

УДК 697.922

**РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКА  
ТОЧЕЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ШУМА  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**ESTIMATED MODELS OF SOUND RADIATION  
BY SPOT SOURCES OF NOISE  
OF INDUSTRIAL ENTERPRISES**

*В.П. ГУСЕВ, А.И. АНТОНОВ, Е.О. СОЛОМАТИН, А.М. МАКАРОВ*  
*V.P. GUSEV, A.I. ANTONOV, E.O. SOLOMATIN, A.M. MAKAROV*

**(Научно-исследовательский институт строительной физики  
Российской академии архитектуры и строительных наук,  
Тамбовский государственный технический университет)**

**(Research Institute of Building Physics of Russian Academy  
of Architecture and Construction Sciences, Tambov State Technical University)**

E-mail: gusev-43@mail.ru; gsiad@mail.tambov.ru

*В статье рассмотрены модели излучения звуковой энергии точечными источниками шума промышленных предприятий. Показано, что основным параметром источника, влияющим на распространение звуковой энергии, является фактор направленности излучения звука. Предложена методика определения фактора направленности, учитывающая влияние на него характеристик источника. Методика заключается в экспериментальном определении диаграммы направленности излучения звуковой энергии источником и в ее аппроксимации с целью получения формул, учитывающих особенности излучения звука источником. Приведены примеры определения*

*фактора направленности для двух характерных источников. Формулы могут использоваться при оценке шума в помещениях производственных зданий и на прилегающих к ним территориях.*

*The article deals with the models of sound energy radiation by point noise sources of industrial enterprises. It is shown that the main parameter of the source affecting the propagation of sound energy is the directivity factor of sound radiation. A method for determining the directivity factor is proposed, which allows to take into account the influence of the source characteristics on it. The technique consists in the experimental determination of the radiation pattern of sound energy source and its subsequent approximation in order to obtain formulas that take into account the specific features of the radiation of sound source. Examples of determining the directivity factor for two sources are given. Formulas can be used in the evaluation of noise in the premises of industrial buildings and adjacent areas.*

**Ключевые слова:** источник шума, промышленные предприятия, фактор направленности источника, расчет шума.

**Keywords:** noise source, industrial enterprises, source directionality factor, noise calculation.

При расчетах шумовых полей на открытых пространствах предприятий и в производственных помещениях необходимо производить оценку распространения прямого звука, излучаемого различными источниками шума. В этом случае устанавливается степень зашумления прилегающей к источнику территории, в том числе и за пределами предприятия [1], [2]. В помещениях, кроме прямого звука, производится также вычисление отраженного шума. При расчетах отраженного шума требуются сведения об акустических характеристиках источников шума и о распределении прямой энергии, излучаемой источниками, по поверхностям ограждений помещений [3...7]. Все источники шума промышленных предприятий по геометрическим параметрам делятся на точечные, линейные, плоские и объемные. Отнесение источников к тому или иному виду зависит от размеров источника и от расстояния между источником и расчетной точкой [8], [9]. Точечными считают источники, размеры которых значительно меньше расстояния от них до расчетной точки. При расчетах прямого звука в ближнем поле линейных, плоских и объемных источников в последнее время используют принцип представления большеразмерных излучателей в виде комбинации точечных источни-

ков, и общую величину прямого звука рассчитывают интегрированием или суммированием вкладов всех элементарных точечных источников [10], [11].

Акустические характеристики точечных источников шума определяются тремя параметрами: акустической мощностью, фактором направленности и пространственным углом излучения.

Для расчета плотности звуковой энергии прямого звука  $\varepsilon_{\text{пр}}$  точечного источника звука и последующего определений уровней звукового давления  $L$  используют известные выражения строительной акустики, в которые входят все три указанных выше параметра:

$$L = 10 \lg \varepsilon_{\text{пр}} = 10 \lg \left( \frac{W\Phi}{\Omega c r^2} \right) = L_w + 10 \lg \left( \frac{\Phi}{\Omega r^2} \right), \quad (1)$$

где  $W$  – звуковая мощность источника;  $\Phi$  – фактор направленности;  $r$  – расстояние от источника до расчетной точки;  $\Omega$  – пространственный угол излучения источника;  $c$  – скорость звука в воздухе;  $L_w$  – уровень звуковой мощности источника.

