

УДК 534.2

**РАСЧЕТЫ ШУМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ШУМОЗАЩИТЫ
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ
С ПЕРЕГОРОДКАМИ НЕПОЛНОЙ ВЫСОТЫ**

**NOISE CALCULATIONS FOR DESIGNING NOISE PROTECTION
IN INDUSTRIAL SPACES
WITH PARTITIONS OF INCOMPLETE HEIGHT**

*В.П. ГУСЕВ, А.И. АНТОНОВ, О.А. ЖОГОЛЕВА, В.И. ЛЕДЕНЕВ
V.P. GUSEV, A.I. ANTONOV, O.A. ZHOGOLEVA, V.I. LEDENEV*

**(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: gsiad@mail.tambov.ru**

В производственных помещениях для разделения технологических процессов устраивают перегородки неполной высоты. Их наличие существенно влияет на распространение в помещениях шума, возникающего при работе технологического оборудования. Для оценки уровней шума и разработки мер по его снижению необходим метод расчета, учитывающий условия распространения шума в таком сложном акустическом пространстве и адекватно реагирующий на изменение его параметров. В статье предлагается

комбинированная расчетная модель, позволяющая оценивать шумовой режим в помещениях с перегородками неполной высоты как в едином акустическом пространстве. Модель и ее компьютерная реализация позволяют проводить оценку акустической эффективности средств снижения шума в таких помещениях. Экспериментальная проверка подтверждает достаточную для практики точность расчетной модели.

In partitions for partitions of technological processes, partitions of incomplete height are arranged in production rooms. Their presence significantly influences the propagation in the rooms of noise generated by the operation of technological equipment. To estimate noise levels and develop measures to reduce it, a calculation method is needed that takes into account the propagation of noise in such a complex acoustic space and adequately responds to changes in its parameters. The paper proposes a combined calculation model that makes it possible to estimate the noise regime in rooms with partitions of incomplete height both in a single acoustic space. The model and its computer implementation make it possible to evaluate the acoustic efficiency of noise reduction facilities in such rooms. The experimental verification confirms the accuracy of the calculation model that is sufficient for practice.

Ключевые слова: производственные помещения, шумовой режим, методы расчета шума, перегородки неполной высоты.

Keywords: production facilities, noise mode, noise calculation methods, partition height partitions.

В производственных помещениях для разделения отдельных технологических процессов, например, с шумными технологическими процессами, устраивают перегородки неполной высоты. В этом случае формирующаяся в выделенных объемах с источником шума звуковая энергия, распространяясь в общем воздушном пространстве над перегородками, зашумляет соседние с ними объемы. Снижение шума при таком распределении звуковой энергии обеспечивается за счет выбора планировочных решений выгородок и устройства звукопоглощающих облицовок. Для оценки акустической эффективности применяемых мер снижения шума необходимо иметь методы расчета воздушного шума, разработанные исходя из представлений о распределении звуковой энергии в помещениях с перегородками неполной высоты как в едином акустическом пространстве. В статье приводится такой метод расчета и даются результаты его экспериментальной проверки.

Выполненный анализ существующих расчетных моделей показывает, что наиболее приемлемой для данного случая явля-

ется комбинированная расчетная модель, позволяющая проводить расчеты в крупногабаритных каналах, в помещениях сложных форм, при отсутствии и наличии в них крупногабаритного оборудования, при сложном зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений. Расчеты в этих случаях осуществляются численными методами [1...5].

Уровни звукового давления в выделенных перегородками объемах помещения при наличии в них источников шума определяются по формуле:

$$L_i = 10 \lg[(\epsilon_i^{пр} + \epsilon_i^3 + \epsilon_i^д)с / I_0], \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости; $с$ – скорость звука; $\epsilon_i^{пр}$, ϵ_i^3 , $\epsilon_i^д$ – плотности прямой звуковой энергии, зеркальной и диффузно-рассеянной составляющих отраженной энергии в i -й расчетной точке выделенного объема.

В объемах без источников уровни определяются только составляющими отраженной звуковой энергии.

Для определения составляющих формулы (1) нами предлагается использовать расчетную модель, суть которой заключается в следующем.

Все отдельные объемы и общее воздушное пространство помещения с перегородками неполной высоты делятся на элементарные объемы (рис. 1 – схема разбиения системы на элементарные объемы). При разделении учитываются положение и размеры перегородок между отдельными объемами и размеры общего воздушного пространства.

