

УДК 534.2

АНТОНОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
aiant58@yandex.ru

БАЦУНОВА АНАСТАСИЯ ВАЛЕРЬЕВНА, ассистент,  
nastybac@rambler.ru

Тамбовский государственный технический университет,  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106,

ШУБИН ИГОРЬ ЛЮБИМОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
niisf@niisf.ru

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,  
127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21

## РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ЗЕРКАЛЬНО-ДИФFUЗНОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА ОТ ОГРАЖДЕНИЙ\*

Представлен уточненный метод расчета нестационарных звуковых полей помещений, разработанный на основе зеркально-рассеянной модели отражения звука от ограждений. Метод позволяет получить энергетические характеристики нестационарных звуковых полей помещений и дать более точную акустическую оценку помещений с позиции формирования и распространения в них отраженной звуковой энергии. Для реализации метода разработана компьютерная программа. Программа позволяет определять эквивалентные уровни звукового давления, максимальные и минимальные уровни, время реверберации, строить графики изменения в расчетных точках прямой, отраженной и суммарной звуковой энергии, а также решать ряд других исследовательских и практических задач.

**Ключевые слова:** нестационарные звуковые поля; зеркально-диффузная модель отражения звука; импульсный шум; защита от шума.

ALEKSANDR I. ANTONOV, PhD, A/Professor,  
aiant58@yandex.ru

ANASTASIYA V. BATSUNOVA, Instructor,  
nastybac@rambler.ru

Tambov State Technical University,  
106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russia,

IGOR' L. SHUBIN, DSc, Professor,  
niisf@niisf.ru

Research Institute of Building Physics Raacs,  
21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia

---

\* Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Разработка методов оценки шумового режима в зданиях и на прилегающих к ним территориях для использования их при мониторинге шумового загрязнения среды и разработке мер по снижению шума в городской застройке» (код проекта 882) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

## DIFFUSE-REFLECTION MODEL OF NON-STATIONARY ACOUSTIC FIELDS

The paper presents the estimated method of calculating non-stationary acoustic fields in rooms, based on the diffuse-reflection model of the acoustic reflection. This method allows obtaining the acoustic energy properties of non-stationary acoustic fields and provides the best estimate of room acoustics in terms of the formation and propagation of acoustic waves. The method implementation is assisted by the developed computer program which makes possible to detect the sound-pressure level, maximum and minimum levels, reverberation time, and construct diagrams of reflected and total acoustic energy at computational points.

**Keywords:** non-stationary acoustic field; diffuse-reflection model; impulsive noise; noise protection.

Нестационарные звуковые поля главным образом исследуют при анализе процессов реверберации, на основе которой рассчитывают средние коэффициенты звукопоглощения помещений или при оценке акустических характеристик помещений с точки зрения качественной передачи и восприятия речевой и музыкальной информации [1]. В то же время в практике борьбы с нестационарным шумом важно знать также подробные сведения о структуре шума в конкретных точках помещения (на рабочих местах), в том числе пиковые значения уровней звукового давления, соотношения уровней непостоянного и фонового постоянного шума, эквивалентные уровни шума и т. д. [2, 3]. Совершенствованию методов расчета нестационарных шумовых полей в аспекте борьбы с шумом в настоящее время не уделяется должного внимания, в частности, не разработана методика расчета нестационарных шумовых полей при сложном зеркально-диффузном характере отражения звука от ограждений.

В статье предлагается метод расчета нестационарных звуковых полей, учитывающий зеркально-диффузное отражение звука от ограждений.

Отражение звука от ограждений осуществляется по сложным пространственным зависимостям, определяемым формой поверхности, структурой материала, углом падения звука и другими параметрами. Характер отражения звука от поверхностей помещения является основным фактором, влияющим на процессы формирования отраженных звуковых полей помещений [3, 4]. Ранее в работах [5–7] установлено, что в большинстве случаев отражение звука от поверхностей носит сложный характер, при котором часть падающей на ограждение звуковой энергии отражается зеркально, а часть ее рассеивается по закону Ламберта. Такой характер отражения приводит к тому, что в структуре отраженного звукового поля помещения присутствуют две составляющие – зеркальная и рассеянная, которые различаются между собой по многим характеристикам. Они имеют разные длины свободного пробега звуковых волн [8], различные скорости затухания энергии, разные условия образования и переноса энергии и т. д. При каждом акте отражения часть энергии зеркальной составляющей переходит в рассеянную и пополняет ее. При этом обратный переход рассеянной энергии в зеркальную невозможен.

