

УДК 534.1

## ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШУМОПОДАВЛЯЮЩИХ БАРЬЕРОВ

И. В. ВОВК\*, В. Т. МАЦЫПУРА\*\*, Т. А. СОТНИКОВА\*

\*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

\*\*Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

Получено 30.05.2006

Предложена усовершенствованная конструкция шумоподавляющего барьера. С помощью метода частичных областей проведено эффективное численно-аналитическое моделирование звукового поля, рассеянного барьером. Результаты расчетов отображены в наглядной графической форме. Показано и обоснованно преимущество нового типа барьера по сравнению с традиционным (в виде простой стенки).

Запропоновано вдосконалену конструкцію шумозаглушуючого бар'єра. За допомогою метода часткових областей проведено ефективне чисельно-аналітичне моделювання звукового поля, розсіяного бар'єром. Результати обчислень відображено в наочній графічній формі. Показано й обґрунтовано перевагу нового типу бар'єра у порівнянні з традиційним (у вигляді простої стінки).

The improved design of the noise-suppressing barrier is offered. Using the method of partial domains, the efficient numerical-analytical modeling of the sound field scattered by the barrier is conducted. Calculation results are represented in a pictorial graphic form. The advantage of the new barrier type in comparison with the traditional one (in the form of a simple wall) has been demonstrated and proved.

### ВВЕДЕНИЕ

Благодаря простоте конструкции и относительной дешевизне, простейшие шумоподавляющие акустические барьеры в виде вертикальной жесткой стенки определенной высоты широко используются для защиты жилых городских кварталов от транспортных шумов. В последние десятилетия количество транспорта на магистралях практически во всех странах мира неуклонно возрастает и, соответственно, растут уровни создаваемого им шумового поля. Поэтому проблема повышения эффективности барьеров продолжает оставаться весьма актуальной. Традиционный путь, за счет наращивания их высоты, во многих случаях становится неприемлемым как с экономической, так и с эстетической точек зрения. В связи с этим, в последнее время начался интенсивный поиск методов повышения эффективности шумоподавляющих свойств барьеров, которые не сопровождались бы увеличением их высоты.

Ниже, нами предлагается одна из возможных конструктивных схем барьера повышенной эффективности и теоретический метод для оценки его акустических характеристик.

### 1. ОСНОВНАЯ ИДЕЯ

Прежде чем изложить основную идею предлагаемой конструктивной схемы, рассмотрим традиционный барьер в виде простой вертикальной стен-

ки и проанализируем его основные недостатки. Он схематически изображен на рис. 1 вместе с источником акустических шумов, от которого необходимо защитить зону, лежащую слева за барьером.

Для облегчения понимания взаимодействия с барьером 2 звуковых волн, излучаемых источником 3, будем рассматривать этот процесс в рамках приближения геометрической теории дифракции [1, 2]. В соответствии с ней все полупространство выше уровня поверхности дороги 1 можно разделить на освещенную область и область тени. Разделяющая их линия лежит на полубесконечной прямой, проходящей через источник и кромку барьера. Звуковое поле в освещенной области определяется четырьмя компонентами: прямыми лучами  $i$  от источника; лучами  $r_1$ , отраженными от барьера; лучами  $r_2$ , отраженными от поверхности дороги; а также веером лучей  $d$ , которые возникают при попадании на кромку барьера прямого луча  $k$ . Звуковое поле в области геометрической тени определяется только лучами  $d$ , рассеянными на кромке барьера. Именно они и являются главной причиной появления звукового поля в зоне тени за барьером. Таким образом, если бы каким-либо образом удалось ослабить интенсивность лучей  $d$ , рассеянных на кромке барьера, то можно было бы уменьшить звуковое поле в зоне тени и тем самым повысить его эффективность, не прибегая к увеличению высоты барьера.

