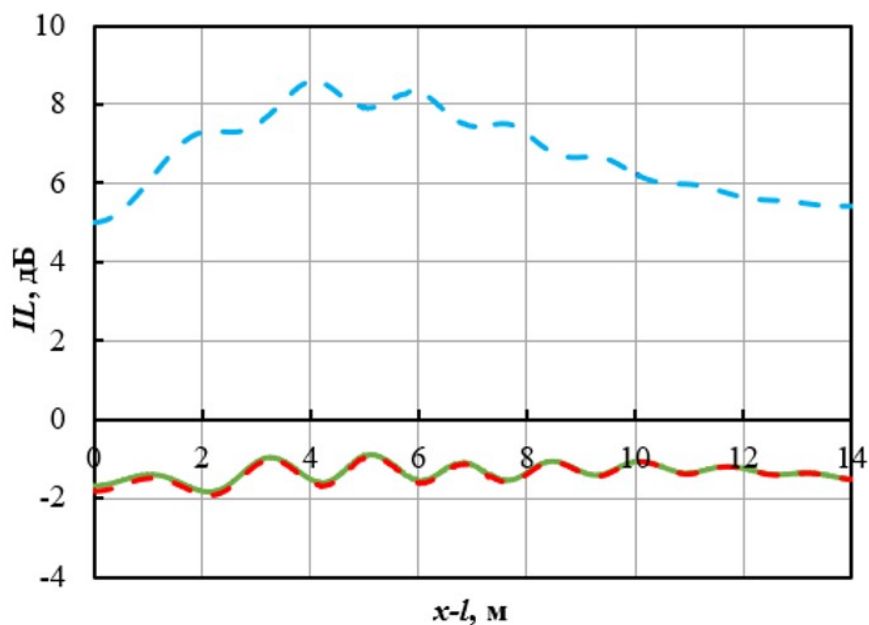


Рис. 3. Эффективность насадки без ЗПМ в зависимости от расстояния до экрана на частоте 125 Гц и $l = 6$ м при: $\sigma = 0$ (—); $\sigma = 0,1$ (—); $\sigma = 0,3$ (—)

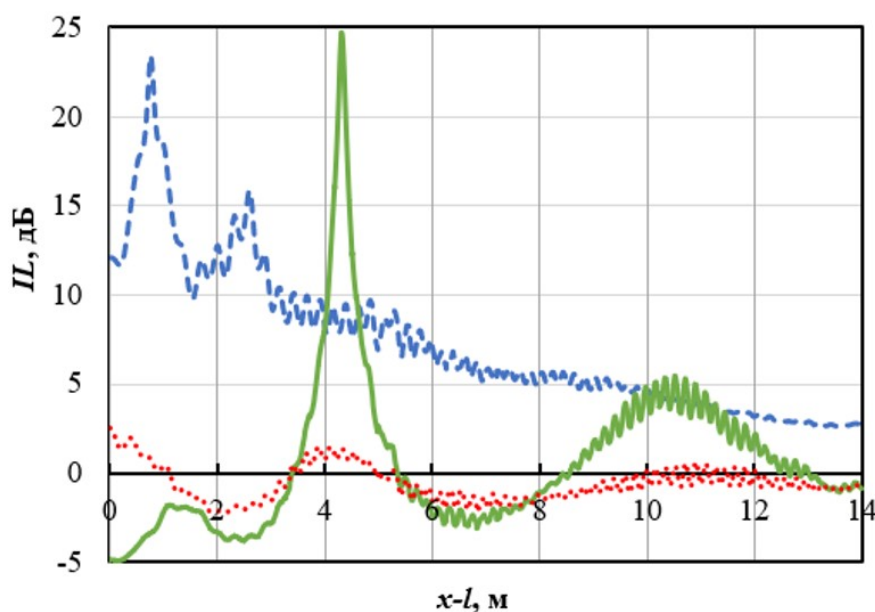


Рис. 4. Эффективность насадки без ЗПМ в зависимости от расстояния до экрана на частоте 1000 Гц и $l = 6$ м при: $\sigma = 0$ (—); $\sigma = 0,1$ (—); $\sigma = 0,3$ (•••)

На рис. 5 представлены результаты расчета с теми же исходными данными, что и на рис. 4, с той лишь разницей, что расстояния от источника звука увеличено до 8 м. Сравнение графиков на этих рисунках показывает, что изменение расстояния l от источника звука до экрана не изменяет положение локального максимума для насадки без перфорации, в отличие от насадки с пористостью $\sigma = 0,1$, где с увеличением l локальные пики эффективности существенно сдвигаются влево, ближе к экрану. Это говорит о том, что механизмы образования максимумов на этих двух насадках основаны на разных принципах.