Таким образом, в случае зеркально-диффузного отражения звука от поверхности необходимо знать, кроме прямой энергии, величины зеркально и рассеяно отраженных энергий. В этом случае уровни звукового давления в расчетной точке помещения в любое время  $t$  будут определяться как

$$L_t = 10 \lg \left[ c(\varepsilon_t^{\text{пр}} + \varepsilon_t^3 + \varepsilon_t^{\text{р}}) I_0 \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность на пороге слышимости;  $\varepsilon_t^{\text{пр}}$ ,  $\varepsilon_t^3$ ,  $\varepsilon_t^{\text{р}}$  – плотности звуковой энергии прямого звука, зеркальной и рассеянной составляющих отраженного звука в расчетной точке помещения в момент времени  $t$ ;  $c$  – скорость звука в воздухе.

Наиболее просто рассчитывается зеркальная составляющая звукового поля. Расчет ее при зеркально-диффузной модели отражения звука может производиться методом мнимых источников, прослеживания лучей и другими методами геометрической теории акустики [9]. При этом переход части зеркальной энергии в рассеянную при ее отражении учитывается уменьшением зеркальной энергии на сомножитель  $(1 - \beta)$ , где  $\beta$  – коэффициент перехода зеркальной звуковой энергии в рассеянную. В каждом случае уменьшение акустической мощности мнимого источника за счет звукопоглощения и рассеивания происходит на величину  $(1 - \alpha - \beta + \alpha\beta)$ . С учетом перехода зеркально отраженной энергии в рассеянную и поглощения ее на поверхности коэффициент потери звуковой энергии для зеркальной составляющей представляет собой величину, определяемую как

$$\alpha_{\text{yc}} = (1 - \alpha)(1 - \beta) = \alpha + \beta - \alpha\beta, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты звукопоглощения и рассеяния звуковой энергии.

Тогда, в случае применения для расчета зеркальной составляющей метода мнимых источников, плотность зеркально отраженной звуковой энергии в момент времени  $t$  будет рассчитываться как

$$\varepsilon_t^3 = \sum_{i=0}^N \frac{P_{(t-r_i/c)} (1 - \alpha_{\text{yc}})^i}{4\pi r_i^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – переменная во времени акустическая мощность источника звука;  $\alpha_{\text{yc}}$  – коэффициент, определяемый по формуле (2) (принят одинаковым для всех поверхностей);  $r_i$  – расстояния от действительного (при  $i = 0$ ) и мнимых ( $i > 0$ ) источников до расчетной точки;  $N$  – количество учитываемых мнимых источников шума.

В помещениях других, отличных от параллелепипеда форм, выражения для расчета параметров мнимых источников имеют более сложный вид. В этих случаях, как правило, применяется метод прослеживания лучей.

Плотность рассеянно отраженной звуковой энергии в момент времени  $t$  может рассчитываться по формуле

$$\varepsilon_t^{\text{р}} = \int_S \frac{I_{(ds', t-r_s/c)} (1 - \alpha_s) \cos \theta ds}{\pi r_s^2 c}, \quad (4)$$

где  $I_{(ds', t)} (1 - \alpha_s)$  – интенсивность рассеянной звуковой энергии, излучаемой в расчетную точку помещения от поверхности  $ds'$ ;  $r_s$  – расстояние от поверхности  $ds'$  до расчетной точки;  $\theta$  – угол направления от площадки на расчетную точку;  $\alpha_s$  – коэффициент звукопоглощения поверхности  $ds'$ .