Одним из возможных путей ослабления интенсивности лучей, рассеянных на кромке барьера,

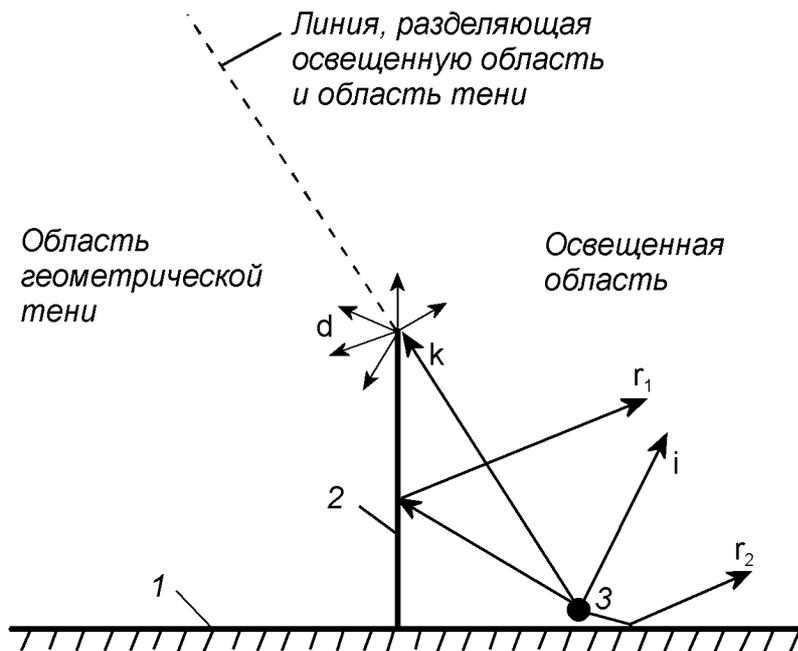


Рис. 1. Схематическое изображение барьера в виде простой вертикальной стенки:

1 – поверхность дороги; 2 – барьер; 3 – источник шума;  
*i* – прямой луч; *r*<sub>1</sub> – луч, отраженный от барьера; *r*<sub>2</sub> – луч, отраженный от дороги;  
*k* – луч, падающий на кромку барьера; *d* – лучи, дифрагированные на кромке

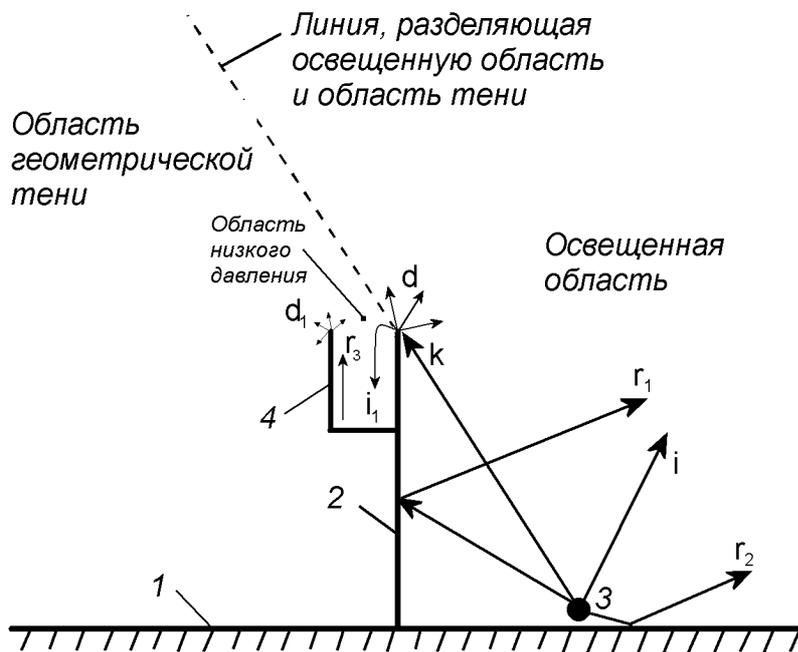


Рис. 2. Схематическое изображение барьера с резонатором у его кромки:

1 – поверхность дороги; 2 – барьер; 3 – источник шума; 4 – резонатор;  
*i* – прямой луч; *r*<sub>1</sub> – луч, отраженный от барьера; *r*<sub>2</sub> – луч, отраженный от дороги;  
*k* – луч, падающий на кромку барьера; *d* – лучи, дифрагированные на кромке; *i*<sub>1</sub> – луч, вошедший в резонатор;  
*r*<sub>3</sub> – луч, отраженный от дна резонатора; *d*<sub>1</sub> – вторичный веер лучей, рассеянных на кромке резонатора



стично заполнена жестким материалом до уровня  $r_d$ , а верхняя оставлена пустой и свободно сообщается с окружающим пространством. Таким образом, верхняя часть межстеночного пространства образует своеобразный резонатор, глубину которого можно изменять за счет надлежащего выбора уровня заполнения жестким материалом нижней части пространства между стенками. Справа, на высоте  $g$  относительно поверхности земли и расстоянии  $b$  от барьера, поместим линейный гармонический источник звука в виде бесконечной пульсирующей нити, моделирующей звук, создаваемый транспортным потоком (в рассматриваемой плоской постановке он обозначен точкой  $S$ ). Нашей задачей является определение акустического поля, создаваемого таким источником в освещенной области и в зоне геометрической тени за барьером, а также в верхней части межстеночного пространства. Само собой разумеется, что все полупространство, окружающее барьер, заполнено воздухом, который смоделирован идеально сжимаемой средой с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$ . Точка наблюдения обозначена буквой  $M$ .