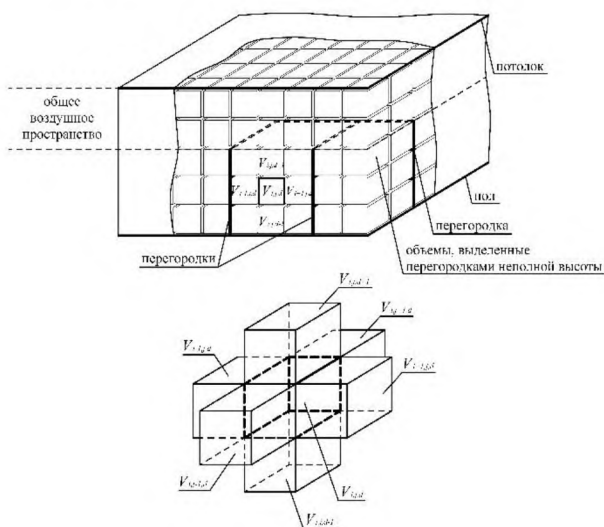


Рис. 1

Далее принимается, что из источника шума в соответствии с его диаграммой направленности вероятностным образом излучается определенное количество лучей, каждый из которых несет часть звуковой энергии источника. Каждый луч прослеживается до встречи с поверхностью ограждения. При отражении от поверхности одна часть сохранившейся после поглощения энергии отражается по зеркальному закону, а другая часть отражается диффузно по закону Ламберта. Отразившаяся зеркально энергия прослеживается до следующего акта отражения, при котором после отражения опять происходит переход части зеркальной энергии в диффузную. Каждый луч прослеживается до тех пор, пока полностью потеряет энергию за счет поглощения на поверхностях, затухания в воздухе и перехода части зеркальной энер-

гии в диффузную. Таким образом, прослеживаются все исходящие из источника лучи. После этого производится суммирование зеркально отраженной энергии всех лучей, прошедших через расчетную точку. Распределение энергии лучей, перешедшей в диффузно отраженную энергию, оценивается численным методом, основанным на статистическом энергетическом подходе. Ниже рассмотрены принципы построения расчетных методов, входящих в комбинированную модель, и методики их использования при оценке шума в помещениях с перегородками неполной высоты.

Для оценки плотности прямой звуковой энергии $\epsilon_i^{пр}$ и плотности зеркально отраженной энергии ϵ_i^3 в расчетной модели используется метод прослеживания звуковых лучей (ray tracing).

В этом случае звуковая мощность, переносимая прямым звуком от всех k -х лучей, прошедших через i,j,d -й элементарный объем, находящийся в прямой видимости источника шума, определяется по формуле:

$$W_{i,j,d}^{пр} = \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{k,i,j,d}) \quad (2)$$

и плотность энергии прямого звука определяется как

$$\epsilon_{i,j,d}^{пр} = W_{i,j,d}^{пр} / cS_{пр} \quad (3)$$

В формулах (2) и (3): $S_{пр}$ – приведенная площадь сечения i,j,d -го объема, равная площади поперечного сечения сферы, одинаковой по объему с i,j,d -м объемом; W – общая мощность источника; N – количество лучей, исходящих из источника; K – общее количество лучей, прошедших через i,j,d -й объем; $R_{k,i,j,d}$ – расстояние, прошедшее k -м прямым лучом до i,j,d -го объема; m_b – коэффициент пространственного затухания звуковой энергии в воздухе.

Для зеркально отраженной энергии звуковая мощность, переносимая звуковыми лучами, прошедшими через i,j,d -й объем, определяется как

$$W_{i,j,d}^3 = \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp\left(-m_b R_{ki,j,d}\right) \prod_{p=1}^P \left[(1 - \alpha_p) \xi_{\Sigma p} \right]^{D_{kp}}, \quad (4)$$

где $R_{ki,j,d}$ – расстояние, прошедшее k -м зеркально отраженным лучом от первого отражения до прихода в расчетный i,j,d -й объем; P – общее число актов отражения k -го луча от всех отражающих поверхностей, встречающихся на его пути в процессе его прохождения до i,j,d -го объема; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности, на которую падает прослеживаемый луч; D_{kp} – число актов падения k -го луча на p -ю поверхность при его распространении на расстояние $R_{ki,j,d}$; ξ_p – доля энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от p -й поверхности ограждения.

Величина зеркально отраженной энергии в i,j,d -м объеме равна сумме энергий от-

раженных лучей K , проходящих через него. Плотность ее определяется как

$$\varepsilon_{i,j,d}^3 = W_{i,j,d}^3 / cS_{np}. \quad (5)$$

Расчет диффузно отраженной энергии выполняется численным статистическим энергетическим методом, суть которого заключается в составлении уравнений баланса диффузно отраженной энергии для каждого i, j, d -го объема и решения полученной системы уравнений.