Величина  $I_{(ds',t)}$ , как известно, при рассеянном отражении звука определяется интегральным уравнением Куттруфа [10], которое в случае переменной во времени акустической мощности имеет вид

$$I_{(ds',t)} = \int_S \frac{I_{(ds,t-R/c)}(1-\alpha_s)\cos\theta_1\cos\theta_2}{\pi R^2} ds + I_{0,t}, \quad (5)$$

где  $I_{(ds',t)}$  – интенсивность падающей на участок  $ds'$  звуковой энергии, определяемая вкладами отражений рассеянной энергии от всех других участков ограждений  $ds$ ;  $R$  – расстояния между элементами  $ds$  и  $ds'$ ;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы между нормальными к соответствующим элементам  $ds$ ,  $ds'$  и линией, их соединяющей;  $I_{0,t}$  – интенсивность прямого звука и звука от зеркальных отражений, участвующих в формировании отраженного рассеянного поля.

Интенсивность  $I_{0,t}$  определяется по формуле

$$I_{0,t} = \sum_{i=0}^N \frac{P_{(t-R/c)}(1-\alpha_{yc})^i \beta}{4\pi R_i^2}. \quad (6)$$

Значения в формуле (6) соответствуют обозначениям в выражении (3).

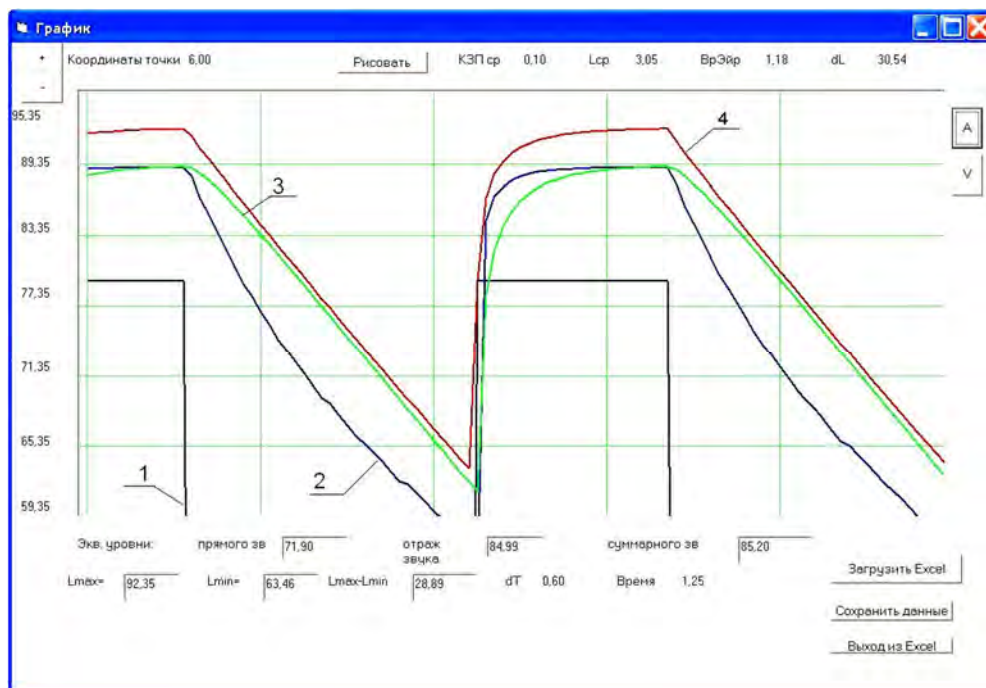
В уравнении (5) учтена временная задержка  $(t - R/c)$  поступления энергии, связанная с расстояниями  $R$  между элементами ограждений.

Расчет рассеянной составляющей на основе выражений (4) и (5) производится численным методом и имеет ряд трудностей. В первую очередь, это относится к тому, что источниками рассеянной энергии являются отражающие элементы помещения, излучающие в пространство помещения энергию после частичного рассеивания зеркальной составляющей поля при каждом акте отражения. Таким образом, параметры источников рассеянного звука могут быть определены только в процессе расчета зеркальной компоненты звукового поля. При этом для хранения численных значений характеристик источников рассеянного звука как нестационарных источников, а также для учета смещения во времени прихода нестационарной энергии от различных отражающих элементов требуются значительные вычислительные ресурсы.

