

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЗДАНИЯХ

А. И. Антонов

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор А. Ф. Зубков

Ключевые слова и фразы: адекватность акустических моделей; звуковое поле; математическое моделирование; методы расчета шума.

Аннотация: Представлены основные модели звуковых полей помещений. Приведены описания, классификация и методы реализации математических моделей. Отмечена зависимость точности расчетных моделей от степени соответствия исходных положений, закладываемых в основу моделей, физическим акустическим процессам. Для практического использования рекомендованы численные реализации статистического энергетического подхода и моделирование звуковых полей методом прослеживания лучей.

При действии источников звука в замкнутом объеме помещения образуется звуковое поле, состоящее из прямого и отраженного звука. Расчет прямого звука, распространяющегося непосредственно от источника, как правило, не вызывает затруднений. Отраженная составляющая звукового поля, вызванная многократным отражением звуковых волн от ограждений, относится к сложным системам, для расчета которых возможно применение различных расчетных моделей с соответствующими методами реализации. Сложность описания отраженного звукового поля объясняется сложным пространственно-временным характером проходящих в помещении волновых процессов. Для их характеристики используются комплексные величины звукового давления и колебательной скорости. Разнообразная неправильная форма помещений, наличие рассеивающих звук элементов, неопределенный характер распределения отраженного от ог-

Антонов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий», e-mail: aiant58@yandex.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

ражений звука, его зависимость от частоты звука приводят к серьезным искажениям звуковых полей. В настоящее время нет возможности разработать единую модель, позволяющую объективно смоделировать волновые процессы звуковых полей реальных помещений.

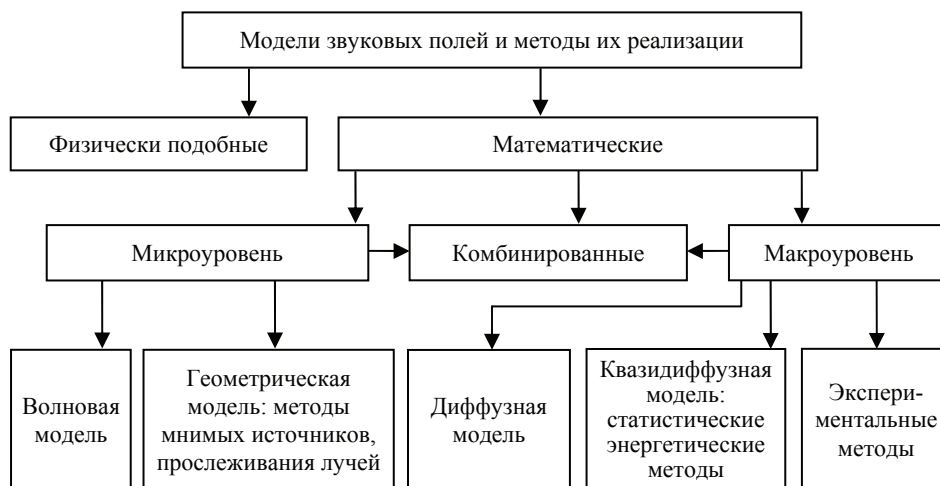
Для исследования сложных систем и процессов вводят различной степени упрощения, на основе которых разрабатываются более простые модели, описывающие отдельные свойства звуковых полей с необходимой степенью адекватности. Число разнообразных моделей может быть достаточно большим в зависимости от сложности процесса и вида поставленных задач. Классификация моделей, используемых в настоящее время для описания отраженных звуковых полей помещений, приведена на рисунке.

Подавляющее большинство моделей являются математическими или компьютерными при их реализации на современных вычислительных устройствах. Однако для особенно ответственных, с акустической точки зрения, музыкальных залов может использоваться и физическое моделирование, повторяющее во всех деталях реальный концертный зал в определенном масштабе, чаще всего принимается отношение размеров 1:20. С использованием физического моделирования проектировались, например, зал Кремлевского дворца съездов, Большой зал Московской консерватории и т.д. Физическое моделирование связано со значительными затратами времени и в настоящее время практически заменено математическим моделированием.

Все математические модели звуковых полей по степени детализации рассматриваемых компонент делятся на группы: модели микро- и макроуровня (рис. 1).

