

УДК 534.2

*А.И. АНТОНОВ, канд. техн. наук, В.И. ЛЕДЕНЕВ, д-р техн. наук,
Е.О. СОЛОМАТИН, инженер, Тамбовский государственный технический университет;
В.П. ГУСЕВ, д-р техн. наук, Научно-исследовательский институт
строительной физики РААСН (Москва)*

Методы расчета уровней прямого звука, излучаемого плоскими источниками шума в городской застройке

Предложены формулы для расчета уровней прямого звука от плоских источников шума, размещаемых в городской застройке. Произведена оценка погрешностей расчетов уровней прямого звука на основе этих формул. Показана возможность расчетов уровней прямого звука от плоских источников как от точечных источников с указанием границ их применения.

Ключевые слова: шум, уровень прямого звука, плоский источник шума, городская застройка.

В последнее время в пределах городской застройки появляется большое количество плоских источников шума. К таким источникам можно отнести плоскости с многочисленным оборудованием, размещенным на открытых площадках, кровлях зданий, а также наружные стены и оконные заполнения (остекления) производственных зданий. Этим оборудованием могут быть равномерно распределенные на поверхностях указанных элементов зданий группы вентиляционных установок, холодильные машины, различные воздушные охладители торговых предприятий, а также административных и жилых зданий [1, 2]. При достаточно большой звуковой мощности они создают на территории городской застройки значительные зоны с неудовлетворительными акустическими условиями, а их эффективное снижение шума невозможно без достаточно точной оценки шумового воздействия. Вместе с тем в настоящее время нет достаточно надежных методов расчета распространения прямого звука от перечисленных плоских источников.

В данной статье предлагаются расчетные формулы, позволяющие производить расчеты распространения прямого звука от плоских источников, и дается оценка погрешностей расчетов при их применении.

Общее уравнение для плотности энергии прямого звука плоского источника может быть записано в виде:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \int_S \frac{p'' \Phi \cos^2 \theta}{\Omega r^2 c} ds, \quad (1)$$

где Φ – фактор направленности: $\Phi=1$ – для ненаправленного источника, $\Phi=\cos \theta$ – направленность по зависимости Ламберта; θ – угол между нормалью к поверхности источника и направлением на расчетную точку; Ω – пространственный угол излучения звука: $\Omega=2\pi$ – излучение в полупространство; p'' – единичная мощность излучения звуковой энергии поверхностью, Вт/м²; r – кратчайшее расстояние от расчетной точки до плоскости источника; c – скорость звука в воздухе. В общем случае излучаемая мощность может быть переменной в границах поверхности излучения.

Используя численное интегрирование уравнения (1), можно рассчитывать плотность звуковой энергии в рас-

четной точке от любого плоского источника. Однако это не всегда удобно при выполнении практических расчетов. Ниже рассмотрены более частные случаи плоских источников, когда для расчета плотности прямого звука можно использовать более простые расчетные формулы.

Широкое распространение в городской среде имеют плоские источники конечных размеров прямоугольной формы с излучением звуковой энергии по зависимости Ламберта. К ним в первую очередь относятся оконные заполнения и стены с низкой звукоизоляцией.

Для получения формулы плотности прямого звука в расчетных точках от такого источника разделим плоскость источника на горизонтальные полосы высотой dh . Полосы в этом случае можно считать линейными источниками. Расчетная схема приведена на рисунке.

Плотность звуковой энергии от линейного источника высотой dh в этом случае определяется как:

$$d\varepsilon = \frac{p'' dh \cdot \cos \alpha (\sin \bar{\varphi}_2 - \sin \bar{\varphi}_1)}{\pi R c}, \quad (2)$$

где $R=r/\cos \alpha$; $\bar{\varphi}_1=\arctg(\tg \varphi_1 \cdot \cos \alpha)$; $\bar{\varphi}_2=\arctg(\tg \varphi_2 \cdot \cos \alpha)$; $dh=r \cdot d\alpha/\cos^2 \alpha$.

Величина плотности от всей поверхности плоского источника определяется как:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{p'' (\sin \bar{\varphi}_2 - \sin \bar{\varphi}_1)}{\pi c} d\alpha. \quad (3)$$

Интеграл (3) не имеет аналитического решения. Если принять $\bar{\varphi}_1 \approx \varphi_1$ и $\bar{\varphi}_2 \approx \varphi_2$, из (3) имеем:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{p'' (\alpha_2 - \alpha_1) (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}{\pi c}. \quad (4)$$

В формуле (4) φ_1 и φ_2 – горизонтальные углы краев плоскости источника в уровне середины его высоты.