Рассмотренная расчетная модель может быть использована при исследованиях влияния различных факторов на формирование нестационарных шумовых полей и решении практических задач борьбы с шумом. Для реализации представленной расчетной модели разработана компьютерная программа [11]. В результате вычислений по программе определяются эквивалентные уровни звукового давления для прямой, отраженной и суммарной звуковой энергии, возникающие при работе источника шума с непостоянной во времени звуковой мощностью, максимальные и минимальные уровни звукового давления, их разница, время реверберации, а также строятся графики изменения энергии во времени. Программа позволяет производить анализ влияния на распределение отраженной звуковой энергии коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , устанавливать соотношение между собой энергий зеркальной и рассеянной составляющих в отраженном звуковом поле и их изменение во времени, исследовать время ревербера-

ции отдельно для зеркальной и рассеянной составляющих и в целом для всего отраженного звукового поля, а также решать ряд других задач.

Ниже в качестве примера на рисунке приведено окно программы с результатами расчета непостоянного во времени шума при действии в помещении размерами  $14 \times 4 \times 3$  м периодического источника импульсного шума. Периодичность действия источника 1,0 с, длительность импульса 0,4 с. Коэффициент звукопоглощения поверхностей  $\alpha = 0,1$ , коэффициент рассеяния зеркально отраженной энергии  $\beta = 0,1$ .



Результаты расчета изменения уровней звукового давления при работе в помещении нестационарного источника шума периодического действия:

1 – прямой; 2 – зеркально отраженный; 3 – рассеянно отраженный; 4 – суммарный уровень звукового давления

Из графиков видно, что рост рассеянной энергии при действии импульса источника шума отстает от роста зеркальной энергии. Скорость спадаения зеркальной составляющей за счет совместного влияния поглощения звука и рассеивания значительно превышает скорость затухания рассеянной энергии. Более крутой начальный период затухания звука определяется затуханием ранних зеркальных отражений, завершающий этап затухания определяется затуханием рассеянной энергии, совпадающей с графиком затухания энергии по формуле Эйринга, используемой для оценки времени реверберации в помещениях с диффузными отраженными полями [2].

Аналогичные результаты и их анализ могут быть выполнены при других параметрах источника шума и других величинах  $\alpha$  и  $\beta$ .

Таким образом, предложенная расчетная модель и разработанная на ее основе компьютерная программа представляют собой эффективный вычислительный инструмент, позволяющий анализировать процессы формирования звуковых полей в помещениях с нестационарным шумом и на этой основе производить выбор акустически эффективных и экономически оправданных строительно-акустических и других средств снижения шума.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Методика акустического проектирования* одиночного пожарного оповещателя / В.Ф. Асминин, Е.Н. Епифанов, А.И. Антонов [и др.] // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2013. – № 3 (31). – С. 121–127.
2. *Антонов, А.И.* Метод расчета нестационарных шумовых полей в несоразмерных помещениях и помещениях сложных форм / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, О.Б. Демин // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – С. 183–185.
3. *Бацунова, А.В.* Расчет шумовых полей производственных помещений при работе источников шума периодического действия / А.В. Бацунова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2015. – № 3 (57). – С. 46–52.
4. *Антонов, А.И.* Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях / А.И. Антонов, А.В. Бацунова, И.Л. Шубин // Приволжский научный журнал. – ННГАСУ. – 2015. – № 3. – С. 89–95.
5. *Леденев, В.И.* Расчет энергетических параметров шумовых полей в производственных помещениях сложной формы с технологическим оборудованием / В.И. Леденев, А.М. Макаров // Научный вестник ВГАСУ. – 2008. – № 2 (10). – С. 94–101.
6. *Антонов, А.И.* Комбинированный метод расчета шумового режима в производственных зданиях теплоэлектроцентралей / А.И. Антонов, В.И. Леденев, Е.О. Соломатин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 2. – С. 16–24.
7. *Комбинированный метод расчета уровней шума в крупногабаритных газовоздушных каналах* / В.П. Гусев, В.И. Леденев, М.А. Солодова [и др.] // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3 – 1. – С. 33–38.
8. *Антонов, А.И.* Исследование длины среднего свободного пробега звуковых лучей в производственных помещениях с оборудованием / А.И. Антонов, В.И. Леденев, А.М. Макаров // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – № 4. – С. 115–121.
9. *Осипов, Г.Л.* Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов. – М. : Стройиздат, 1987.
10. *Kuttruff, H.* Simulierte Nachhallkurven in Rechteckräumen mit diffusem Schallfeld / H. Kuttruff // Acoustica. – 1971. – V. 25. – № 4. – P. 333–342.
11. *Расчет нестационарных шумовых полей в помещениях сложных геометрических форм* : свидетельство № 2015661741 о регистрации программы для ЭВМ / Антонов А.И., Бацунова А.В., Леденев В.И. (РФ). – Оpubл. 06.11.2015.