Под **микроуровнем** понимается представление звукового поля в виде совокупности отдельных звуковых волн или как результат разбиения звуковых волн на множество лучей или частиц звука – фононов.

Наиболее полное и строгое описание отраженных звуковых полей на микроуровне обеспечивает математическая *модель волновой теории*



Виды моделей отраженных звуковых полей помещений и методы их реализации

акустики в виде дифференциального уравнении гиперболического типа с соответствующими граничными условиями [1]. На основе колебательной акустической модели в принципе возможно рассчитать все необходимые величины звукового поля помещения. Однако практическая реализация расчетных методов на основе волновой модели ограничена простейшими геометрическими объемами со строго детерминированными граничными условиями. Любое возмущение системы в виде рассеивающего звук элемента или искажения формы ограждений приводит к серьезному усложнению расчетов, исключающему использование данной модели в практике шумозащиты.

В большинстве случаев для оценки параметров поля и решения задач снижения шума достаточно знать усредненные энергетические характеристики поля, например плотность звуковой энергии. Переход от оценки звукового давления отдельных звуковых волн к исследованию плотности звуковой энергии всей совокупности волн является необходимым этапом упрощения исходной модели звукового процесса на пути к разработке практических расчетных методов.

Из волновой модели выводятся *методы геометрической теории акустики*, в частности метод *мнимых источников* [2]. Каждая звуковая волна представляется как результат излучения звуковой энергии некоторым зеркальным источником, определенным образом расположенным в пространстве. Пространственную «решетку» легко построить для помещений в форме простейших геометрических фигур. Для помещений сложных форм установить положение мнимых источников затруднительно. Метод мнимых источников позволяет повысить точность расчетов энергетических параметров звуковых полей. Однако используемая модель зеркального отражения звуковых волн от ограждений оказывается далека от реального характера отражения. Точность зеркальной модели отражения звука от ограждений оказалась недостаточной для расчета звуковых полей в несоразмерных помещениях, что служит причиной разработки других математических моделей.

С развитием вычислительных возможностей получил развитие метод непосредственного моделирования распространения отдельных небольших частиц энергии – *метод прослеживания лучей*. В соответствии с данной моделью акустические волны представляются в виде сферических потоков звуковой энергии, распространяющейся в виде множества не связанных между собой звуковых лучей [3]. Для обеспечения необходимой точности расчетов набор звуковых лучей должен быть достаточно большим. Модель звукового поля метода прослеживания лучей относится к микроуровню и имеет дискретный характер. Как показывает практика, моделирование звуковых полей методом прослеживания лучей имеет большой потенциал. Использование вероятностных подходов при прослеживании лучей позволяет расширить область применения метода на решение задач по оценке шумовых полей с рассеянным или частично рассеянным отражением звуковой энергии от поверхностей ограждений и оборудования.

На **макроуровне** вместо расчета и отслеживания каждой компоненты звукового поля осуществляется исследование их совокупности. Основной статистической характеристикой, позволяющей перейти с микро- на макроуровень, является средняя длина свободного пробега звуковых волн. Звуковое поле представляется в виде некоторой сплошной среды (континуума), обладающей определенными статистическими энергетическими характеристиками: плотностью, интенсивностью и потоками звуковой энергии. При разработке математических моделей макроуровня в соответствии с принципами феноменологического подхода устанавливают взаимосвязи основных статистических и энергетических параметров звукового поля, на основе которых математическими методами выводят практические методы расчета звуковых полей. В качестве базовых положений используют закон сохранения энергии, взаимосвязь интенсивности и плотности звуковой энергии, вероятности нахождения фононов в пространстве и др. [4].

На основе взаимосвязи энергетических параметров и используя принцип диффузного поля в предположении равновероятности прихода звуковых лучей с одинаковой энергией со всех направлений, разработаны первые аналитические методы расчета звуковых полей, предложенные У. Сэбиным [5]. Благодаря простоте и достаточной точности расчета в определенном классе помещений *модель диффузного звукового поля* используется до настоящего времени при расчетах средней плотности отраженной энергии и при анализе процессов реверберации звука в помещениях. Однако многочисленные экспериментальные исследования показали, что предположение о диффузном поле и равенстве отраженной звуковой энергии во всех точках для несоразмерных помещений не соответствует реальным условиям и приводит к значительным погрешностям расчетного метода.