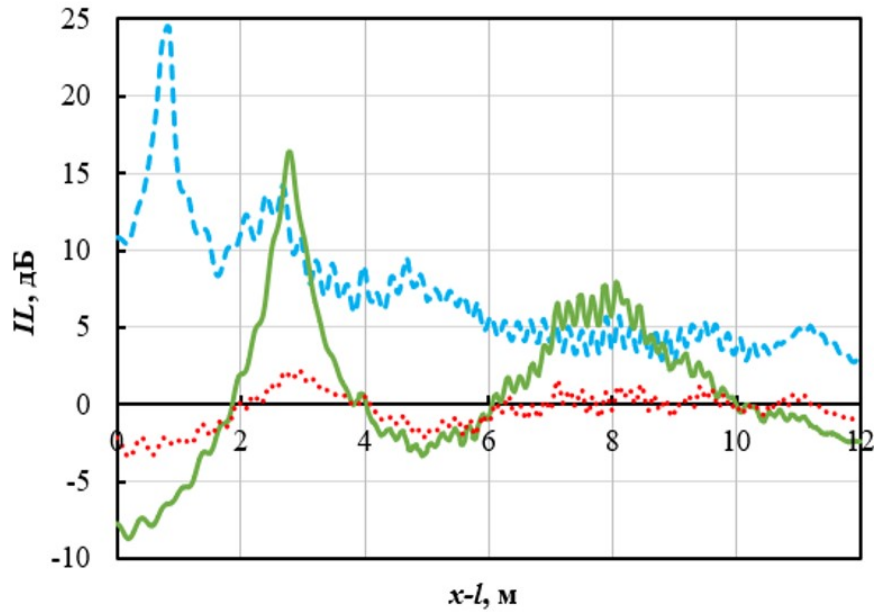


Рис. 5. Эффективность насадки без ЗПМ в зависимости от расстояния до экрана на частоте 1000 Гц и $l = 8$ м при: $\sigma = 0$ (— —); $\sigma = 0,1$ (—); $\sigma = 0,3$ (• • •)

3. Эффективность цилиндрической насадки с ЗПМ

Далее были проведены аналогичные расчеты для экрана с цилиндрической насадкой диаметром 0,5 м, заполненной звукопоглощающим материалом на основе базальтового волокна с плотностью 100 кг/м^3 . Были исследованы три пористости поверхности насадки, равные 0,1; 0,3 и 1. При этом пористость $\sigma = 1$ фактически соответствовала отсутствию какой-либо оболочки у такой насадки. Результаты для частоты 125 Гц представлены на рис. 6. В отличие от результатов для насадки без ЗПМ (рис. 3) насадки с ЗПМ на этой частоте дают положительный эффект для всех рассмотренных значений σ , а особенно для $\sigma = 1$, где эффективность насадки достигает 35 дБ. Стоит отметить, что такой эффект достигается на низкой частоте и в области, удаленной от экрана, где обычный экран имеет низкую акустическую эффективность.

