

А.И. Антонов, В.И. Леденев

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПОМЕЩЕНИЯХ

Сведения о длине среднего свободного пробега необходимы при расчетах шумовых полей в производственных помещениях. Известно, что длина среднего свободного пробега зависит от различных факторов. К ним в первую очередь относятся объемно-планировочные и акустические параметры помещений, наличие в помещениях рассеивающих звук предметов, а также характер отражения звука от поверхностей ограждений. Следовательно, для нахождения длины среднего свободного пробега необходимо иметь методику, учитывающую влияние перечисленных выше факторов.

Наиболее универсальным и удобным для программирования и реализации методики исследования длин среднего свободного пробега звуковых волн в помещениях является способ определения свободного пробега отраженных волн, основанный на методе прослеживания лучей. Метод позволяет учитывать как зеркальный, так и диффузный характер отражения звука. И в том и другом случаях суммирование длин пробега прослеживаемых лучей между актами отражения и их осреднение для всех N испускаемых источником лучей позволяет получить среднюю длину пробега. Для реализации рассеянного отражения звука используются случайные величины с различными распределениями вероятностей. Известно большое число программ для ЭВМ, позволяющих генерировать случайные числа \tilde{x} в диапазоне значений $(0...1)$ с равномерно распределенной вероятностью. Используя \tilde{x} можно найти направление луча, задаваемое углами γ, θ .

ОТНОСИТЕЛЬНО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ L_{cp} В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ НЕ ИМЕЕТСЯ ОДНОЗНАЧНОГО ПОДХОДА. НАПРИМЕР, В [1] УКАЗЫВАЕТСЯ НА ЧЕТЫРЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ L_{cp} , ПРИВОДЯЩИХ К РАЗНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ. ЭТО ХОРОШО ВИДНО ПРИ СРАВНЕНИИ ФОРМУЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ L_{cp} В СЛУЧАЯХ РАВЕНСТВА И ПОСТОЯНСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕСОВ ЛУЧЕЙ:

– ПРИ УСРЕДНЕНИИ СОБСТВЕННЫХ СРЕДНИХ ДЛИН ПРОБЕГА ОТДЕЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ L_l

$$l'_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i, \quad (1)$$

– ПРИ УСРЕДНЕНИИ ЧАСТОТ ОТРАЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ ОТ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОГРАЖДЕНИЙ

$$l''_{cp} = N / \sum_{i=1}^N (1/l_i). \quad (2)$$

СООТНОШЕНИЯ l'_{cp} И l''_{cp} ПОДЧИНЯЮТСЯ НЕРАВЕНСТВУ $l'_{cp} \geq l''_{cp}$.

АНАЛИЗ ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО В СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИКАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ИМЕЮТСЯ ДВА СУЩЕСТВЕННЫХ НЕДОСТАТКА: НЕДОСТАТОЧНО ВНИМАНИЯ УДЕЛЯЕТСЯ ХАРАКТЕРУ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА ОТ ОГРАЖДЕНИЙ РЕАЛЬНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ И ЕГО ВЛИЯНИЮ НА ВЕЛИЧИНУ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ПРОБЕГА, А ТАКЖЕ ИГНОРИРУЕТСЯ ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЗВУКОВЫХ ЛУЧЕЙ ЗА СЧЕТ ЕЕ ПОГЛОЩЕНИЯ НА ОГРАЖДЕНИЯХ В ПЕРИОД СУЩЕ-

СТВОВАНИЯ ЛУЧА. НИЖЕ ПРИВОДИТСЯ ПРЕДЛОЖЕННАЯ НАМИ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ ДЛИН ПРОБЕГА ЗВУКА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ХАРАКТЕР ЕГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ ОГРАЖДЕНИЙ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛУЧЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИХ ЧАСТИЧНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ОГРАЖДЕНИЯХ [2, 3].

ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ СОСТОЯЩИМ ИЗ МНОЖЕСТВА ОТРЕЗКОВ ЛУЧЕЙ L_i С СООТВЕТСТВУЮЩИМИ ИМ ПЕРЕНОСИМЫМИ ЭНЕРГИЯМИ E_i . ЧЕМ ДАЛЬШЕ ПРОСЛЕЖИВАЕТСЯ ПУТЬ ЛУЧА, ТЕМ МЕНЕЕ СУЩЕСТВЕНЕН ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВКЛАД ОТРЕЗКА. КРИТЕРИЕМ ПРЕКРАЩЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ЛУЧА ЯВЛЯЕТСЯ ОПРЕДЕЛЕННАЯ ВЕЛИЧИНА УМЕНЬШЕНИЯ ЕГО ЭНЕРГИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧЕЙ МОГУТ ВЫСТУПАТЬ, ТАКИМ ОБРАЗОМ, ВЕСОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ПРОБЕГА. ДЛЯ ЭТОГО ВЕСЬ ДИАПАЗОН ВОЗМОЖНЫХ ДЛИН ПРОБЕГОВ ЛУЧЕЙ ДОЛЖЕН БЫТЬ РАЗБИТ НА РАВНОЕ ЧИСЛО ОТРЕЗКОВ. РАСПРЕДЕЛИВ ОБЩУЮ ЭНЕРГИЮ ПОЛЯ ПО СООТВЕТСТВУЮЩИМ ОТРЕЗКАМ ДИАПАЗОНА И ПРОИЗВОДЯ НОРМИРОВАНИЕ

$$P_{(l_i)} = l_i \cdot 100 \frac{\sum_n E_i}{\sum_N E_i}, \quad (3)$$

МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ГИСТОГРАММУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИН СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЛУЧЕЙ С УЧЕТОМ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕСОВ. ЗДЕСЬ N – ЧИСЛО ЛУЧЕЙ, ПОПАДАЮЩИХ В ДИАПАЗОН $l_i \pm \Delta l$ ДЛИН СВОБОДНЫХ ПРОБЕГОВ. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛИН СВОБОДНОГО ПРОБЕГА НАХОДИТСЯ НА ОСНОВЕ ЭТОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАК

$$l_{cp} = 0,01 \sum l_i \cdot P(l), \quad (4)$$

ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ РАЗРАБОТАНА СПЕЦИАЛЬНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА, ПОЗВОЛЯЮЩАЯ МЕТОДОМ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ЛУЧЕЙ ВЫПОЛНЯТЬ РАСЧЕТЫ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЛУЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМУЛ (3) И (4) [4].

ВАЖНЫМ МОМЕНТОМ ПРИ РАСЧЕТЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ПРОБЕГА МЕТОДОМ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ЯВЛЯЕТСЯ УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ОТ КОЛИЧЕСТВА ЛУЧЕЙ, ИСПУСКАЕМЫХ ИСТОЧНИКОМ. ЧЕМ БОЛЬШЕ КОЛИЧЕСТВО ЛУЧЕЙ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ В РАСЧЕТЕ, ТЕМ ВЕРОЯТНЕЕ УЧИТЫВАЮТСЯ ВСЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПОМЕЩЕНИИ И ВСЕ ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА ОТ ПОВЕРХНОСТЕЙ. ВЫПОЛНЕНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕОБХОДИМОГО И ДОСТАТОЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ИСПУСКАЕМЫХ ИСТОЧНИКОМ ЛУЧЕЙ. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИЛАСЬ ДЛЯ 9 ПОМЕЩЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОПОРЦИЙ (СОРАЗМЕРНЫХ, ДЛИННЫХ И ПЛОСКИХ). ПРИ ЭТОМ РАССМАТРИВАЛИСЬ ТРИ ВАРИАНТА РАЗМЕЩЕНИЯ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ НА ОГРАЖДЕНИЯХ: БЕЗ ОБЛИЦОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ (КОЭФФИЦИЕНТ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАВЕН $\alpha = 0,1$), С ОБЛИЦОВКОЙ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ ПОТОЛКА ($\alpha_{п} \geq 0,5$), С ОБЛИЦОВКОЙ СТЕН ($\alpha_{ст} \geq 0,5$). ВО ВСЕХ ВАРИАНТАХ ИСПОЛЬЗОВАЛИСЬ ДВЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА: ЗЕРКАЛЬНАЯ И ДИФFUЗНАЯ. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОМ ПРИНИМАЛОСЬ РАВНОМЕРНЫМ В СФЕРУ. В ЦЕЛОМ РАССМОТРЕНО 54 ВАРИАНТА.