К группе математических моделей макроуровня можно также отнести *эмпирические* выражения для описания параметров звуковых полей. Одним из наиболее успешных является метод, разработанный в ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» [6]. Однако сложность звуковых полей, а также многообразие геометрических и акустических параметров помещений не позволяют обеспечить высокую точность эмпирических методов во всем диапазоне исходных данных.

Более точные модели макроуровня получены на представлениях о *квазидиффузных полях*, в которых при сохранении основных признаков диффузности предполагается наличие спадов отраженной звуковой энергии по мере удаления от источника шума [7]. Особую группу среди них составляют методы расчета звуковых полей на принципах модели *статистического энергетического подхода*, в основу которой положено уравнение переноса, устанавливающее связь между плотностью потока и градиентом плотности отраженной звуковой энергии с использованием коэффициента пропорциональности – коэффициента переноса звуковой энергии. Проверка предложенного коэффициента переноса методами матема-

тического моделирования показала его стабильность и постоянство при рассеянном характере отражения звуковой энергии от ограждений или интенсивном перемешивании энергии за счет оборудования либо других рассеивающих звук элементов помещения. На основе уравнения переноса разработана математическая модель отраженного звукового поля в виде параболического дифференциального уравнения для нестационарных условий возбуждения или эллиптического – для стационарных. Решения указанных уравнений относятся к классу задач математической физики. В настоящее время для реализации статистической энергетической модели разработаны аналитические [8] и численные методы [9]. Высокая точность расчетных методов, полученных на основе базового для статистического энергетического подхода уравнения переноса, подтверждает соответствие физическим процессам принятых исходных предположений.

Большие возможности решения практических задач заложены в нестационарной импульсной модели представления формирования отраженных звуковых полей. Расчет звукового поля отдельного импульса звуковой энергии позволяет на основе принципа суперпозиции решать широкий круг задач в стационарной и нестационарной постановках, представляя звуковое поле как результат излучения, наложения и затухания цепочки звуковых импульсов различной интенсивности в соответствии с излучающей способностью нестационарного источника шума [10].

Математические модели микроуровня, как правило, реализуют зеркальный характер отражения звука от ограждений, а статистические модели макроуровня предполагают интенсивное перемешивание звуковой энергии и/или рассеянное отражение звука от ограждений. Выполненные расчеты показывают, что в некоторых случаях экспериментальные данные находятся в интервале между результатами расчетов по зеркальной и рассеянной моделям отражения звука от ограждений. Это свидетельствует о том, что реальным помещениям в большей степени соответствует **комбинированная модель** отражения звука от ограждений, когда часть звуковой энергии отражается зеркально, а остальная диффузно. Для реализации зеркально-рассеянной модели отражения звука от ограждений в последнее время разрабатываются комбинированные математические модели, совмещающие расчетные методы микроуровня для определения зеркальной составляющей звукового поля и методы статистического энергетического подхода макроуровня для расчета рассеянной составляющей [11].

В настоящее время существует большое число математических моделей отраженных звуковых полей помещений, которые оказались за рамками данной статьи. Более полная классификация и характеристика моделей звуковых полей будет дана в последующих работах.

Список литературы

1. Скучик, Е. Основы акустики. В 2 т. Т. 2 / Е. Скучик ; пер. с нем А. Л. Соседовой ; под ред. Ю. М. Сухаревского. – М. : Изд-во иностр. лит, 1959. – 565 с.
2. Розенберг, Л. Д. Метод расчета звуковых полей, образованных распределенными системами излучателей / Л. Д. Розенберг // Журн. техн. физики. – 1942. – Т. 12. – С. 102.

3. Validity of the Ray-Tracing Method for the Application of Noise Control in Workplaces / J. Keränen [at al.] // *ACUSTICA - acta acustica*. – 2003. – Vol. 89. – P. 863 – 874.

4. Леденев, В. И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий / В. И. Леденев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – 156 с.

5. Sabine, W. C. Collected papers on acoustics / W. C. Sabine. – Cambridge, MA : Harvard University Press, 1922.

6. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Л. Г. Осипов [и др.] ; под ред. Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. – М. : Стройиздат, 1987. – 558 с.