Определение мощности и пространственного угла направленности источника проводится экспериментально с использовани-

ем методик, отвечающих требованиям действующих ГОСТ [12], [13]. Более сложные проблемы возникают при определении фактора направленности.

Фактор направленности показывает зависимость интенсивности излучения звуковой энергии от направления излучения. Он равен отношению интенсивности звука  $I$ , создаваемого источником в свободном поле в данной точке пространства, к средней интенсивности звука  $I_{\text{ср}}$  на таком же расстоянии от источника. Определяется он экспериментально.

Фактор направленности является нормированной функцией:

$$\frac{1}{\Omega} \int \Phi d\Omega = 1, \quad (2)$$

где  $d\Omega$  – элемент пространственного угла излучения источника шума  $\Omega$ .

Общее выражение для фактора направленности излучения звука элементом источника можно представить в виде:

$$\Phi = (n + 1) \cos^n \theta, \quad (3)$$

где  $n$  – показатель, принимающий действительные неотрицательные значения  $n = \{0 \div N\}$ ; определяют на основании экспериментальных данных.

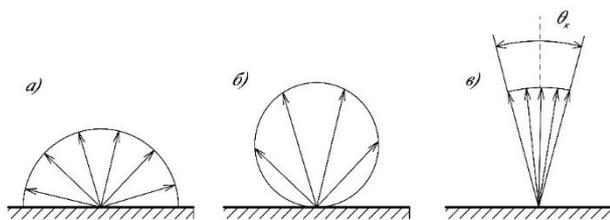


Рис. 1

Можно выделить три идеальные модели распределения излученной энергии в пространстве (рис. 1 – идеальные расчетные модели излучения звука: а) – равномерное; б) – направленное по зависимости Ламберта; в) – направленное в виде пучка энергии в пределах конуса): равномерная в пределах угла излучения (рис. 1-а) –  $n = 0$ ,  $\Phi_p = 1$ ; излу-

чение по зависимости Ламберта, пропорциональное косинусу угла с центральной осью излучателя (рис. 1-б) –  $n = 1$ ,  $\Phi_{\text{л}} = 2 \cos \theta$ ; направленное излучение в виде узкого пучка в пределах конуса (рис. 1-в), ось которого перпендикулярна плоскости излучателя. Фактор направленности принимается постоянным при условии, если  $\theta < 0,5\theta_k$ , и определяется по формуле:

$$\Phi_k = \frac{1}{1 - \cos(0,5\theta_k)}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол между осью конуса и направлением на расчетную точку;  $\theta_k$  – угол раствора конуса.

Выражения  $\Phi_p$ ,  $\Phi_{\text{л}}$  и  $\Phi_k$  даны для случая излучения звука в полупространство. Реальная расчетная модель излучения шума может быть записана как комбинация идеальных моделей с коэффициентами пропорциональности  $k_i$ , в сумме равными 1:

$$\Phi = k_1 \Phi_p + k_2 \Phi_{\text{л}} + k_3 \Phi_k. \quad (5)$$

Коэффициенты  $k_i$  следует получать путем обработки результатов натурных исследований излучения звука реальными источниками. На основе аппроксимации экспериментальных графиков направленности могут быть получены выражения для факторов направленности исследованных типов источников.

Ниже приведены результаты определения факторов направленности для двух характерных источников.

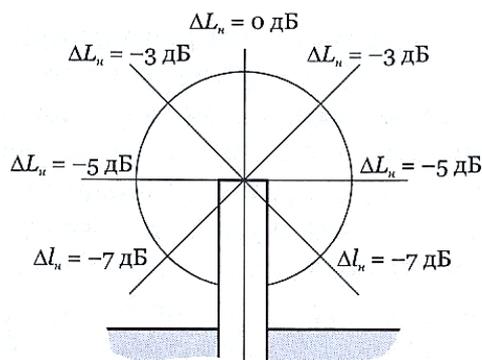


Рис. 2

К точечным источникам на промышленных предприятиях можно отнести трубы и воздуховоды, излучающие шум в окружающее пространство (рис. 2 – изменения спадов уровней звукового давления в области открытого конца воздуховода [14]). Пространственный угол излучения шума в рассматриваемом примере составляет  $\Omega=4\pi$ . Круговой график изменения интенсивности излучаемой энергии имеет явно выраженную направленность излучения шума вверх, что объясняется особенностью излучателя – открытого конца воздуховода.