#### REFERENCES

1. *Asminin V.F., Epifanov E.N., Antonov A.I., Kuznetsov S.N.* Metodika akusticheskogo proektirovaniya odinochnogo pozharnogo opoveschatelya [Methods of acoustic design of a single fire detector]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013. No. 3. Pp. 121–127.(rus)
2. *Antonov A.I., Batsunova A.B., Demin O.B.* Metod rascheta nestatsionarnykh shumovykh poley v nesorazmernykh pomescheniyah i pomescheniyah slozhnykh form [The method of calculation of non-stationary noise fields in disproportionate and complex premises]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. Pp.183–185.(rus)

3. Batsunova A.B. Raschet shumovyih poley proizvodstvennyih pomescheniy pri rabote istochnikov shuma periodicheskogo deystviya [The calculation of noise fields in production area under batch-type noise conditions]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*. 2015. No. 3. Pp. 46–52. (rus)
4. Antonov A.I., Batsunova A.B., Shubin I.L. Usloviya, opredelyayushchie protsessyi formirovaniya shumovogo rezhima v zamknutyih ob'emah i ih uchet pri otsenke raspredeleniya zvukovoy energii v pomescheniyah [Noise conditions formed in confined space and assessment of acoustic energy distribution]. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2015. No. 3. Pp. 89–95. (rus)
5. Ledenev V.I., Makarov A.M. Raschet energeticheskikh parametrov shumovyih poley v proizvodstvennyih pomescheniyah slozhnoy formy s tehnologicheskim oborudovaniem [Calculation of noise fields energy parameters in equipped industrial areas of irregular shape]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*. 2008. No. 2. Pp. 94–101. (rus)
6. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatin E.O. Kombinirovannyi metod rascheta shumovogo rezhima v proizvodstvennykh zdaniyakh teploelektrotsentrali [Combined design method of noise conditions in industrial buildings of thermal power stations]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2011. No. 2. Pp. 16–24. (rus)
7. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solodova M.A., Solomtin E.O. Kombinirovannyi metod rascheta urovnei shuma v krupnogabarnitnykh gazovozdushnykh kanalakh [Combined design method of noise levels in large-size air-gas ducts]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2011. No. 3-1. Pp. 33–38. (rus)
8. Antonov A.I., Ledenev V.I., Makarov A.M. Issledovanie dliny srednego svobodnogo probega zvukovykh luchej v proizvodstvennykh pomescheniyakh s oborudovaniem [Investigation of mean free path of acoustic beams in equipped production areas]. *Vestnik TSUAB*. 2007. No. 4. Pp. 115–121. (rus)
9. Osipov G.L. Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh raionakh [Noise reduction in buildings and residential areas]. Moscow, 1987. (rus)
10. Kuttruff H. Simulierte Nachhallkurven in Rechteckräumen mit diffusem Schallfeld. *Acoustica*. 1971. V. 25. No. 4. Pp. 333–342.
11. Antonov A.I., Batsunova A.B., Ledenev V.I. Raschet nestatsionarnykh shumovyih poley v pomescheniyakh slozhnykh geometricheskikh form [Calculation of non-stationary noise fields in complex-geometry areas]. RF Certificate of State Registration of Software N 2015661741, publ. 06.11.2015. (rus)