7. Lubcke, E. Schallausbreitung in Werkhallen (hauptsächlich in Flachräumen) / E. Lubcke, H. Gober. – Köln und Opladen : Westdeutscher Verlag, 1964. – 79 s. – (Forshungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, No. 1364).

8. Леденев, В. И. Статистическая энергетическая модель отраженных шумовых полей помещений и методы ее реализации / В. И. Леденев, А. И. Антонов // *Архитектурная акустика. Шумы и вибрации : сб. тр. X сес. Рос. акуст. о-ва / Науч.-исслед. ин-т строит. физики Рос. акад. архитектуры и строит. наук.* – М., 2000. – Т. 3. – С. 67 – 70.

9. Гусев, В. П. Численный статистический энергетический метод оценки распространения шума в крупногабаритных воздушных каналах / В. П. Гусев, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин // *Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2009 году : науч. тр. РААСН : в 2 т. / Рос. акад. архитектуры и строит. наук.* – М. ; Иваново, 2010. – Т. 2. – С. 271 – 278.

10. Антонов, А.И. Оценка шума в помещениях с источниками импульсного звука периодического действия / А. И. Антонов, А. В. Бацунова, С. И. Крышов // *Вестн. МГСУ.* – 2011. – Т. 1, № 3. – С. 48 – 53.

11. Антонов, А. И. Комбинированный метод расчета шумового режима в производственных зданиях теплоэлектроцентралей / А. И. Антонов, В. И. Леденев, Е. О. Соломатин // *Науч. вестн. Воронеж. ГАСУ. Строительство и архитектура.* – 2011. – № 2 (22). – С. 16 – 24.

References

1. Skudrzyk E. *Die Grundlagen der Akustik*, Wien: Springer-Verlag, 1954.

2. Rozenberg L.D. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1942, vol. 12, p. 102.

3. Keränen J., Airo E., Olkinuora P., Hongisto V. *ACUSTICA - acta acustica*, 2003, vol. 89, pp. 863-874.

4. Ledenev V.I. *Statisticheskie energeticheskie metody rascheta shumovykh polei pri proektirovanii proizvodstvennykh zdaniy* (Statistical methods for calculating the energy of noise fields in the design of industrial buildings), Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2000, 156 p.

5. Sabine W.C. *Collected papers on acoustics*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1922.

6. Osipov L.G., Yudin E.Ya., Khyubner G. *Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh raionakh* (Noise reduction in buildings and residential areas), Moscow: Stroizdat, 1987, 558 p.

7. Lubcke E., Gober H. *Schallausbreitung in Werkhallen (hauptsächlich in Flachräumen)*, Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag, 1964, 79 p. (Forshungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, no. 1364).

8. Ledenev V.I. Antonov A.I. *Arkhitekturnaya akustika. Shумы i vibratsii. Sbornik trudov X sessii Rossiiskogo akusticheskogo obshchestva* (Architectural acoustics. Noise and vibration. Proceedings of the X Session of the Russian Acoustical Society), Moscow, 2000, vol. 3, pp. 67-70.

9. Gusev V.P., Ledenev V.I., Solomatin E.O. *Fundamental'nye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'-noi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2009 godu* (Fundamental research RAASN on scientific support development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2009), Scientific works of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Ivanovo, 2010, vol. 2 of 2, pp. 271-278.

10. Antonov A.I., Batsunova A.V., Kryshov S.I. *Vestnik MGSU*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 48-53.

11. Antonov A.I., Ledenev V.I., Solomatin Ye.O. *Scientific Herald Of The Voronezh State University Of Architecture And Civil Engineering. Construction And Architecture*, 2012, vol. 1, pp. 7-16.

Mathematical Modeling of the Sound Energy Propagation in Buildings

A. I. Antonov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: the adequacy of acoustic models; mathematical modeling; method of calculation of noise; sound field.

Abstract: The paper describes the main models of sound fields of buildings. Descriptions, classification and methods of realization of mathematical models are given. The dependence of the accuracy of the models on the degree of conformity of the assumptions that lay in the basis of models, with physical acoustic processes is observed. For practical use it is recommended to apply numerical implementations of statistical energy approach and modeling of sound fields by tracing rays.

© А. И. Антонов, 2014

Статья поступила в редакцию 23.09.2014 г.