Баланс отраженной энергии для каждого i,j,d -го элементарного объема с учетом поглощения звука в воздухе в общем виде записывается как

$$\sum_{d=1}^n q_n S_n + \sum_{m=1}^{6-N} W_m^d - \sum_{m=1}^{6-N} q_{(\alpha)_m} S_m - cm_b \varepsilon_{i,j,d}^d V_{i,j,d} = 0. \quad (6)$$

Здесь q_n – плотности потоков энергии между i, j, d -м объемом и соседними контактирующими с ним объемами через поверхности S_n ; W_m^d – диффузная энергия, приходящая в i,j,d -й объем после отражения лучей от m -й поверхности i, j, d -го объема площадью S_m , являющейся поверхностью помещения и перегородок; $q_{(\alpha)_m}$ – плотность потока диффузной энергии, поглощаемой на m -й поверхности S_m i, j, d -го объема; N – количество объемов, контактирующих с i, j, d -м объемом; $6-N$ – количество граней i, j, d -го объема, являющихся поверхностями ограждений; $V_{i,j,d}$ – объем i, j, d -го элемента; $\varepsilon_{i,j,d}^d$ – плотность диффузно отраженной энергий в i, j, d -м объеме.

Плотности потоков энергии q_n определяются как

$$q_n = -\eta(\varepsilon_{i,j,d}^d - \varepsilon_n^d) / h_n, \quad (7)$$

где $\eta = 0,5c\ell_{cp}$ – коэффициент связи между плотностью потока q и градиентом плотности звуковой энергии ε в квазидиффузном звуковом отраженном звуковом поле [6]; ℓ_{cp} – средняя длина свободного пробега диффузно отраженных звуковых лучей, определяемая по классической формуле Сэбина для выделенного перегородками объема и прилегающего к нему объема общего воздушного пространства; $\varepsilon_n^d = \{\varepsilon_{i-1,j,d}^d; \varepsilon_{i+1,j,d}^d; \varepsilon_{i,j-1,d}^d; \varepsilon_{i,j+1,d}^d; \varepsilon_{i,j,d-1}^d; \varepsilon_{i,j,d+1}^d\}$; h_n – размер граней i,j,d -го объема в направлении контактирующих с ним n -х объемов.

При наличии между соседними элементарными объемами перегородки, разделяющей отдельные выделенные объемы помещения, например, между объемами $V_{i,j,d}$ и $V_{i+1,j,d}$, плотности потоков определяются между ними как

$$q = (\eta_{i,j,d} \varepsilon_{i,j,d} - \eta_{i+1,j,d} \varepsilon_{i+1,j,d}) \tau_{i,j,d} / h_{i,j,d}, \quad (8)$$

где $\eta_{i,j,d} = 0,5c\ell_{cpi,j,d}$; $\eta_{i+1,j,d} = 0,5c\ell_{cpi+1,j,d}$; $\ell_{cpi,j,d}$, $\ell_{cpi+1,j,d}$ – средние длины пробегов лучей в выделенных перегородками объемах помещения, к которым принадлежат смежные объемы $V_{i,j,d}$ и $V_{i+1,j,d}$; $\tau_{i,j,d}$ – коэффициент звукопроницаемости перегородки, разделяющей выделенные объемы.

Величина плотности потоков $Q_{(\alpha)_m}$ вычисляется по формуле:

$$Q_{(\alpha)_m} = \frac{\alpha_m c \epsilon_{i,j,d}^A}{2(2 - \alpha_m)}, \quad (9)$$

где α_m – коэффициент звукопоглощения m -й поверхности i, j, d -го объема.

Величина W_m^A определяется суммой энергий лучей, перешедших в диффузную энергию при отражении лучей от m -й поверхности i, j, d -го объема, являющейся частью ограждения:

$$W_m^A = (1 - \alpha_m)(1 - \xi_m) \left[\sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{ki,j,d}) \cos \theta_{mi,j,d} + \sum_{k=1}^K \frac{W}{N} \exp(-m_b R_{ki,j,d}) \prod_{p=1}^P [(1 - \alpha_p) \xi_p]^{D_{kp}} \cos \theta_{mi,j,d} \right], \quad (10)$$

где K – количество прямых лучей или зеркально отраженных лучей, упавших на m -ю поверхность i, j, d -го объема, являющейся поверхностью ограждения; ξ_m – доля зеркальной энергии, направляемая по k -му лучу после его отражения от m -й поверх-

ности ограждения в i, j, d -м объеме; $\theta_{mi,j,d}$ – угол падения k -го луча на m -ю поверхность в i, j, d -м объеме.