Описанная схема удобна тем, что позволяет построить строгое аналитическое решение для оценки поля давления при рассеянии звука на предложенной нами конструкции барьера. Естественно, что искомое поле давления должно удовлетворять уравнению Гельмгольца

$$\Delta p + k^2 p = 0, \quad (1)$$

$$k = \frac{\omega}{c},$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\omega$  – угловая частота гармонической волны. Временной множитель  $\exp(-i\omega t)$  в дальнейшем будем опускать.

Ниже на основе принятых физических моделей барьера и источника, а также их акустических свойств сформулируем соответствующие им математические модели.

### 3. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Введем полярную систему координат  $(r, \theta)$  с центром в точке  $O$  и направлением отсчета угла  $\theta=0$  от оси  $Ox$ , решение задачи будем строить на базе метода частичных областей [6]. В соответствии с основной его идеей, все пространство существования звукового поля разобьем на четыре области.

Область I занимает внешность полукруга радиусом  $r_h$ , т. е. описывается координатами

$$r \geq r_h, \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

с граничными условиями на поверхности земли  $y=0$ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0, \quad r_h \leq r \leq \infty, \quad \theta = 0, \pi. \quad (2)$$

Остальные три области представляют собой смежные сектора внутри круга радиусом  $r_h$ . Так, область II описывается координатами

$$r \leq r_h, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_0.$$

Она ограничена землей и правой стенкой барьера, что порождает граничное условие

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0, \quad r \leq r_h, \quad \theta = 0, \theta_0. \quad (3)$$

Область III лежит между землей и левой стенкой барьера. Ее координаты составляют

$$r \leq r_h, \quad \theta_0 + \delta \leq \theta \leq \pi.$$

Соответствующие граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0, \quad r \leq r_h, \quad \theta = \theta_0 + \delta, \pi. \quad (4)$$

Наконец, область IV располагается внутри резонатора – с координатами

$$r_d \leq r \leq r_h, \quad \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \delta$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0, \quad r \leq r_h, \quad \theta = \theta_0, \theta_0 + \delta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \quad r = r_h, \quad \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \delta.$$

Описанное выделение частичных областей естественным образом связано с геометрической структурой граничной задачи. Именно для них удается построить частные решения уравнения Гельмгольца. При этом решение исходной граничной задачи сводится к выполнению условий сопряжения на границах частичных областей.

Поместим источник  $S$  в точку  $O_1$  – центр второй полярной системы координат  $(r_1, \theta_1)$ , см. рис. 3. Как известно, поле давления элементарного линейного источника определяется выражением  $p_0 = GH_0^{(1)}(kr_1)$  [5]. Здесь  $G$  – амплитуда, которую примем равной единице;  $H_0^{(1)}(kr_1)$  – функция Ханкеля первого рода нулевого порядка;  $k = \omega/c$  – волновое число;  $\omega = 2\pi f$ ;  $c$  – скорость звука в среде;  $f$  – частота. Обозначим расстояние до источника через  $r_s = \sqrt{b^2 + g^2}$ . Тогда при  $r_s > r_h$  источник звука

располагается в области I, а при  $r_s < r_h$ , – в области II.

Пусть, для определенности,  $r_s > r_h$ . Тогда звуковое поле в области I следует записать в виде

$$p_I = H_0^{(1)}(r_1) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{H_n^{(1)}(kr)}{H_n^{(1)'}(kh)} \cos(n\theta), \quad (6)$$

где угловые функции  $\cos(n\theta)$  выбраны таким образом, чтобы автоматически удовлетворяют граничным условиям на поверхности земли (2). Совокупность произвольных коэффициентов  $A_n$  позволяет выполнить условия сопряжения на границе с областями II, III и IV.

