

УДК 697.922

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

**METHODOLOGY OF ASSESSMENT OF SOUND ABSORPTION COEFFICIENTS
IN INDUSTRIAL SPACES WITH TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

В.И. ЛЕДЕНЕВ, А.М. МАКАРОВ, И.В. МАТВЕЕВА, И.Л. ШУБИН
V.I. LEDENEV, A.M. MAKAROV, I.V. MATVEEVA, I.L. SHUBIN

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

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Building Sciences)
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Размещаемое в производственных помещениях технологическое оборудование оказывает влияние на формирование шумового режима. Наличие оборудования приводит к дополнительному рассеиванию звуковой энергии. В результате этого уменьшаются длины среднего свободного пробега звуковых лучей. Данное обстоятельство в свою очередь приводит к изменению средних коэффициентов звукопоглощения помещения, что в конечном итоге оказывает влияние на распределение отраженной звуковой энергии. В статье приводятся методика определения средних коэффициентов звукопоглощения в производственных зданиях с технологическим оборудованием на основе компьютерных технологий, а также формулы для расчета коэффициентов звукопоглощения в помещениях с рассеивателями.

The technological equipment placed in the production facilities influences the formation of the noise regime. The presence of equipment leads to an additional dissipation of sound energy. As a result, the average mean free path of the sound rays is reduced. This circumstance in turn leads to a change in the average coefficients of sound absorption of the room, which ultimately affects the distribution of reflected sound energy. The article provides a technique for determining average sound absorption coefficients in industrial buildings with technological equipment

based on computer technologies, as well as formulas for calculating the sound absorption coefficients in rooms with scatterers.

Ключевые слова: шумовой режим, звукопоглощение помещений, длина пробега звуковых лучей, время реверберации, технологическое оборудование.

Keywords: noise regime, sound absorption of rooms, length of run of sound beams, reverberation time, technological equipment.

Обеспечение нормального шумового режима в производственных помещениях является задачей, решение которой должно выполняться на всех стадиях проектирования производственных зданий, а также при реконструкции действующих производств. Для снижения шума разработаны различные методы и средства и в том числе строительно-акустические меры. Среди них широкое применение имеют звукопоглощающие облицовки. Оценка эффективности снижения шума звукопоглощением производится путем сравнения результатов расчета уровней шума до и после устройства облицовок. Точность расчетов зависит от достоверности сведений об используемых при расчетах коэффициентах звукопоглощения помещений. Производственные помещения, как правило, заполнены технологическим оборудованием, которое рассеивает и частично поглощает излучаемую источником шума звуковую энергию [1], [2]. Наличие оборудования приводит к изменению длин пробега звуковых лучей в помещениях, времени реверберации и, как следствие, звукопоглощающих характеристик помещения. Неучет изменений звукопоглощения может приводить к снижению точности расчетов. В статье дана методика оценки акустических характеристик помещений при наличии в них технологического оборудования и других рассеивающих звук предметов.

В производственных помещениях отражение звуковой энергии от ограждений и оборудования имеет диффузный характер. В этом случае для расчетов энергетических характеристик шума используются методы, основанные на положениях статистической теории акустики и статистического энергетического подхода [3], [4]. В их расчетные

модели входит статистический параметр отраженного звукового поля – средняя длина свободного пробега звуковых лучей, зависящий от планировочных параметров помещения и наличия в нем рассеивателей звука [5]. При расчетах используются также диффузные коэффициенты звукопоглощения, для определения которых необходимы данные о средних длинах пробега лучей и о времени реверберации.

Средняя длина пробега и время реверберации являются величинами, зависящими от большого количества факторов. Для оценки их влияния на длину пробега и время реверберации разработаны методики, обеспечивающие возможность исследования указанных параметров в квазидиффузном звуковом поле при диффузном характере отражения звука. Для ее реализации разработана компьютерная программа. Программа позволяет на основе метода прослеживания лучей определять энергетические характеристики отраженного звукового поля и находить время реверберации и длину среднего пробега при отсутствии и наличии в помещении рассеивателей. Программа состоит из двух модулей по расчету средней длины свободного пробега лучей и определению времени реверберации. При вычислении средней длины учитывается их реальное энергетическое состояние. Методика такого подхода изложена в [6]. В модуле по определению времени реверберации осуществляется вычисление энергетических параметров отраженного звукового поля после отключения источника шума и установление времени затухания отраженной энергии на 60 дБ относительно первоначального уровня.