Для расчетов уровней прямого звука от источника шума конечных размеров L и H с равномерным излучением по всей поверхности удобнее использовать выражение для p'' в виде $p''=P/LH$, где P – общая мощность плоского источника. Тогда уровень прямого звука плоского источника будет определяться как:

Таблица 1

r/L	Погрешности расчета, дБ, при		
	L/H=1	L/H=2	L/H=4
100	-0,0001	-0,0001	-0,0001
50	-0,0004	-0,0001	-0,0002
25	-0,0014	-0,001	-0,0009
12,5	-0,0058	-0,004	-0,0036
6,25	-0,0231	-0,0102	-0,014
3,125	-0,092	-0,064	-0,057
1,56	-0,354	-0,2484	-0,22
0,78	-1,25	-0,888	-0,782
0,39	-3,6	-2,61	-2,25
0,195	-7,69	-5,88	-4,9

Таблица 2

R/H	Погрешности расчета, дБ, при расположении расчетных точек по центральной оси источника
100	0,0000
50	-0,0002
25	-0,0007
12,5	-0,0026
6,25	-0,0104
3,12	-0,0413
1,56	-0,1604
0,78	-0,58
0,39	-1,75
0,19	-4,09

$$L_{np} = L_p + 10 \lg \left(\frac{(\alpha_2 - \alpha_1) (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}{\pi L H} \right) \quad (5)$$

Так как в формуле (4) использованы допущения, произведена оценка погрешностей, возникающих за счет замены углов $\bar{\varphi}_1$ и $\bar{\varphi}_2$ на углы φ_1 и φ_2 . Для этой цели произведено сравнение результатов расчетов по формуле (4) с данными численного интегрирования уравнения (1).

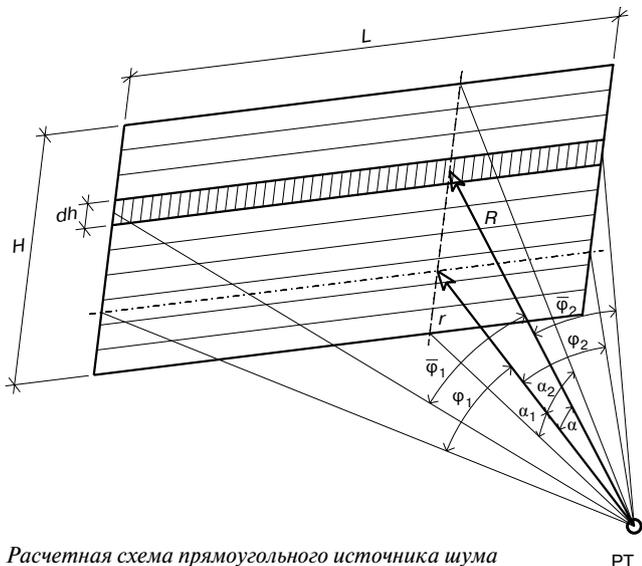
Результаты сравнения показали, что на участках перед источником погрешность расчетов по формуле (4) не превышает 0,2 дБ. В то же время на участках пространства, откуда плоский источник виден под острым углом (20° и менее), погрешность может достигать 3 дБ.

На практике при конечных размерах источника расчеты уровней прямого звука можно производить приближенно, рассматривая плоский источник как точечный. Ниже показана возможность такой замены и дана оценка возникающей при этом погрешности.

Точечный источник, заменяющий плоский источник, излучающий энергию в полупространство по закону Ламберта, создает плотность прямого звука, определяемую как:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{P \cos \theta}{\pi R^2 c} \quad (6)$$

где R – расстояние от расчетной точки до геометрического центра плоского источника; θ – угол между нормалью к пло-



скости источника и направлением на расчетную точку из геометрического центра источника.

Результаты расчета с использованием формулы (6) согласуются с данными расчетов по формуле (4) при $p'' = P/LH$, когда выполняется условие:

$$\frac{(\alpha_2 - \alpha_1) R \cdot (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) R}{L H \cos \theta} \rightarrow 1. \quad (7)$$

Отличие значения (7) от единицы определяет погрешность замены плоского источника точечным. В уровнях при $R = r/\cos \theta$ погрешность оценивается как:

$$\Delta L_m = 10 \lg \left(\frac{(\alpha_2 - \alpha_1) r^2 \cdot (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)}{L H \cos^3 \theta} \right) \quad (8)$$

В табл. 1 приведены погрешности расчета уровней прямого звука при использовании точечной модели источника вместо плоского источника конечных размеров при разных соотношениях $L/H = \{1; 2; 4\}$.

При расстояниях $r > 1,5L$ вместо плоского источника можно использовать с погрешностью менее 0,5 дБ модель точечного источника.