Поле давления в области II представим в виде суперпозиции стоячих волн:

$$p_{II} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m \frac{J_{\alpha_m}(kh)}{J'_{\alpha_m}(kr_h)} \cos(\alpha_m \theta), \quad (7)$$

$$\alpha_m = \frac{m\pi}{\theta_0}.$$

Здесь угловые функции  $\cos(\alpha_m \theta)$  выбраны согласно граничным условиям на жестких поверхностях земли и барьера (3) (при  $\theta = 0$  и  $\theta = \theta_0$ ). Если выполняется неравенство  $r_s < r_h$ , то выражение для поля источника, задаваемое слагаемым  $H_0^{(1)}(kr_1)$ , следует перенести из формулы (6) в правую часть выражения (7). Последовательность коэффициентов  $B_m$  обеспечивает выполнение условий сопряжения на границе с областью I.

Аналогично, для областей III и IV звуковое поле запишем следующим образом:

$$p_{III} = \sum_{q=0}^{\infty} C_q \frac{J_{\beta_q}(kr)}{J'_{\beta_q}(kr_h)} \cos[\beta_q(\theta - \theta_0 - \delta)], \quad (8)$$

$$\beta_q = \frac{q\pi}{\pi - \theta_0 - \delta},$$

$$p_{IV} = \sum_{\tau=0}^{\infty} C_{\tau} \left( \frac{J_{\gamma_{\tau}}(kr)}{J'_{\gamma_{\tau}}(kr_h)} - \frac{J'_{\gamma_{\tau}}(kr_s)}{J'_{\gamma_{\tau}}(kr_h)} \frac{N'_{\gamma_{\tau}}(kr)}{N'_{\gamma_{\tau}}(kr_s)} \right) \cos[\gamma_{\tau}(\theta - \theta_0)], \quad (9)$$

$$\gamma_{\tau} = \frac{\tau\pi}{\delta}.$$

В соотношениях (6)–(9) приняты стандартные обозначения для функций Бесселя, Ханкеля и Неймана.

Сформируем систему функциональных уравнений, которая определяет условия неразрывности

звукового поля на границах областей I, II, III и IV:

$$p_I = \begin{cases} p_{II}, & r = r_h, \quad \theta \in [0, \theta_0], \\ p_{IV}, & r = r_h, \quad \theta \in [\theta_0, \theta_0 + \delta], \\ p_{III}, & r = r_h, \quad \theta \in [\theta_0 + \delta, \pi], \end{cases} \quad (10)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{II}}{\partial r}, \quad r = r_h, \quad \theta = [0, \theta_0], \quad (11)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{III}}{\partial r}, \quad r = r_h, \quad \theta \in [\theta_0, \theta_0 + \delta], \quad (12)$$

$$-\frac{\partial p_I}{\partial r} = -\frac{\partial p_{IV}}{\partial r}, \quad r = r_h, \quad \theta = [\theta_0 + \delta, \pi]. \quad (13)$$

При подстановке выражений (6)–(9) в систему (10)–(13) поле линейного источника  $H_0^{(1)}(kr_1)$  следует записать в системе координат  $(r, \theta)$ . Учитывая, что источник может быть расположен как в области I, так и в области II, необходимо использовать два варианта разложения функции  $H_0^{(1)}(kr_1)$  по системе функций в координатах  $(r, \theta)$ . При расположении источника в области I следует воспользоваться теоремой сложения для цилиндрических функций [7]:

$$H_0^{(1)}(kr_1) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n H_n^{(1)}(kr_s) J_n(kr_h) \times \cos n(\theta - \theta_s), \quad (14)$$

$$r_s > r_h,$$

где

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ 2, & n > 0. \end{cases}$$

Если источник расположен в области II, то следует использовать формулы для функции Грина внутри бесконечного клина с акустически жестки-