Исследования проводили в помещениях различных пропорций.

Установлено, что при диффузном характере отражения и изотропном распределении лучей расчетная длина среднего пробега $\ell_{\text{ср.гау}}$ в пустых помещениях может незначительно отличаться от длины пробега, определяемой по классической формуле:

$$\ell_{\text{ср}} = 4V/S_{\text{огр}}, \quad (1)$$

где V и $S_{\text{огр}}$ – объем и площадь ограждений помещения.

Расчеты показали, что в пустых помещениях величина $\ell_{\text{ср.гау}}$ отличается от $\ell_{\text{ср}}$ не более чем на $\pm 5\%$, независимо от расположения источника и величины звукопоглощения ограждений. Следовательно, в этом случае в расчетных методах можно использовать длину $\ell_{\text{ср}}$, определяемую по формуле (1).

В помещениях с рассеивателями (технологическим оборудованием) длина среднего свободного пробега $\ell_{\text{ср.гау}}^P$ зависит от рассеивателей, звукопоглощения потолка, пропорций помещения, места размещения источника и может существенно (на 20...30%) отличаться от длины $\ell_{\text{ср}}$. На основании расчетов $\ell_{\text{ср.гау}}^P$ установлено, что при диффузном характере отражения звука от ограждений и рассеивателей (технологического оборудования) длину можно определять по формуле:

$$\ell_{\text{ср}}^P = 4k(V - V_{\text{рас}}) / (S_{\text{огр}} + S_{\text{рас}}), \quad (2)$$

где $V_{\text{рас}}$ и $S_{\text{рас}}$ – объем и площадь поверхностей рассеивателей, размещенных в помещении; k – коэффициент, учитывающий влияние пропорций помещений на длину пробега. Для соразмерных и плоских помещений $k = 1,03$, а для длинных – зависит от места положения источника: у торца $k = 0,97$, в центре $k = 1,03$. Расхождения между расчетной величиной $\ell_{\text{ср.гау}}^P$ и длиной $\ell_{\text{ср}}^P$ не превышают $\pm 3\%$. Пример изменений длины пробега в плоском помещении дан на рис. 1 (зависимость средней длины свободного пробега в плоском помещении размерами $36 \times 36 \times 6$ м от коэффициента звукопоглощения потолка ($\alpha_{\text{пот}}$) и количества

рассеивателей ($N_{\text{рас}}$). Видно, что звукопоглощение потолка не оказывает существенного влияния на изменение $\ell_{\text{ср.гау}}^P$. С ростом количества рассеивателей это влияние уменьшается еще больше, а точность формулы (2) возрастает.