С целью реализации предложенной расчетной модели разработана компьютерная программа [7].

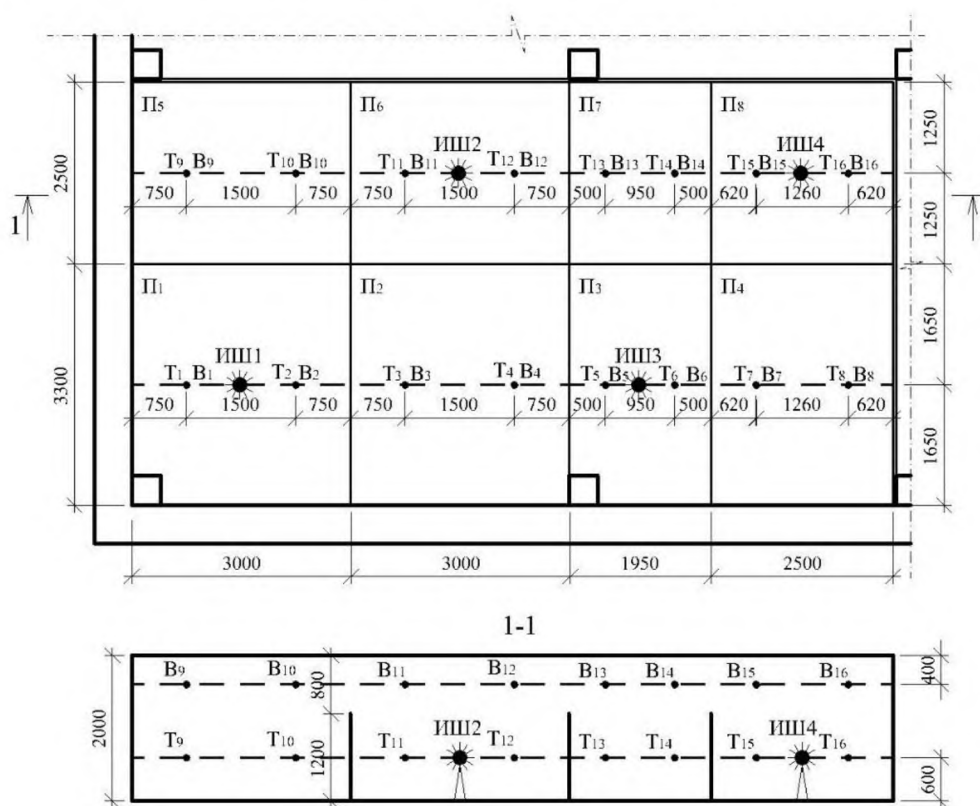


Рис. 2

Для оценки точности расчетной модели проведены экспериментальные исследования. Исследования выполнены в помещении, пространство которого разделено перегородками неполной высоты на 8 объемов с разными планировочными параметрами. Стены, пол и потолок в помещении бетонные, перегородки из гипсокартонных плит. Схема помещения приведена на рис. 2 (схема помещения с перегородками неполной высоты с указанием положения расчетных точек (Т, В) и положений источника шума (ИШ)). На схеме показаны положения источника, нижних и верхних точек измерения.

Шумовой режим в помещении создавался источником звука OED-SP-012-600. Измерения шума проводили шумомером ЭКОФИЗИКА-110А. Средние коэффициенты звукопоглощения помещения получены на основании измеренных значений времени реверберации.

В целом сравнение расчетных и экспериментальных данных для всех серий измерений показало, что расхождения между ними не превышают $\pm 2...3$ дБ. При этом расчетная модель адекватно реагирует на изменение параметров в системе.

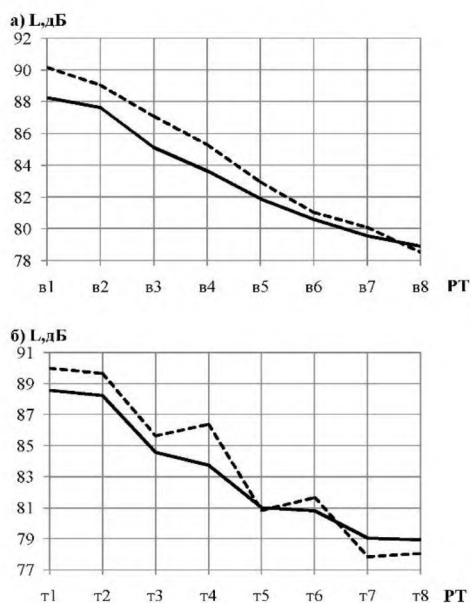


Рис. 3

На рис. 3 (измеренные (---) и рассчитанные (—) уровни звукового давления в верх-

ней части помещения (а) и нижней разделенной перегородками части (б); источник в точке ИШ1) в качестве примера приведены результаты сравнительного анализа для октавной полосы частот с $f_{cp} = 2000$ Гц. Средний коэффициент звукопоглощения для этой полосы частот по данным измерений времени реверберации равен $\bar{\alpha} = 0,11$.