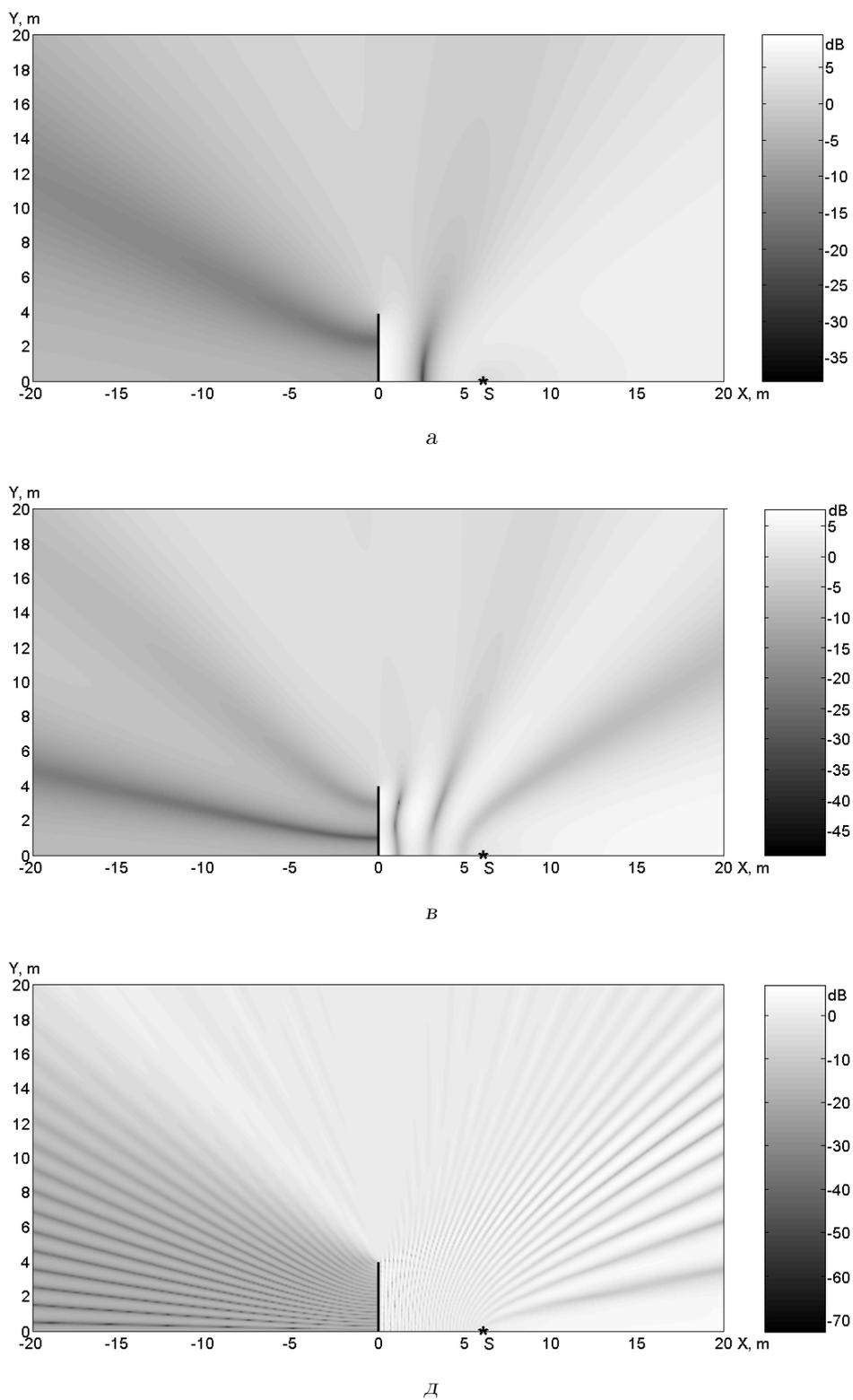
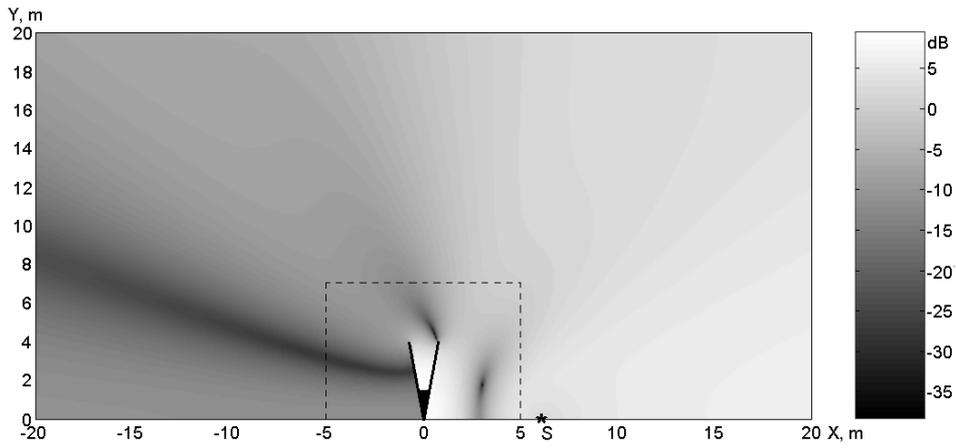
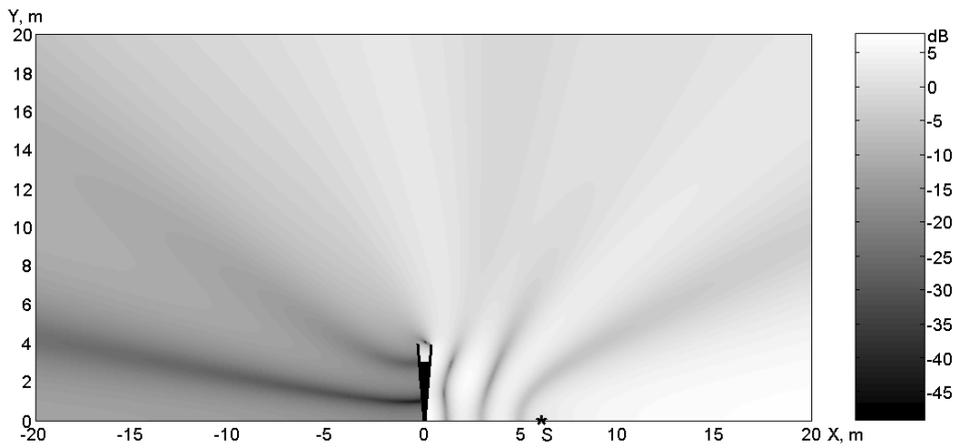


