АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 5

УДК 534.833

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКА, СОЗДАВАЕМОГО ТОЧЕЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ, В НЕКОТОРЫХ УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

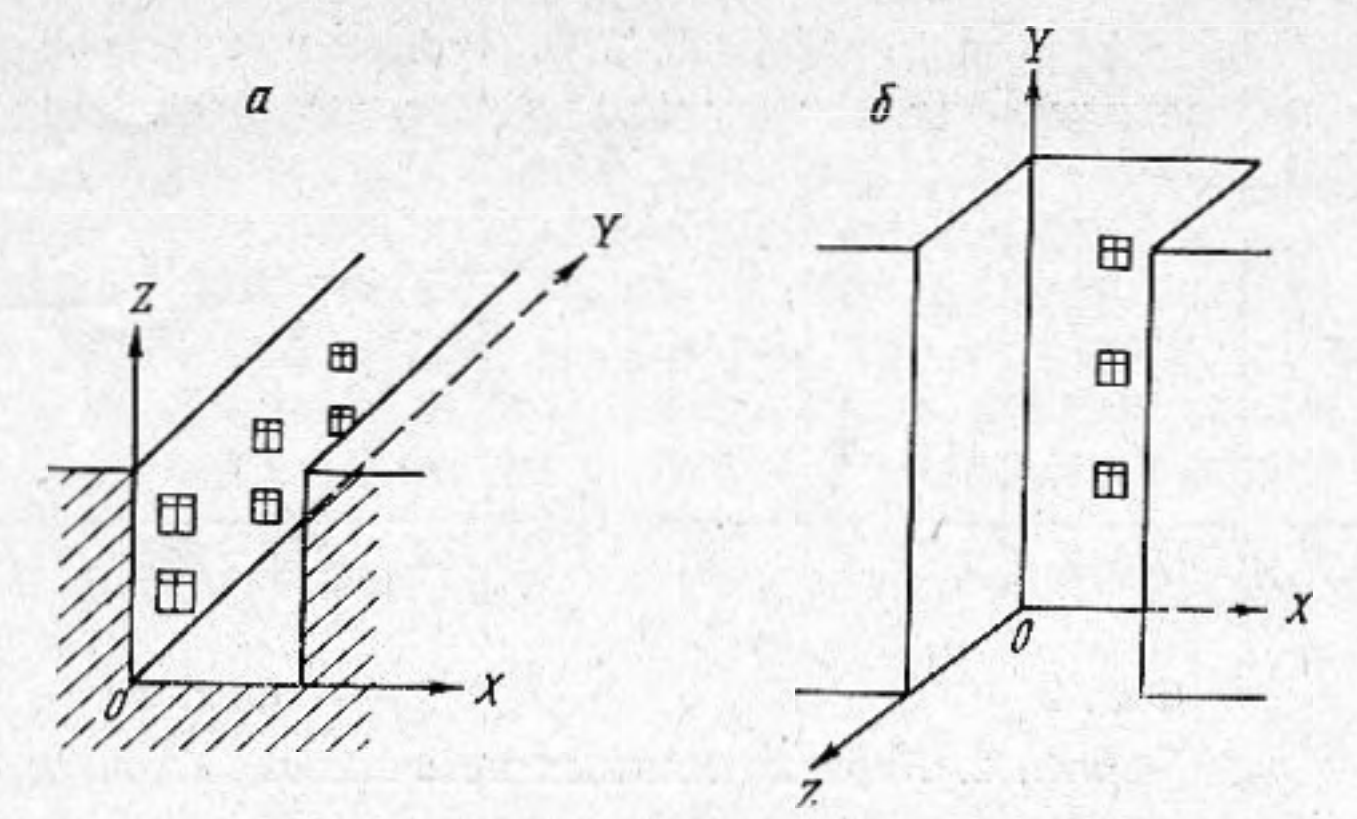
Р. Ю. Винокур

В приближении геометрической акустики получена в замкнутом виде простая формула для расчета интенсивности звука, создаваемого точечным ненаправленным источником внутри однородного слоя с двумя плоскопараллельными абсолютно отражающими границами при произвольном расположении источника и приемника звука относительно друг друга и границ слоя. Аналогичные формулы выведены и для более общего случая, когда имеются еще одна или две (смежные) абсолютно отражающие границы, перпендикулярные плоскопараллельным границам слоя. Эти результаты предназначены для расчета шумовых режимов в некоторых условиях городской застройки: при распространении шума от точечного источника внутри уступа, образованного стеной дома, или на улице с практически непрерывной боковой застройкой. Указаны условия, ограничивающие область применимости полученных формул из-за влияния дифракции и звукопоглощения. Отмечается удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Распространение шума в условиях городской застройки иногда может быть исследовано на основе простой модели: звуковое поле создается точечным ненаправленным источником в канале, образованном двумя плоскопараллельными границами и еще одной или двумя (смежными) границами. Примером горизонтального канала является открытая территория между двумя параллельно стоящими зданиями или улица с практически непрерывной боковой застройкой; вертикального — уступ, образованный стеной дома (фиг. 1). Многие источники городского шума (одиночные транспортные средства, игровые площадки, окна «шумных» помещений) могут рассматриваться в первом приближении как точечные ненаправленные источники. В качестве приемников шума основной интерес представляют окна жилых зданий.