В вертикальном направлении фактор направления имеет форму конуса (рис. 1-в). В

$$0,5 \left[ \int_0^{20} 2k \cos 0,5\theta \sin \theta d\theta + \int_{20}^{180} k \cos 0,5\theta \sin \theta d\theta \right] = 1.$$

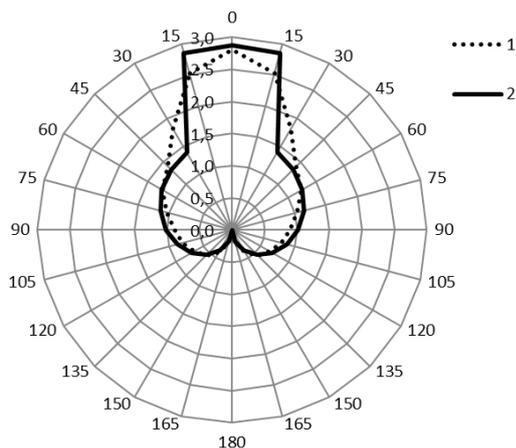


Рис. 3

На рис. 3 (фактор направленности открытого конца воздуховода, определенный: 1 – по экспериментальным данным; 2 – по результатам аппроксимации на основе (6)) показаны исходный и рассчитанный графики излучения звуковой энергии с открытым концом воздуховода. Следует отметить, что звуковая энергия, направленная вниз, обусловлена процессами дифракции звуковых волн.

К следующей группе точечных источников относятся проемы в ограждениях, через которые шум из помещения попадает в наружное пространство.

остальных направлениях распределение интенсивности излучения соответствует зависимости Ламберта (рис. 1-б).

Для фактора направленности в этом случае предлагается аналитическое выражение, которое представляет комбинацию идеальных моделей, показанных на рис. 1:

$$\Phi = \begin{cases} 2k \cos 0,5\theta & \text{при } \theta \leq 20^\circ, \\ k \cos 0,5\theta & \text{при } 20^\circ < \theta < 180^\circ. \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициент  $k=1,44$  находится из уравнения (2) после интегрирования выражения

Для оценки коэффициента направленности излучения шума через проем в ограждении произведены экспериментальные исследования. В качестве объекта исследования было выбрано соразмерное помещение с открытым проемом в ограждении. Размер проема составлял  $0,6 \times 0,6$  м. Измерения уровней звукового давления выполнялись в горизонтальной плоскости (на высоте 1,5 м от земли), проходящей через центр проема, в октавной полосе со среднегеометрической частотой 2000 Гц. На рис. 4-а показаны измеренные уровни звукового давления на расстоянии 2 м от проема по различным направлениям. Из рисунка видно, что диаграмма направленности такого точечного источника близка к круговой с равномерным излучением во всех направлениях. Однако наблюдаются более высокие значения уровней шума по оси проема. Уровни звукового давления здесь на 2,3 – 2,9 дБ выше. Рядом с ограждением происходит повышение уровня за счет отражения звуковой энергии от поверхности стены. (Рис. 4 – измеренные уровни шума (а) и фактор направленности открытого проема (б), определенный: 1 – по экспериментальным данным; 2 – рассчитанный на основе выражения (7)).