ПРИ НАХОЖДЕНИИ ДОСТАТОЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ИСПУСКАЕМЫХ ИСТОЧНИКОМ ЛУЧЕЙ В СЛУЧАЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ ДЛИН ПРОБЕГА ПРИ ДИФFUЗНОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ УЧИТЫВАЛСЯ ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛУЧЕЙ В ОБЪЕМЕ ПОМЕЩЕНИЯ И ОЦЕНКА ИХ ДОСТАТОЧНОГО КОЛИЧЕСТВА ПРОИЗВОДИЛАСЬ ПО МЕТОДУ СТЬЮДЕНТА [5]. ПРИ ОЦЕНКЕ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ЛУЧЕЙ N В СЛУЧАЕ ДИФFUЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ ВОЛН ОТ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРИТЕРИЕМ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ПРОБЕГА ЯВЛЯЕТ-

СЯ РАЗМЕР ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА. С УВЕЛИЧЕНИЕМ ЧИСЛА ОТСЛЕЖИВАЕМЫХ ЛУЧЕЙ ОН УМЕНЬШАЕТСЯ И ПОСЛЕ ОПРЕДЕЛЕННОЙ ЕГО ВЕЛИЧИНЫ СТАНОВИТСЯ ПРАКТИЧЕСКИ ПОСТОЯННЫМ. АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ РАСЧЕТОВ ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО ЧИСЛО N ПРИ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ 0,95 ДОЛЖНО БЫТЬ НЕ МЕНЕЕ 1000. В ЭТОЙ СВЯЗИ ВО ВСЕХ ДАЛЬНЕЙШИХ РАСЧЕТАХ В КАЧЕСТВЕ ДОСТАТОЧНОГО ЧИСЛА УЧИТЫВАЕМЫХ ЛУЧЕЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИЗ-ЗА ДИФFUЗНОГО ХАРАКТЕРА ОТРАЖЕНИЯ БЫЛО ПРИНЯТО $N = 1000$.

ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗЕРКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ И ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКА В СФЕРУ ВСЕ ЛУЧИ ПРОХОДЯТ СТРОГО ФИКСИРОВАННЫЙ ПУТЬ. КРИТЕРИЕМ ОЦЕНКИ ЧИСЛА ПРОСЛЕЖИВАЕМЫХ ЛУЧЕЙ В ЭТОМ СЛУЧАЕ ЯВЛЯЕТСЯ УМЕНЬШЕНИЕ РАЗБРОСА ЗНАЧЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНО НЕКОТОРОГО СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ, ЯВЛЯЮЩЕГОСЯ ИСТИННОЙ СРЕДНЕЙ ДЛИНОЙ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА. УСТАНОВЛЕНО, ЧТО В ДАННОМ СЛУЧАЕ ТАКОЕ ЧИСЛО НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ МЕНЕЕ 600. ПРИ ДАЛЬНЕЙШИХ РАСЧЕТАХ ЧИСЛО N ТАКЖЕ БЫЛО ПРИНЯТО РАВНЫМ 1000.

РАССМОТРЕННАЯ МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА СРЕДНЮЮ ДЛИНУ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЗВУКОВЫХ ВОЛН ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОМЕЩЕНИЯ, А ТАКЖЕ НАЛИЧИЕ В ПОМЕЩЕНИЯХ РАССЕИВАЮЩИХ ЗВУК ПРЕДМЕТОВ. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННОЙ МЕТОДИКИ ПРИВЕДЕНЫ В РАБОТАХ [6, 7].

Список Литературы

- 1 Joyce W.B. Sabins reverberation time and ergodic auditoriums // JASA. 1975. V. 58. № 3. P. 643 – 655.
- 2 Антонов А.И., Леденев В.И. Выбор средней длины свободного пробега в помещениях для статистических методов расчета // ТИХМ. Тамбов, 1990. 10 с. Деп. в ВНИИТПИ Госстроя СССР в 1990 г. Вып. 3. № 10765.
- 3 Матвеева И.В., Антонов А.И., Леденев В.И. Выбор средней длины свободного пробега звуковых волн для статистической энергетической модели шумового поля помещения // Труды ТГТУ: Сб. научных статей. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. Вып. 5. С. 210 – 217.
- 4 Антонов А.И., Демин О.Б., Колесникова О.Д., Матвеева И.В., Леденев В.И. Математическая модель помещения для решения задач строительной акустики // Информационно-компьютерные технологии в решении проблем промышленности, строительства, коммунального хозяйства и экологии: Сб. материалов Международной научно-практической конференции. Пенза. 2000. С. 9 – 11.
- 5 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
- 6 Макаров А.М. Влияние на среднюю длину свободного пробега волн рассеяния звуковой энергии на предметах, размещенных в помещении // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.
- 7 Комарова Т.П., Матвеева И.В. Изменение длины среднего свободного пробега в плоских помещениях в зависимости от их объемно-планировочных и акустических параметров // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.