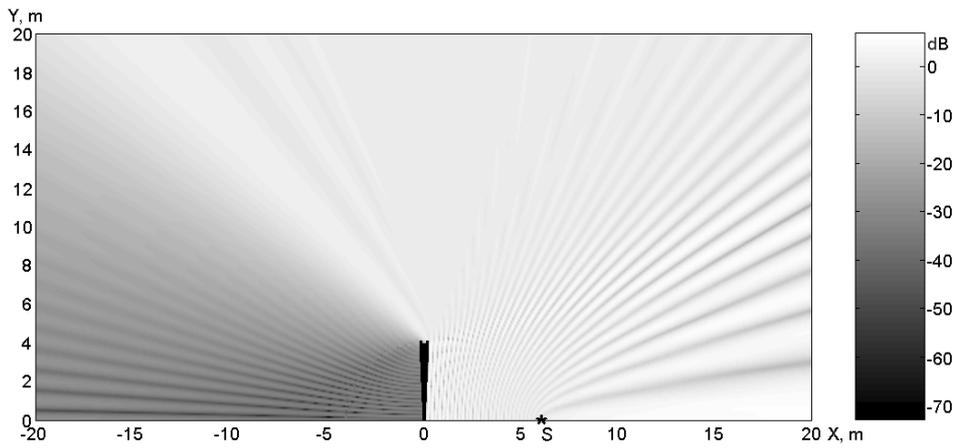
Рис. 4. Звуковые поля давления вокруг акустических барьеров: а, в, д – традиционного, б, г, е – V-образного;



б



г



е

а, б – на 34 Гц, в, г – на 85 Гц, д, е – на 850 Гц; б –  $\delta=20^\circ$  и  $r_d=1.5$  м, г –  $\delta=10^\circ$  и  $r_d=3$  м, е –  $\delta=4^\circ$  и  $r_d=3.9$  м

ми границами:

$$G_{II} = \begin{cases} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m J_{\alpha_m}(kr) H_{\alpha_m}^{(1)}(kr_s) \times \\ \quad \times \cos(\alpha_m \theta_s) \cos(\alpha_m \theta), \\ \quad \quad \quad r \leq r_s, \\ \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m J_{\alpha_m}(kr_s) H_{\alpha_m}^{(1)}(kr) \times \\ \quad \times \cos(\alpha_m \theta_s) \cos(\alpha_m \theta), \\ \quad \quad \quad r > r_s. \end{cases} \quad (15)$$

При этом слагаемое в форме (15) необходимо до-  
бавить в выражение (7).