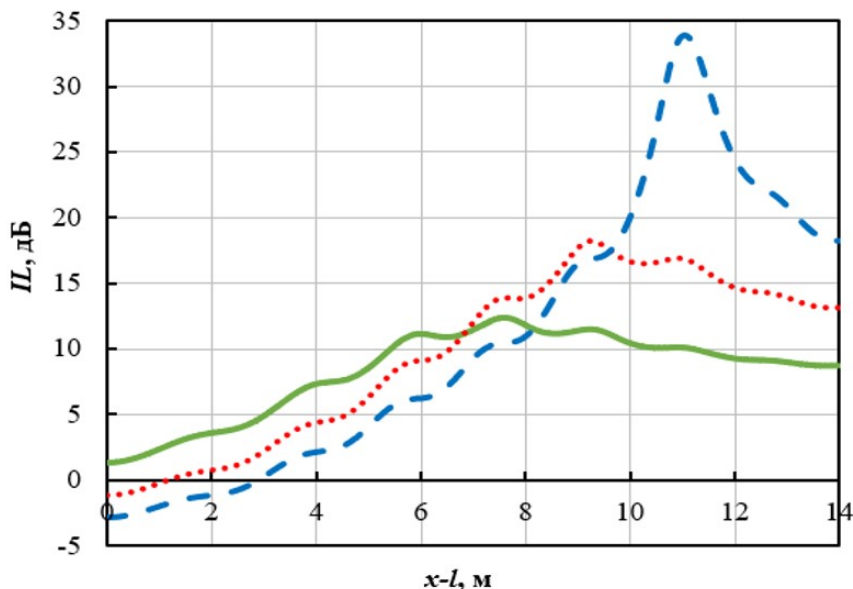


Рис. 6. Эффективность насадки с ЗПМ в зависимости от расстояния до экрана на частоте 125 Гц и $l = 6$ м при: $\sigma = 1$ (— —); $\sigma = 0,1$ (—); $\sigma = 0,3$ (• • •)

На рис. 7. представлены результаты расчета для частоты 1000 Гц. На графиках отчетливо прослеживаются три локальных максимума. Максимальное значение локального максимума достигает 25 дБ на расстоянии чуть больше 4 м, как для насадки без ЗПМ, и также соответствует $\sigma = 0,1$. Однако в данном случае количество локальных максимумов увеличилось до трех, и они имеют место при всех трех значениях пористости. Это является еще одним преимуществом использования цилиндрической насадки с ЗПМ.

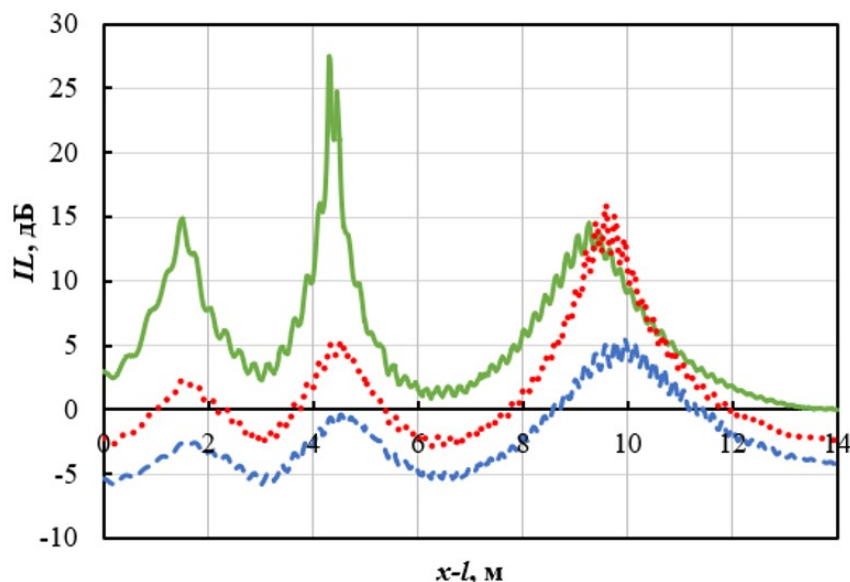


Рис. 7. Эффективность насадки с ЗПМ в зависимости от расстояния до экрана на частоте 100 Гц и $l = 6$ м при: $\sigma = 1$ (—); $\sigma = 0,1$ (—); $\sigma = 0,3$ (—)

На рис. 8 представлены картины распределения звукового давления в окрестности отверстия для цилиндрической насадки с ЗПМ. Темные узкие полосы в области за экраном обусловлены, очевидно, интерференцией звука в этой области. Их расположение определяет положение локальных максимумов эффективности на соответствующих графиках на рис. 6 и рис. 7. Вместе с тем, необходимо проведение дополнительных исследований для лучшего понимания механизмов интерференционных процессов такого рода.