Рассмотрим сперва распространение звука в однородном слое между двумя бесконечными плоскопараллельными границами. Полагаем, что источник звука работает в стационарном режиме, и пренебрегаем интерференционной структурой звукового поля в слое, так как она «смазывается» из-за немонохроматичности излучения. Предполагаем, что толщина слоя a и расстояние r_0 между источником и приемником звука велики по сравнению с длиной волны, и не учитываем пока звукопоглощение в слое и на его границах. Интенсивность звука в приемнике M (фиг. 2) находится в приближении геометрической акустики энергетическим суммированием полей реального P_0 и мнимых P_m ($m=\pm1, \pm2, \ldots$) источников звука [1, 2]

$$I_2=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{W}{4\pi r_n^2},$$



Фиг. 1. Примеры горизонтального (*а*) и вертикального (*б*) каналов

где W — акустическая мощность источника P_0, а квадрат расстояния от источника P_n $(n=0, \pm 1, \pm 2, \ldots)$ до приемника M равен

$$r_n^2 = \begin{cases} (na - U_2)^2 + U_1^2 & \text{при четном } n, \\ [(n+1)a - U_2 - 2U_5]^2 + U_1^2 & \text{при нечетном } n. \end{cases}$$

Здесь $U_1 = |MN|$, $U_2 = |P_0N|$, $U_3 = |P_0A|$, N — проекция точки M на прямую AB, перпендикулярную границам слоя. Переходя к безразмерным координатам $u_j = U_j/(2a)$ $(j=1, 2, 3)$ и применяя метод суммирования рядов с помощью теории вычетов [3], имеем

$$I_2 = \frac{W}{16\pi a^2} f(u_1, u_2, u_3), \tag{1}$$

где функция трех независимых переменных

$$f(u_1, u_2, u_3) = \frac{\pi \operatorname{sh}(2\pi u_1)}{2u_1} \left[\frac{1}{\operatorname{sh}^2(\pi u_1) + \sin^2(\pi u_2)} + \right. \tag{2}$$
$$\left. + \frac{1}{\sin^2(\pi u_2 + 2\pi u_3) + \operatorname{sh}^2(\pi u_1)} \right].$$

Заметим, что при $u_1 = 0$ функция (2) не имеет особенности, так как в нуль обращаются и числитель, и знаменатель. Раскрывая неопределенность, получим

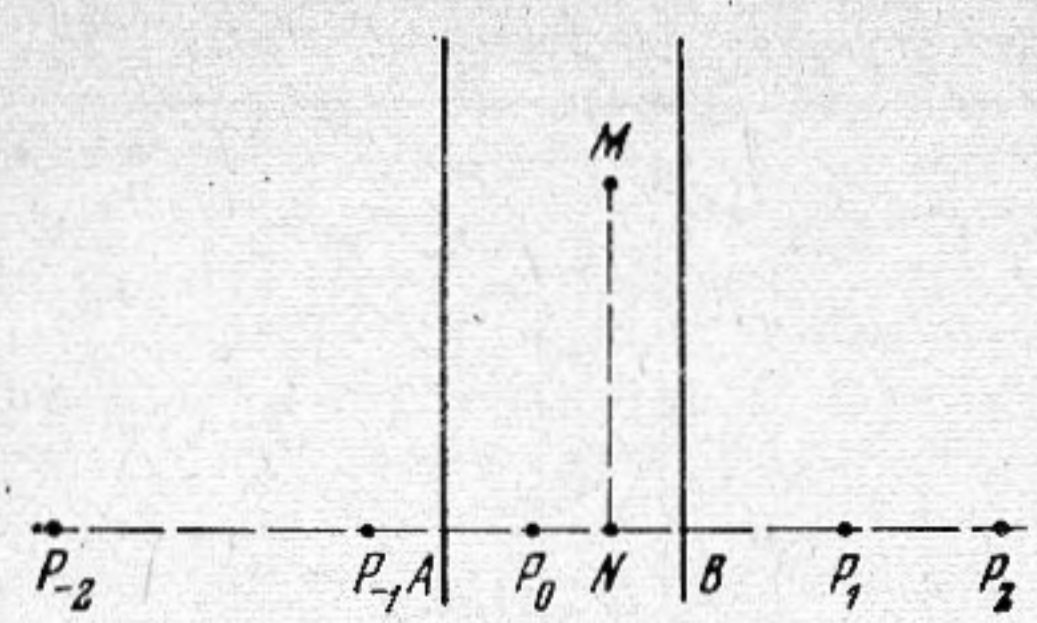
$$f(0, u_2, u_3) = \pi^2 \left[\frac{1}{\sin^2(\pi u_2)} + \frac{1}{\sin^2(\pi u_2 + 2\pi u_3)} \right].$$