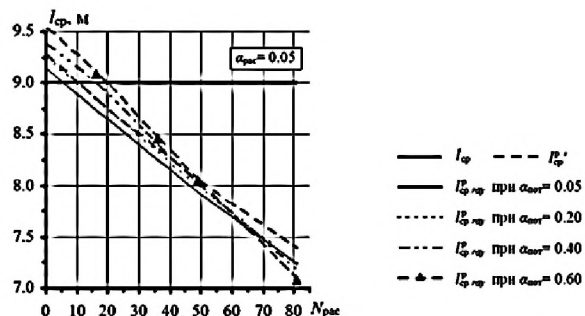


Рис. 1

Время реверберации помещений зависит от их объемно-планировочных и акустических параметров, а также от количества и звукопоглощающих свойств рассеивателей, находящихся в помещении. Факторы действуют комплексно и потому трудноразделимы. Для выявления наиболее значимых из них произведен регрессионный анализ результатов математического моделирования акустических процессов в помещениях с рассеивателями [7]. Установлено, что наибольшее влияние на время реверберации оказывает звукопоглощение потолка. При этом его влияние неодинаково. При изменении $\alpha_{\text{пот}}$ от 0,03 до 0,60 происходит значительное уменьшение времени, а при дальнейшем росте $\alpha_{\text{пот}}$ оно практически перестает изменяться. Влияние $\alpha_{\text{пот}}$ зависит от количества и звукопоглощения рассеивателей. С ростом $\alpha_{\text{рас}}$ наблюдается незначительное уменьшение времени реверберации. В свою очередь, рост количества рассеивателей приводит к увеличению времени при малых коэффициентах $\alpha_{\text{пот}}$ и практически перестает влиять на него при $\alpha_{\text{пот}} > 0,3$. В целом установлено, что для уменьшения гулкости помещений с оборудованием можно принимать звукопоглощающие облицовки с коэффициентом $\alpha_{\text{пот}} < 0,6$. Дальнейшее повышение $\alpha_{\text{пот}}$ для этой цели нецелесообразно. Это обстоятельство

позволяет использовать более широкий набор звукопоглощающих конструкций.

Основываясь на результатах регрессионного анализа, проведены исследования влияния наиболее значимых параметров на время реверберации и дана оценка применимости формулы Эйринга для расчета времени реверберации в помещениях с рассеивателями. Расчеты времени T_{ray}^p сравнивались с расчетами по формуле Эйринга без учета рассеивателей:

$$T = 0,041 \ell_{\text{cp}} / (-\ln(1 - \alpha_{\text{cp}})) \quad (3)$$

и с учетом влияния рассеивателей на длину среднего пробега лучей

$$T^p = 0,041 \ell_{\text{cp}}^p / (-\ln(1 - \alpha_{\text{cp}}^p)) \quad (4)$$

Здесь ℓ_{cp} и ℓ_{cp}^p – длины, определяемые по формулам (1) и (2); α_{cp} и α_{cp}^p – коэффициенты звукопоглощения помещения, определяемые как:

$$\alpha_{\text{cp}} = (\sum_i \alpha_i S_i + \alpha_{\text{рас}} S_{\text{рас}}) / S_{\text{отр}}, \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{cp}}^p = (\sum_i \alpha_i S_i + \alpha_{\text{рас}} S_{\text{рас}}) / S_{\text{общ}}; \quad (6)$$

α_i , S_i , $\alpha_{\text{рас}}$, $S_{\text{рас}}$ – коэффициенты звукопоглощения и площади ограждений помещения и рассеивателей; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь ограждений и рассеивателей.

Установлено, что время реверберации, вычисленное по формулам (3) и (4), оказывается ниже времени T_{ray}^p . Наибольшие расхождения наблюдаются в незаглушенных помещениях при большом количестве рассеивателей и высоких коэффициентах $\alpha_{\text{рас}}$. Расхождения могут составлять 8...15%. При этом большие расхождения наблюдаются между T_{ray}^p и T . Для повышения точности формулы (4) проведена ее корректировка. Формула имеет вид:

$$T^p = 1,1 \exp(-0,1 \alpha_{\text{пот}}) 0,041 \ell_{\text{cp}}^p / (-\ln(1 - \alpha_{\text{cp}}^p)) \quad (7)$$

Исследована зависимость времени реверберации от расстояния между источником звука и местом определения времени в помещениях с рассеивателями. Установлено, что время мало зависит от положения расчетной точки и этим фактором при расчетах можно пренебречь.