Проведя стандартную алгебраизацию функци-  
ональных соотношений (10)–(13), на основе  
использования свойств ортогональности соответ-  
ствующих наборов угловых функций получим бес-  
конечную систему линейных алгебраических урав-  
нений второго рода относительно неизвестных ко-  
эффициентов  $A_n$ ,  $B_m$ ,  $C_q$  и  $D_\tau$ . Вследствие гро-  
мозкости математических выражений, а также  
учитывая то, что аналогичные решения более по-  
дробно рассматривались ранее, мы не приводим  
в данной статье окончательный ее вид. Проблемы,  
связанные с построением алгоритмов решения бес-  
конечных систем уравнений, порожденных выпол-  
нением условий сопряжения в методе частичных  
областей, неоднократно обсуждались в публика-  
циях [6, 8, 9]. Вопрос же, касающийся обеспечения  
точности численного решения аналогичной зада-  
чи, рассматривался в предыдущей статье [10]. В  
данном исследовании мы следуем выработанным  
там рекомендациям.

#### 4. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведем сравнительный анализ общего про-  
странственного распределения звуковых полей  
давления для двух типов акустических шумопо-  
давителей: традиционного барьера в виде простой  
стенки (подробности см. в [10]) и V-образного ба-  
рьера, изображенного на рис. 3. На рис. 4 пред-  
ставлены данные, рассчитанные для различных  
частот при фиксированном расстоянии от исто-  
чника до барьера  $b = 6$  м и эффективной высоте  
барьера 4 м. Размеры резонатора для каждой ча-  
стоты подбирались отдельно, согласно следующим  
правилам: межстеночная полость должна иметь

глубину порядка четверти длины звуковой волны  
 $\lambda$  ( $r_d \sim 3\lambda/4$ ), а расстояние между стенками – быть  
малым по отношению к ней ( $2r_d \sin(\delta/2) \sim \lambda/10$ ).  
Все расчеты проводились для симметричных отно-  
сительно вертикали барьеров. Источник считался  
расположенным у поверхности земли, т. е.  $g=0$ .

Динамический диапазон уровней поля на гра-  
фиках отображается в виде градации оттенков се-  
рого цвета, шкалы которых расположены справа  
от портретов звукового поля. В соответствии с ни-  
ми, высокие уровни звукового давления отобража-  
ются светлыми тонами, а низкие – темными.

Анализируя представленные данные, можно  
отметить, что на всех рассмотренных частотах ба-  
рьеру с резонатором присущи более низкие уровни  
звука в зоне тени, нежели традиционному барьеру.  
В частности, звук вблизи поверхности земли за V-  
образным барьером слабее, чем за традиционным  
(примерно на 6 дБ для частот 34 и 85 Гц и на  
10 дБ для частоты 850 Гц). Таким образом, расче-  
ты убедительно показывают, что барьер, модифи-  
цированный за счет введения резонатора, может  
обеспечить более эффективную защиту от шума.

Рассмотрим подробнее, что же происходит вну-  
три резонатора и в пространстве, прилегающем не-  
посредственно к его входу (горловине). Для это-  
го на рис. 4, б штриховыми линиями выделена  
область, которая в увеличенном масштабе приве-  
дена на рис. 5. Как и предполагалось выше, у дна  
резонатора давление высокое (здесь наблюдает-  
ся светлая зона), в то время как в районе входа  
в резонатор его уровень снижается (наблюдается  
темная зона, уходящая несколько вверх от правой  
стенки). В идеальной для шумоподавления ситуа-  
ции она должна была бы, подобно некой “крышке”,  
полностью перекрывать горловину резонатора и  
быть параллельной земле. Однако такую карти-  
ну можно было бы наблюдать, если бы источник  
звука находился выше резонатора и точно на оси  
 $Oy$ . При боковом же расположении источника зву-  
ка относительно барьера зона низкого давления у  
входа резонатора, естественно, уходит несколько  
вверх от правой стенки (приблизительно по линии,  
соединяющей источник с правой кромкой резона-  
тора).

При анализе шумозащитной эффективности ба-  
рьера с резонатором исследовалось влияние его  
различных параметров, таких как угол раскрыва  
резонатора  $\delta$ , угол наклона  $\theta_0$  и глубина резонато-  
ра.