В случае полуограниченного слоя, включающего еще одну, третью, абсолютно отражающую границу, перпендикулярную плоскопараллельным границам, интенсивность звука в приемнике равна

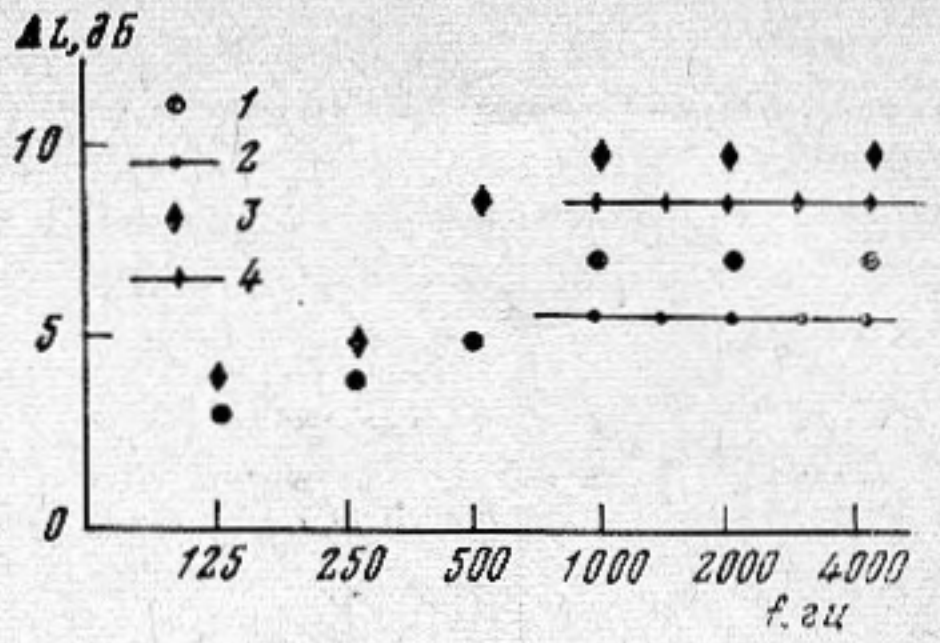
$$I_3 = \frac{W}{16\pi a^2} [f(u_1, u_2, u_3) + f(t_1, u_2, u_3)]. \tag{3}$$

Здесь $t_1 = \sqrt{h_3 H_3/a^2 + u_1^2}$, где h_3 и H_3 — расстояния соответственно от источника и приемника до третьей границы. При наличии четвертой абсолютно отражающей границы, перпендикулярной плоскопараллельным и смежной с третьей границам, интенсивность звука в приемнике будет

$$I_4 = \frac{W}{16\pi a^2} [f(u_1, u_2, u_3) + f(t_1, u_2, u_3) + \tag{4}$$
$$+ f(t_2, u_2, u_3) + f(t_3, u_2, u_3)].$$



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Картина мнимых источников

Фиг. 3. Частотные характеристики величины повышения уровня звукового давления ΔL вследствие волноводного эффекта внутри вертикального канала ($a\approx5$ м, $d\approx2$ м), если ТП отстоит от ШП на высоту двух этажей ($r_0\approx6$ м): *1* – эксперимент, *2* – расчет; четырех этажей ($r_0\approx12$ м); *3* – эксперимент, *4* – расчет

Здесь $t_2=\sqrt{h_4H_4/a^2+u_1^2}$, $t_3=\sqrt{h_4H_4/a^2+t_1^2}$, где h_4 и H_4 — расстояния соответственно от источника и приемника до четвертой границы.