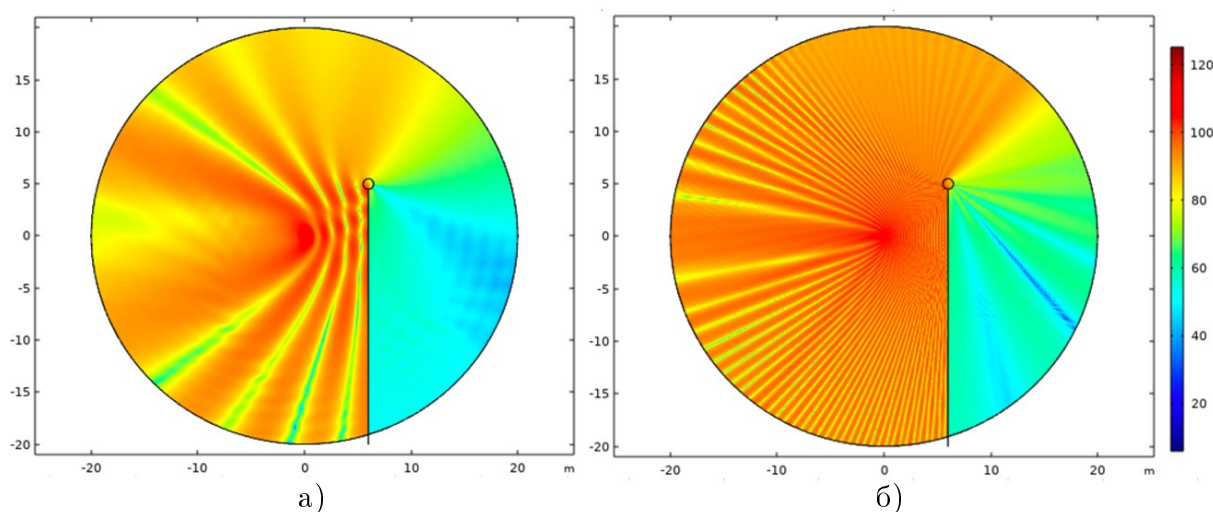


Рис. 8. Картины распределения звукового давления в расчетной области для насадки с пористостью $\sigma = 0,1$ на частоте 125 Гц (а) и 1000 Гц (б)

Заключение

На основе численного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics выявлены особенности снижения звука акустическими экранами с цилиндрической насадкой на их верхней кромке. Определена акустическая эффективность использования насадок в зависимости от пористости поверхности насадок и наличия в ней звукопоглощающего материала. Установлено, что насадки без ЗПМ наиболее эффективны, особенно на высоких частотах, если их поверхность не имеет перфорации. Пористая поверхность насадки приводит к нулевой или даже отрицательной эффективности. Для насадок с ЗПМ в области низких частот, наоборот, насадка становится очень эффективной при значениях пористости, близких к 1. В области высоких частот наибольшая эффективность наблюдается для насадок с пористостью равной 0,1. При этом на кривых имеются три локальных максимума эффективности, обусловленные происходящими при наличии таких насадок интерференционными процессами. Для понимания механизмов возникновения такого рода интерференции требуются более детальные исследования, планируемые на следующих этапах работы.

Список литературы

1. Wirt L.S. The control of diffracted sound by means of thnadners (shaped noise barriers) // *Acustica*. 1979. V. 42. № 2. P. 73-88.
2. May D.N. and M.M. Osman. The performance of sound absorptive, reflective, and t profile noise barriers in Toronto. *Journal of Sound and Vibration*, 1980. 71(1): p.:65 71.
3. Watts G.R., Crombie D.H., Hothersall D.C. Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: Full scale tests // *J. Sound Vib*. 1994. V. 177. № 3. P. 289–305.
4. Samuels S., Ancich E. Recent developments in the design and performance of road traffic noise barriers // *Acoust. Australia*. 2001. V. 29, № 2. P. 73-78.
5. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental sound barriers // *Build. Acoust*. 2003. V. 10. № 4. P. 289-323.
6. Аистов В. А., Шубин И.Л. Исследование влияния формы шумозащитного экрана на его акустическую эффективность // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. – 2009. -№5. - С. 200-208.
7. Li, K.M. and H.Y. Wong, A review of commonly used analytical and empirical formulas for predicting sound diffracted by a thin screen. *Applied Acoustics*, 2005. 66(1): p. 45-76.
8. Maekawa, Z., Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1968. 1: p. 157 173.
9. Yamamoto, K. and K. Takagi, Expressions of Maekawa's chart for computation. *Applied Acoustics*, 1992. 37: p. 75-82.
10. Gerges S.N.Y., Calza A.J. Acoustic barriers: Analytical methods, Boundary element method and experimental verification // *Build. Acoust*. 2002. V. 9. № 3. P. 167-190.
11. Fard S.M.B., Kessissoglou N., Samuels S., Burgess M. Numerical study of noise barrier designs // *Proc. Acoust*. 2013. Victor Harbor, Australia.
12. Комкин А.И., Назаров Г.М. Особенности дифракции звука на звукопоглощающем экране // *Акустический журнал*. 2021. Т. 67. № 3. С. 303–307.
13. Мусаева Р.Н., Комкин А.И. Сравнительный анализ эффективности насадок на верхней кромке акустического экрана // *Акустика среды обитания. Материалы VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов*. 25-26 мая 2023. М. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2023. С. 202–207.