Существует мнение о том, что размещаемое в помещениях оборудование имеет более высокие звукопоглощающие характеристики, чем они могут быть у его материалов. Для исследования реального звукопоглощения оборудования и его влияния на звукопоглощение помещения разработана методика, основанная на реверберационном подходе, суть которого заключается в компьютерном определении в помещении с рассеивателями времени реверберации T_{ray}^p и длины пробега $\ell_{\text{cp.ray}}^p$ и последующем вычислении коэффициента звукопоглощения помещения $\alpha_{\text{cp.ray}}^p$ по формуле:

$$T_{\text{ray}}^p = 0,041 \ell_{\text{cp.ray}}^p / (-\ln(1 - \alpha_{\text{cp.ray}}^p)) \quad (8)$$

При анализе влияния оборудования на средние коэффициенты звукопоглощения сравнивались значения коэффициентов $\alpha_{\text{cp.ray}}^p$, определяемых из формулы (8), со значениями коэффициентов, вычисленных по формулам (5) и (6) – α_{cp} и α_{cp}^p , и с коэффициентами, определяемыми из формул (3) и (4) – $\alpha_{\text{cp(3)}}$ и $\alpha_{\text{cp(4)}}^p$. Сравнения выполнялись в помещениях разных пропорций при различном количестве в них рассеивателей с разными коэффициентами $\alpha_{\text{рас}}$. Пример с равнения дан на рис. 2 (средние коэффициенты звукопоглощения в плоском помещении размерами 36×36×6 м с рассеивателями при различных коэффициентах звукопоглощения потолка ($\alpha_{\text{пот}}$). Установлено, что наибольшие расхождения (10...20%) с расчетной величиной $\alpha_{\text{cp.ray}}^p$ имеют коэффициенты α_{cp} и $\alpha_{\text{cp(3)}}$, а наиболее близки к $\alpha_{\text{cp.ray}}^p$ значения $\alpha_{\text{cp(4)}}^p$ (расхождения менее 5%).

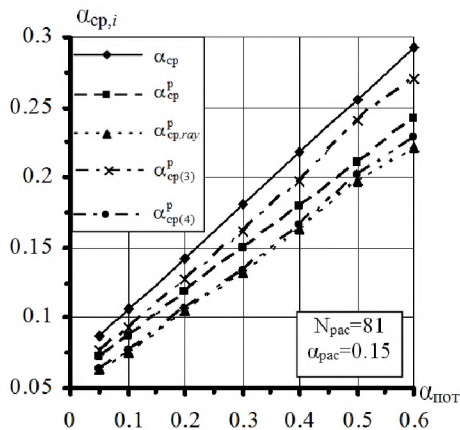


Рис. 2

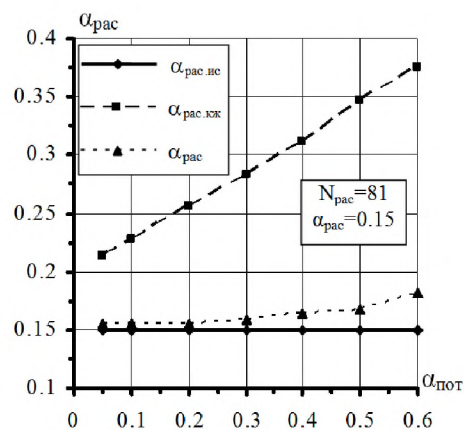


Рис. 3

Выполненные исследования показали, что увеличения звукопоглощения помещения на величину, большую, чем $\alpha_{рас} S_{рас}$, не наблюдается, то есть звукопоглощение оборудования соответствует звукопоглощению его поверхностей. Следовательно, в качестве расчетных коэффициентов $\alpha_{рас}$ необходимо принимать коэффициенты звукопоглощения поверхностей оборудования.

Кажущийся более высоким рост звукопоглощения связан с увеличением количества актов поглощения энергии за счет уменьшения средней длины пробега лучей. Неучет уменьшения средней длины пробега приводит к существенному кажущемуся росту коэффициента звукопоглощения оборудования $\alpha_{рас,экв}$. При учете изменения длины пробега расчетная величина $\alpha_{рас}$ близка к его истинному значению $\alpha_{рас,ис}$. Пример соотношения значений $\alpha_{рас,экв}$, $\alpha_{рас}$ и $\alpha_{рас,ис}$ дан на рис. 3 (коэффициенты звукопоглощения рассеивателей в плоском помещении размерами $36 \times 36 \times 6$ м при различных коэффициентах звукопоглощения потолка ($\alpha_{пот}$)).