В результате численного анализа удалось уста-  
новить ряд важных закономерностей:

- 1) практически во всем рассматриваемом диапа-

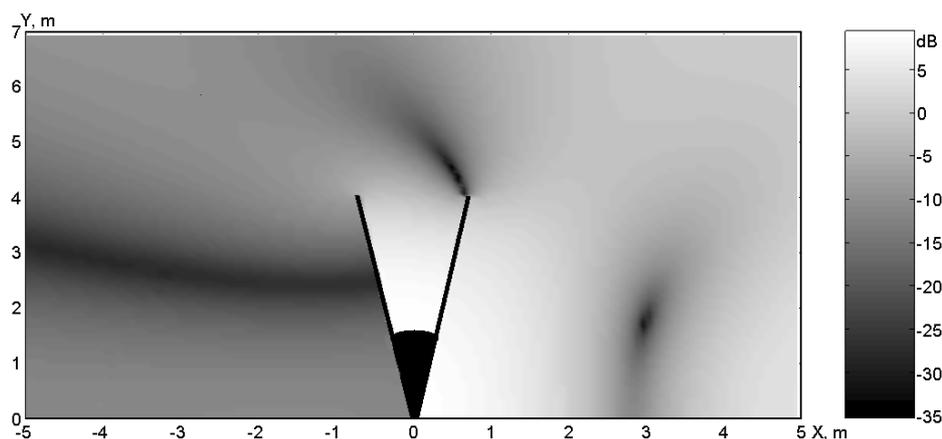


Рис. 5. Увеличенное изображение области, выделенной на рис. 4, б штриховыми линиями

зоне частот эффективность предложенного V-образного барьера выше, по сравнению с традиционным барьером в виде простой стенки;

- 2) оптимальным, с точки зрения эффективности барьера, является случай, когда его ось симметрии совпадает с осью  $Oy$ ;
- 3) оптимальной шириной раскрыва резонатора является величина, соответствующая  $\sim 0.2$  падающей длины волны;
- 4) оптимальная глубина резонатора в среднем колеблется вокруг величины  $\sim 0.25$  падающей длины волны.

Выявленные закономерности позволяют сформулировать некоторые рекомендации, которые могут оказаться полезными для практики:

- 1) предложенный барьер особенно эффективен при наличии относительно узкополосного источника шума или же источника с несколькими доминирующими частотными составляющими, разнесенными по спектру;
- 2) имеет смысл включать резонатор в конструкцию барьера, если проблемные частоты относительно невысоки (когда волновой размер барьера не превышает  $10 \div 15$ ). На более высоких частотах отличие по эффективности между традиционным барьером и V-образным несколько снижается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструктивная схема V-образного шумоподавляющего барьера с

четвертьволновым резонатором, обладающего более высокой эффективностью, чем традиционный барьер в виде простой стенки той же высоты.

2. Сформулированы физическая и математическая модели предложенного барьера и разработан строгий аналитический метод, позволяющий выполнять оценки уровня звукового поля как в освещенной зоне, так и в зоне акустической тени.
3. На основании разработанного аналитического метода выполнены расчеты пространственного распределения звукового поля, дифрагированного на барьере, при наличии источника, расположенного у поверхности земли.
4. Анализ полученных расчетных данных подтвердил высокую эффективность предложенного барьера и позволил установить ряд акустических свойств, присущих конструкциям такого типа. В частности показано, что барьер с резонатором особенно эффективен на относительно низких частотах, где, как известно, осуществить необходимое шумоподавление наиболее трудно.
5. Выработаны некоторые рекомендации по рациональному выбору геометрических параметров рассмотренного барьера.

1. Keller J. B. Geometrical theory of diffraction // J. Opt. Soc. Amer.– 1962.– 52, N 2.– P. 116–130.
2. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции.– М.: Связь, 1978.– 248 с.

3. Medwin H. Shadowing by finite noise barriers // J. Acoust. Soc. Amer.– 1981.– **69**, N 4.– P. 1060–1064.
4. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука.– М.: МГУ, 1960.– 336 с.
5. Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяние звука.– Л.: Судостроение, 1989.– 798 с.
6. Вовк И. В., Гринченко В. Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– К.: Наук. думка, 1986.– 240 с.
7. Ватсон Г. Н. Теория бесселевых функций.– М.: ИИЛ, 1949.– 798 с.
8. Вовк И. В., Мацьпура В. Т. Излучение звука решеткой, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть 1. Теория // Акуст. вісн.– 2001.– **4**, N 2.– С. 11–17.
9. Гринченко В. Т., Мацьпура В. Т. Рассеяние звука на конечных клиновидных объектах // Акуст. вісн.– 2003.– **6**, N 2.– С. 23–33.
10. Вовк И. В., Конченко Т. А., Мацьпура В. Т. Об одном строгом методе оценки акустических свойств шумоподавляющих барьеров // Акуст. вісн.– 2004.– **7**, N 4.– С. 21–27.