14. Мухаметов А.Б., Тупов В.Б. Влияние надстройки в виде антидифрактора на акустическую эффективность шумозащитного экрана // Акустика среды обитания. Материалы VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. 25-26 мая 2023. М. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2023. С. 208-218.

15. Комкин А.И., Мусаева Р.Н. Особенности уменьшения уровня звука экранами Т-образного профиля // Акустический журнал. 2023. № 6. С. 756-764.

References

1. Wirt L.S. The control of diffracted sound by means of thnadners (shaped noise barriers) // *Acustica*. 1979. V. 42. № 2. P. 73-88.

2. May, D.N. and M.M. Osman. The performance of sound absorptive, reflective, and t profile noise barriers in Toronto. *Journal of Sound and Vibration*, 1980. 71(1): p.:65-71.3. Watts G.R., Crombie D.H., Hothersall D.C. Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: Full scale tests // *J. Sound Vib*. 1994. V. 177. № 3. P. 289–305.

3. Watts G.R., Crombie D.H., Hothersall D.C. Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: Full scale tests // *J. Sound Vib*. 1994. V. 177. № 3. P. 289–305.

4. Samuels S., Ancich E. Recent developments in the design and performance of road traffic noise barriers // *Acoust. Australia*. 2001. V. 29, № 2. P. 73-78.

5. Ekici I., Bougdah H. A review of research on environmental sound barriers // *Build. Acoust*. 2003. V. 10. № 4. P. 289-323.

6. Aistov V. A., Shubin I.L. Investigation of the influence of the shape of a noise shield on its acoustic efficiency // *ACADEMIA. Architecture and construction*. – 2009. -№5. - С. 200-208.

7. Li, K.M. and H.Y. Wong, A review of commonly used analytical and empirical formulas for predicting sound diffracted by a thin screen. *Applied Acoustics*, 2005. 66(1): p. 45-76.

8. Maekawa, Z., Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1968. 1: p. 157-173.

9. Yamamoto, K. and K. Takagi, Expressions of Maekawa's chart for computation. *Applied Acoustics*, 1992. 37: p. 75-82.

10. Gerges S.N.Y., Calza A.J. Acoustic barriers: Analytical methods, Boundary element method and experimental verification // *Build. Acoust*. 2002. V. 9. № 3. P. 167-190.

11. Fard S.M.B., Kessissoglou N., Samuels S., Burgess M. Numerical study of noise barrier designs // *Proc. Acoust*. 2013. Victor Harbor, Australia.

12. Komkin A.I., Nazarov G.M. Features of Sound diffraction by a noise absorbing screen // *Acoustical Physics*. 2021. V. 67. № 3. P. 298–301.

13. Musaeva R.N., Komkin A.I. Comparative analysis of the effectiveness of caps on the upper edge of an acoustic screen // *Acoustics of the habitat. Proceedings of the VIII All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, May 25-26, 2023. M. Bauman Moscow State Technical University*. С. 202–207.

14. Mukhametov A.B., Tupov V.B. The effect of the superstructure in the form of an antidiffractor on the acoustic efficiency of a noise screen // *Acoustics of the habitat. Proceedings of the VIII All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, May 25-26, 2023. M. Bauman Moscow State Technical University*. С. 208–218.

15. Komkin A.I., Musaeva R.N. Sound level reduction by T-shaped barriers // *Acoustical Physics*. 2023. V. 69. № 6. P. 863–870.