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, на стадии проектирования в производственных зданиях звукопоглощающих облицовок при оценке среднего коэффициента звукопоглощения помещения с технологическим оборудованием следует использовать формулу (8), подставляя в нее значения времени реверберации и длины среднего пробега

звуковых лучей, определяемые методом прослеживания лучей.

2. При большом количестве рассеивателей с достаточной для практики точностью с целью расчета среднего коэффициента звукопоглощения помещения можно также использовать формулу (7). В этом случае длина среднего свободного пробега ℓ_{cp}^p может определяться по формуле (2).

3. При экспериментальном определении среднего коэффициента звукопоглощения в качестве T^p в формуле (7) должна использоваться измеренная величина времени $T_{изм}^p$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крышов С.И., Макаров А.М., Демин О.Б. Пространственное затухание и рассеяние звуковой энергии в производственных помещениях на рассеивающем звук оборудовании // Academia. Архитектура и строительство. – 2009, № 5. С.196...199.
2. Макаров А.М., Демин О.Б., Дидицкий В.А. Влияние рассеивающего звук оборудования на звукопоглощающие характеристики помещений // Academia. Архитектура и строительство. – 2010, № 3. С. 219...222.
3. Соломатин Е.О., Антонов А.И., Леденев В.И., Гусев В.П. Метод оценки шумового режима в производственных помещениях энергетических объектов // Academia. Архитектура и строительство. – 2009, № 5. С. 250...252.
4. Леденев В.И., Антонов А.И., Жданов А.Е. Статистические энергетические методы расчета отраженных шумовых полей помещений // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2003, Т. 9, № 4. С.713...717.
5. Гиясов Б.И., Леденев В.И., Макаров А.М. Компьютерный анализ влияния технологического

оборудования на акустические характеристики производственных помещений // Вестник МГСУ. – 2012, № 11. С. 271...277.

6. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Acoustic Characteristics Analysis of Industrial Premises with Process Equipment // Journal of Applied Mathematics and Physics. – V.4, 2016. P.206...210

7. Езерский В.А., Макаров А.М. Анализ времени реверберации производственных помещений с рассеивающими звук предметами // Научный вестник Воронежского гос. архитектур.-строит. ун-та: Строительство и архитектура. – 2008, № 2. С. 102...109.

REFERENCES

1. Kryshov S.I., Makarov A.M., Demin O.B. Prostranstvennoe zatuhanie i rassejanie zvukovoj jenerгии v proizvodstvennyh pomeshhenijah na rasseivajushhem zvuk oborudovanii // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2009, № 5. S. 196...199.

2. Makarov A.M., Demin O.B., Didickij V.A. Vlijanie rasseivajushhego zvuk oborudovanija na zvukopogloshhajushhie karakteristiki pomeshhenij // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2010, № 3. S.219...222.

3. Solomatin E.O., Antonov A.I., Ledenev V.I., Gusev V.P. Metod ocenki shumovogo rezhima v

proizvodstvennyh pomeshhenijah jenergeticheskikh ob'ektov // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2009, № 5. S. 250...252.

4. Ledenev V.I., Antonov A.I., Zhdanov A.E. Statisticheskie jenergeticheskie metody rascheta otrazhennyh shumovyh polej pomeshhenij // Vestnik Tambovskogo gos. tehn. un-ta. – 2003, T. 9, № 4. S.713...717.

5. Gijasov B.I., Ledenev V.I., Makarov A.M. Komp'juternyj analiz vlijanija tehnologicheskogo oborudovanija na akusticheskie karakteristiki proizvodstvennyh pomeshhenij // Vestnik MGSU. – 2012, №11. S. 271...277.

6. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Acoustic Characteristics Analysis of Industrial Premises with Process Equipment // Journal of Applied Mathematics and Physics. – V.4, 2016. P. 206...210

7. Ezerskij V.A., Makarov A.M. Analiz vremeni reverberacii proizvodstvennyh pomeshhenij s rasseivajushhimi zvuk predmetami // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2008, № 2. S. 102...109.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 03.04.17.