Формулы (1) — (4) получены без учета звукопоглощения и конечности размеров границ. Оценим влияние звукопоглощения на величину интенсивности звука в приемнике. Для оценки достаточно рассмотреть случай, когда источник и приемник звука находятся посередине между двумя бесконечными плоскопараллельными границами, имеющими не зависящий от угла падения звуковой волны одинаковый коэффициент отражения звуковой энергии V; звукопоглощением в среде можно пренебречь по сравнению с поглощением звука на границах в диапазоне частот, нормируемом для измерения уровней шума. Тогда интенсивность звука в источнике определяется выражением

$$I_2'=\frac{W}{2\pi a^2}\left[\frac{1}{2l^2}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\exp(-bn)}{l^2+n^2}\right], \tag{5}$$

где $l=r_0/a$, $b=\ln(1/V)$. Выражение в квадратных скобках является приближенным (по правилу трапеций) значением интеграла $s=\int_0^\infty \exp(-bx)\,dx/(l^2+x^2)$, сводящимся к сложному для интерпретации выражению со специальными функциями [4]. Воспользуемся приближенным, но дающим наглядный результат способом оценки. Интегрируя по частям, при $b>0$ имеем $s=b\int_0^\infty \operatorname{arctg}(x)\exp(-bx)\,dx$. Функцию $\operatorname{arctg}(x)$ в подынтегральном выражении заменим функцией $\pi[1-\exp(-2x/\pi)]/2$ (относительная погрешность такой аппроксимации не превышает 4% по модулю при $0\leqslant x<\infty$). В результате после простых выкладок получим

$$I_2'\approx\frac{W}{4ar_0}\frac{1}{1+\pi br_0/(2a)}. \tag{6}$$

Сравнивая выражения (6) и (2) (при $u_2=0$, $u_3=0{,}5$), замечаем, что формула (5) строго справедлива в случае $b=0$. Численный расчет на ЭВМ показал, что относительная погрешность приближенной формулы (6) по сравнению с точной формулой (5) не превышает 10% по модулю, если $1\leqslant l$, $0\leqslant b\leqslant0{,}5$. Из формулы (6) следует, что поглощением звука на границах можно пренебречь, если

$$r_0\leqslant a/(\pi\ln(1/V)). \tag{7}$$

Отражение звуковой волны, падающей на плоскую границу конечных размеров, можно рассматривать в приближении геометрической акустики, если точка границы, через которую проходит луч, построенный по законам геометрической акустики, и окружающая эту точку область определенных размеров (эффективная зона) лежат в пределах границы [2]. Рассмотрим бесконечный вдоль оси OY (фиг. 1) канал, где источник и приемник звука расположены на «дне» (в плоскости OXY) и равноудалены от боковых стенок канала. В этом случае поле звуковой волны, падающей на приемник после одного отражения от боковой стенки, можно, согласно работе [2], определять в приближении геометрической акустики, если частота удовлетворяет условию

$$f \geqslant f_{\text{г}} = \frac{c\sqrt{r_0^2+a^2}}{d^2}, \tag{8}$$

где d — высота боковых стенок, c — скорость звука в среде. Если $f \ll f_{\text{г}}$, то звуковые волны, дифрагируя, огибают боковые стенки, практически не отражаясь внутрь канала. На фиг. 3 представлены экспериментальные [5] и расчетные частотные характеристики повышения уровня звукового давления ΔL в вертикальном канале (фиг. 1, *б*) вследствие волнового эффекта, обусловленного отражением звука от боковых стенок. Источником и приемником звука служили открытые окна соответственно «шумного» (ШП) и «тихого» (ТП) помещений, расположенных на «дне» канала. Видно, что в области частот $f \ll f_{\text{г}}$ волноводный эффект практически не наблюдается; при $f \geqslant f_{\text{г}}$ отмечается удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений ΔL. Ограничение (8) является приемлемым в виде оценки и тогда, когда источник и приемник звука расположены произвольным образом внутри канала. Рассеяние звука на неоднородностях канала трудней поддается оценке, однако, если поверхность боковых стенок в основном включает практически плоские участки, этот эффект можно в первом приближении не учитывать. Более того, если размер «шероховатости» $D < c/(2f)$, то шероховатая поверхность ведет себя практически как зеркальная [6]. Таким образом, расчет интенсивности звука, создаваемого точечным источником в рассмотренных условиях городской застройки, можно осуществлять по формулам (1)—(4) с учетом ограничений (7) и (8). Расчет может быть произведен быстро и без применения ЭВМ, что считается важным в разработке градостроительных мер борьбы с шумом.

Автор благодарит С. А. Рыбака за внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957.
2. *Бреховских Л. М.* Пределы применимости некоторых приближенных методов, употребляемых в архитектурной акустике. УФН, 1947, *32*, 4, 464–479.
3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., «Наука», 1970.
4. *Градштейн И. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., «Наука», 1971,
5. *Винокур Р. Ю., Лалаев Э. М.* Об ухудшении звукоизоляции между помещениями в зданиях, содержащих вертикальные уступы. IX Всесоюзная акустическая конференция. М., Секция Л, 1977, 41–44.
6. *Исакович М. А.* Общая акустика. М., «Наука», 1973.

Московский научно-исследовательский
и проектный институт типового
и экспериментального проектирования

Поступила
22 сентября 1978 г.
После повторного исправления
10 мая 1979 г.