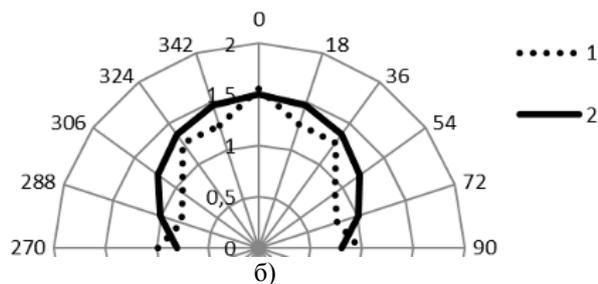
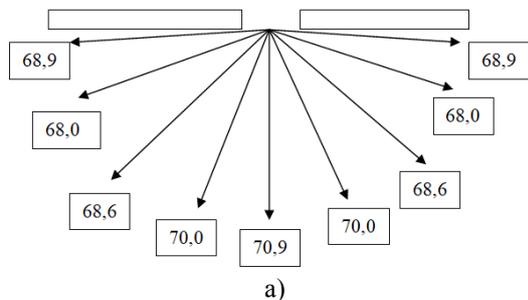


Рис. 4

Точки измерения уровней звукового поля находились в дальней от проема зоне при  $r = 2 \text{ м} > l_{\text{max}} = 1,2 \text{ м}$ . Поэтому проем в ограждении можно рассматривать как точечный источник звука. Для фактора направленности в этом случае предложена формула в виде комбинации равномерного излучения (рис. 1-а) и направленного излучения по закону Ламберта (рис. 1-б):

$$\Phi = 0,8 + 0,7 \cos \theta. \quad (7)$$

Коэффициенты распределения энергии между составляющими уравнения определены, исходя из условия максимального совпадения расчетных и экспериментальных данных. Графики фактора направленности для точечного открытого проема даны на рис. 4-б.

## ВЫВОДЫ

1. Уровни звукового давления, создаваемые точечными источниками, определяются его акустической мощностью, пространственным углом излучения звуковой энергии и фактором направленности излучения, который зависит от конструктивного решения источника.

2. Для определения фактора направленности следует использовать предложенную в статье методику, основанную на экспериментальном определении диаграммы направленности излучения звуковой энергии источником и последующей ее аппроксимации с целью получения формул, учитывающих конкретные особенности излучения звука испытуемым источником.

3. Полученные в работе формулы для нескольких типов точечных источников, характерных для промышленных предпри-

ятий, могут использоваться при оценке зашумления помещений в производственных зданиях и на прилегающих к зданиям территориях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В.П., Леденев В.И. Оценка шумового воздействия на окружающую среду вентиляционного оборудования, устанавливаемого на открытых площадках // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2014, № 3. С. 70...74.
2. Гусев В.П., Леденев В.И., Шубин И.Л. Оптимальная защита окружающей среды от шумового воздействия оборудования систем ОВК // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2014, № 3 (7). С. 32...42.
3. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound // Magazine of Civil Engineering. – 2018, № 1 (77). P. 13...22.
4. Tsukernikov I., Shubin I., Antonov A., Ledenev V., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // Procedia Engineering. Ser. "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". – 2017. P. 218...225.
5. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // Procedia Engineering. – 2017, №176. P. 218.
6. Гусев В.П., Антонов А.И., Жоголева О.А., Леденев В.И. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных помещениях с перегородками неполной высоты // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2. С.260...267.
7. Антонов А.И., Зубков А.Ф., Леденев В.И., Матвеева И.В. Метод расчета шума в плоских производственных помещениях с равномерно распределенным в них шумным оборудованием // Научный вестник Воронежского гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2016, № 4 (44). С.21...29.
8. Антонов А.И., Леденев В.И., Соломатин Е.О. Расчеты уровней прямого звука от линейных источ-

ников шума, располагающихся на промышленных предприятиях и в городской застройке // Вестник Волгоградского архитектур.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2013, № 31-1 (50). С.329...335.

9. Антонов А.И., Леденев В.И., Соломатин Е.О., Гусев В.П. Методы расчета уровней прямого звука, излучаемого плоскими источниками шума в городской застройке // Жилищное строительство. – 2013, № 6. С. 13...15.

10. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.Л. Оценка распространения прямого звука от звукоизолирующих ограждений технологического оборудования текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 4. С. 167...173.