В результате анализа полученных расчетных и экспериментальных данных установлено, что уровни шума существенно различаются между собой в отдельных разделенных перегородками объемах (рис. 3-б). В то же время спад отраженной энергии в верхней части объема соответствует характерным спадам для плоских помещений (рис. 3-а). При выполнении серий расчетов также установлено, что при использовании комбинированной расчетной модели величину коэффициента ξ следует принимать равной 0,8.

В процессе экспериментов исследовано влияние на распространение звуковой энергии в таких помещениях устройства звукопоглощения на потолке. Данные эксперимента и расчетов показали, что при размещении звукопоглощения над участком с источником шума происходит примерно равное снижение шума за счет звукопоглощения на всех участках помещения. В случае размещения звукопоглощения не над источником шума снижение шума имеет локальный характер. Поэтому место размещения звукопоглощения должно определяться конкретно для каждой ситуации. На стадии проектирования его эффективность может быть определена расчетом по предложенной методике с использованием разработанной компьютерной программы.

ВЫВОДЫ

1. В помещениях, общий объем которых делится на отдельные объемы перегородками неполной высоты, расчет воздушного шума следует проводить как в едином акустическом пространстве.

2. Для расчета следует использовать комбинированную расчетную модель, в которой зеркальная и диффузная составляю-

щие отраженной звуковой энергии определяются раздельно. Для расчета зеркальной составляющей используется метод прослеживания лучей, а для диффузной – численный статистический энергетический метод.

3. Для практических расчетов при проектировании выгородок и средств снижения шума разработана компьютерная программа, реализующая предложенную расчетную модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В.П., Леденев В.И., Солодова М.А., Соломатин Е.О. Комбинированный метод расчета уровней шума в крупногабаритных газоздушных каналах // Вестник МГСУ. – 2011, № 3-1. С.33...38.

2. 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.

3. Леденев В.И., Макаров А.М. Расчет энергетических параметров шумовых полей в производственных помещениях сложной формы с технологическим оборудованием // Научный вестник Воронежского гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2008, №2. С.94...101.

4. Антонов А.И., Леденев В.И., Соломатин Е.О. Комбинированный метод расчета шумового режима в производственных зданиях теплоэлектроцентралей // Научный вестник Воронежского гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011, №2. С.16...24.

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. – 176 (2017). P. 218...225.

6. Леденев В.И. Физико-технические основы распространения воздушного шума в производственных зданиях: Дис...докт. техн. наук. – Тамбов, 2000.

7. Антонов А.И., Жоголева О.А., Леденев В.И. Расчет трехмерных шумовых полей в помещениях с акустическими экранами и перегородками неполной высоты // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – Заявка №2016614938; дата поступления 16.05.2016.

REFERENCES

1. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solodova M.A., Solomatina E.O. Kombinirovannyj metod rascheta urovnej shuma v krupnogabaritnyh gazovozdushnyh kanalakh // Vestnik MGSU. – 2011, № 3-1. S.33...38.

2. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I., Solomatina E.O. Metod ocenki rasprostraneniya shuma po vozdušnym kanalam sistem otopleniya, ventiljacii i kondicionirovaniya // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2012, №6. S.52...54.

3. Ledenev V.I., Makarov A.M. Raschet jenergetičeskikh parametrov шумовых полей v proizvodstvennyh pomeshhenijah slozhnoj formy s tehnologičeskim oborudovaniem // Nauchnyj vestnik Voronežskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2008, №2. S.94...101.

4. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatina E.O. Kombinirovannyj metod rascheta шумового rezhima v proizvodstvennyh zdaniyah teplojelektrocentralej // Nauchnyj vestnik Voronežskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2011, №2. S.16...24.

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. – 176 (2017). P. 218...225.

6. Ledenev V.I. Fiziko-tehnicheskie osnovy rasprostraneniya vozdušnogo shuma v proizvodstvennyh zdaniyah: Dis...dokt. tehn. nauk. – Tambov, 2000.

7. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. Raschet trehmernyh шумовых полей v pomeshhenijah s akustičeskimi jekranami i peregorodkami nepolnoj vysoty // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM – Zajavka №2016614938; data postuplenija 16.05.2016.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ
РААСН. Поступила 03.04.17.