Размещаемые на крышах здания группы шумного оборудования, например группы вентиляторов, относятся к плоским источникам прямоугольной формы с равномерным излучением звуковой энергии в полусферу. Для получения расчетной формулы плотности прямого звука от таких источников использован тот же прием, что и ранее при выводе формулы (4). Расчетная схема источника шума приведена на рисунке. Плоский источник разбит на отдельные элементарные линейные источники высотой dh . Плотность звуковой энергии в расчетной точке от отдельного линейного источника равна:

$$d\varepsilon = \frac{p'' dh (\bar{\varphi}_2 - \bar{\varphi}_1)}{2\pi R c} \quad (9)$$

После замены $p'' = P/LH$ величина плотности звуковой энергии от всей поверхности определяется как:

$$\varepsilon_{пр} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{P (\bar{\varphi}_2 - \bar{\varphi}_1)}{2\pi \cos \alpha L H c} d\alpha \quad (10)$$

Используя те же упрощения, что и при получении выражения (4), окончательно имеем:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{P (\varphi_2 - \varphi_1)}{2\pi L H c} \ln \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha_2/2 + \pi/4)}{\operatorname{tg}(\alpha_1/2 + \pi/4)} \right) \quad (11)$$

В этом случае уровни прямого звука будут определяться как:

$$L_{np} = L_p + 10 \lg \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi LH} \cdot \ln \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha_2/2 + \pi/4)}{\operatorname{tg}(\alpha_1/2 + \pi/4)} \right) \right) \quad (12)$$

Сравнение результатов расчетов по формуле (11) с результатами численного интегрирования показало, что наибольшие расхождения наблюдаются в расчетных точках вблизи плоскости источника при $r/H \leq 0,12$. Перед источником по центру расхождение достигает 0,6 дБ; в стороне от центра источника при углах 20° и менее оно составляет 3 дБ.

Произведена оценка возможности использования точечной модели источника звука (шума) вместо модели плоского источника при излучении звука в полусферу. Для этого выполнено сравнение результатов расчета плотности прямого звука при точечной модели источника:

$$\varepsilon_{np} = \frac{P}{2\pi R^2 c} \quad (13)$$

и данных, полученных при расчетах с использованием формулы (11).

Результаты расчетов по формуле (13) согласуются с данными расчетов по формуле (11), когда выполняется условие:

$$\frac{(\varphi_2 - \varphi_1)R}{L} \cdot \frac{R}{H} \cdot \ln \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha_2/2 + \pi/4)}{\operatorname{tg}(\alpha_1/2 + \pi/4)} \right) \rightarrow 1. \quad (14)$$

В уровнях погрешность замены плоского источника на точечный источник определяется как:

$$\Delta L_m = 10 \lg \left(\frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{L} R \right) + 10 \lg \left(\frac{R}{H} \cdot \ln \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha_2/2 + \pi/4)}{\operatorname{tg}(\alpha_1/2 + \pi/4)} \right) \right). \quad (15)$$

В табл. 2 приведены погрешности использования точечной модели вместо плоской модели при расположении расчетных точек на линии, перпендикулярной плоскости источника в его центре при пропорциях плоского источника $L/H=2$.

При отношениях $R > 0,9H$ точечная модель дает погрешность не более 0,5 дБ и может использоваться при расчетах шума от плоских источников с излучением звука в полусферу.

Таким образом, при расчетах уровней прямого звука от плоских источников шума следует использовать расчетные формулы (5) и (12). Формулы учитывают фактор направленности излучения звука источником и положение расчетных точек в пространстве относительно источника. При расположении расчетных точек на расстояниях, в два и более раза превышающих наибольший размер источника, расчеты прямого звука с достаточной для практики точностью можно производить как от точечного источника. Погрешность расчетов в этих случаях не будет превышать 0,5 дБ.

Список литературы

1. Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И., Соломатин Е.О. Метод оценки распространения шума по воздушным каналам систем отопления, вентиляции и кондиционирования // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 52–54.
2. Антонов А.И., Бацунова А.В., Крышов С.И. Метод оценки шумовых полей перемещения при проектировании шумозащиты в гражданских зданиях с непостоянными во времени источниками шума // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 58–59.



**При поддержке Правительства
Республики Саха (Якутия)**

**СЕДЬМАЯ
МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА**

ДОМ-ЭКСПО

г. Якутск Республика Саха **24-26 сентября 2013 г.**

Организаторы:



Торгово-промышленная палата
Республики Саха (Якутия)

Департамент по лесным отношениям
Республики Саха (Якутия)

Союз архитекторов Якутии



Выставочная компания ООО "СибЭкспоСервис-Н"
тел.(383) 3356350, e-mail: ses@avmail.ru, www.ses.net.ru