11. Антонов А.И., Леденев В.И., Соломатин Е.О., Шубин И.Л. Расчет шума при проектировании звукоизолирующих кожухов технологического оборудования // Строительные материалы. – 2015, № 6. С.39...41.

12. Гусев В.П., Леденев В.И. Оценка звуковой мощности оборудования в вентиляционных камерах // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2009, № 3. С. 32.

13. Осипов Г.Л., Юдин Е.Ю., Хюбнер Г. и др. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Ю. Юдина. – М.: Стройиздат, 1987.

14. Гусев В.П., Леденев В.И., Лешко М.Ю. Расчет и проектирование шумоглушения систем вентиляции, кондиционирования воздуха, холодоснабжения и воздушного отопления // Справочное пособие к актуализированной редакции СНиП 23-03-2003. Защита от шума (СП 51.13330.2011). – М.: НИИ строительной физики РААСН, 2013.

## REFERENCES

1. Gusev V.P., Ledenev V.I. Otsenka shumovogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredy ventilyatsionnogo oborudovaniya, ustanavlivaemogo na otkrytykh ploshchadkakh // AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. – 2014, № 3. S. 70...74.

2. Gusev V.P., Ledenev V.I., Shubin I.L. Optimal'naya zashchita okruzhayushchey sredy ot shumovogo vozdeystviya oborudovaniya sistem OVK // Biosfer-naya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii. – 2014, № 3 (7). S. 32...42.

3. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound // Magazine of Civil Engineering. – 2018, № 1 (77). P. 13...22.

4. Tsukernikov I., Shubin I., Antonov A., Ledenev V., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // Procedia Engineering. Ser. "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics

and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". – 2017. P. 218...225.

5. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // Procedia Engineering. – 2017, №176. P. 218.

6. Gusev V.P., Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. Raschety shuma pri proektirovanii shumozashchity v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh s peregorodkami nepolnoy vysoty // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2017, № 2. S.260...267.

7. Antonov A.I., Zubkov A.F., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Metod rascheta shuma v ploskikh proizvodstvennykh pomeshcheniyakh s ravnomerno raspredelen-nyim v nikh shumnym oborudovaniem // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gos. arkhitekt.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura. – 2016, № 4 (44). S. 21...29.

8. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatin E.O. Raschety urovney pryamogo zvuka ot lineynykh istochnikov shuma, raspolagayushchikhsya na promyshlennykh predpriyatiyakh i v gorodskoy zastroyke // Vestnik Volgogradskogo arkhitekt.-stroit. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. – 2013, № 31-1 (50). S. 329...335.

9. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatin E.O., Gusev V.P. Metody rascheta urovney pryamogo zvuka, izluchaemogo ploskimi istochnikami shuma v gorodskoy zastroyke // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2013, № 6. S. 13...15.

10. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Otsenka rasprostraneniya pryamogo zvuka ot zvukoizoliruyushchikh ograzhdeniy tekhnologicheskogo oborudovaniya tekstil'noy i legkoy promyshlennosti // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2016, № 4. S. 167...173.

11. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatin E.O., Shubin I.L. Raschet shuma pri proektirovanii zvukoizoliruyushchikh kozhukhov tekhnologicheskogo oborudovaniya // Stroitel'nye materialy. – 2015, № 6. S. 39...41.

12. Gusev V.P., Ledenev V.I. Otsenka zvukovoy moshchnosti oborudovaniya v ventilyatsionnykh kamerakh // AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. – 2009, № 3. S. 32.

13. Osipov G.L., Yudin E.Yu., Khyubner G. i dr. Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh / Pod red. G.L. Osipova, E.Yu. Yudina. – М.: Stroyizdat, 1987.

14. Gusev V.P., Ledenev V.I., Leshko M.Yu. Raschet i proektirovanie shumoglusheniya sistem ventilyatsii, konditsionirovaniya vozdukha, kholodosnabzheniya i vozdushnogo otopleniya // Spravochnoe posobie k aktualizirovannoy redaktsii SNiP 23-03-2003. Zashchita ot shuma (SP 51.13330.2011). – М.: НИИ строительной физики РААСН, 2013.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 18.06.19.