

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 534.2

DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-3-13

А.И. АНТОНОВ¹, В.П. ГУСЕВ¹, В.И. ЛЕДЕНЕВ^{1,2}, И.В. МАТВЕЕВА²

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН)», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия

ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КУЛИС КЕССОННОГО ТИПА

Аннотация. В практике снижения шума в помещениях кроме обычных плоских звукопоглощающих облицовок применяются также конструкции кулисного типа, размещаемые на потолках помещений в виде различных систем. В настоящее время отсутствуют простые методы оценки акустической эффективности таких систем, что в значительной мере ограничивает их применение, и в частности, применение кулисных систем кессонного типа. В статье предлагается численный метод расчета акустической эффективности кессонной системы кулис, основанный на геометрическом методе прослеживания лучей при различном характере отражения звука от ограждений. Показано, что метод может использоваться при выборе размеров кессонной структуры кулис исходя из звукопоглощающих характеристик элементов кулис и звукопоглощения потолка. Метод на ранних стадиях проектирования объектов позволит производить предварительную оценку влияния различных параметров кессонных систем кулис на их акустическую и экономическую эффективность.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, звукопоглощающие кулисы, расчет акустической эффективности звукопоглощения, защита от шума.

A.I. ANTONOV¹, V.P. GUSEV¹, V.I. LEDENEV^{1,2}, I.V. MATVEEVA²

¹ Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

² Tambov State Technical University, Tambov, Russia

EVALUATION OF THE ACOUSTIC EFFICIENCY OF A SOUND- ABSORBING CURTAIN WALL SYSTEM

Abstract. In the practice of noise reduction in rooms, in addition to conventional flat sound-absorbing linings, rocker-type structures are also used, placed on the ceilings of rooms in the form of various systems. Currently, there are no simple methods for evaluating the acoustic efficiency of such systems, which significantly limits their use, and in particular, the use of rocker systems of the caisson type. The article proposes a numerical method for calculating the acoustic efficiency of a coffered curtain wall system based on a geometric ray tracing method with different types of sound reflection from fences. It is shown that the method can be used when choosing the dimensions of the coffered structure of the wings based on the sound-absorbing characteristics of the curtain elements and the sound absorption of the ceiling. The method at the early stages of object design will allow for a preliminary assessment of the impact of various parameters of the curtain wall systems on their acoustic and economic efficiency.

Keywords: sound-absorbing structures, sound-absorbing wings, calculation of acoustic efficiency of sound absorption, noise protection.

1. Введение

В настоящее время для снижения шума в зданиях используются звукопоглощающие конструкции, применяемые в виде плоских звукопоглощающих облицовок, объемных звукопоглощающих элементов и звукопоглощающих элементов кулисного типа [1]. При выборе указанных конструкций для снижения шума в помещении необходимо выполнять оценку их акустической эффективности. Наиболее просто такая оценка производится при размещении в помещении плоских звукопоглощающих облицовок. В этом случае необходимо знать только их частотные коэффициенты звукопоглощения, которые в настоящее время надежно определяются в условиях реверберационных измерительных камер. Более сложно определяется акустическая эффективность снижения шума объемными и кулисными звукопоглотителями. Эффективность таких элементов зависит не только от акустических свойств одного элемента, определяемого в условиях реверберационной камеры, но и от других факторов, таких, например, как геометрические размеры элемента, их взаимное расположение относительно друг друга, а также их размещение по отношению к ограждениям помещения и источникам шума [1].

Ниже в статье рассмотрены проблемы оценки акустической эффективности снижения шума в помещении звукопоглощающими кулисами, размещаемыми в помещении в виде системы кессонов.

Системы звукопоглощающих элементов кулисного типа впервые были подробно рассмотрены в середине 20-го века [2]. Каждый отдельный элемент системы представляет собой плоский элемент прямоугольной формы, у которого толщина существенно меньше его высоты и длины. На поверхностях такого элемента кроме поглощения падающей на него звуковой энергии происходят также процессы рассеяния и дифракции звука. Эти процессы существенно усложняются при размещении элементов в виде определенного типа систем. На рис.1 приведены имеющиеся в практике схемы размещения кулис.

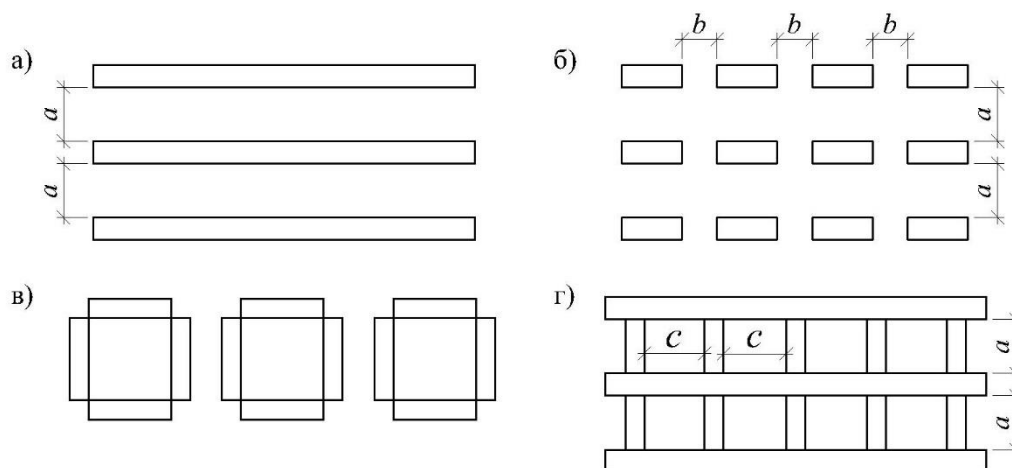


Рисунок 1 – Возможные системы размещения кулис в помещениях: а) рядовая непрерывная система, б) рядовая прерывистая система, в) ячейковая система, г) кессонная система

В начале 80-х годов 20-го века в НИИСФе было предложено аналитическое решение для плоской системы кулисных элементов, соответствующей рис.1, а [3,4]. Использованная расчетная схема к этому случаю приведена на рис.2.

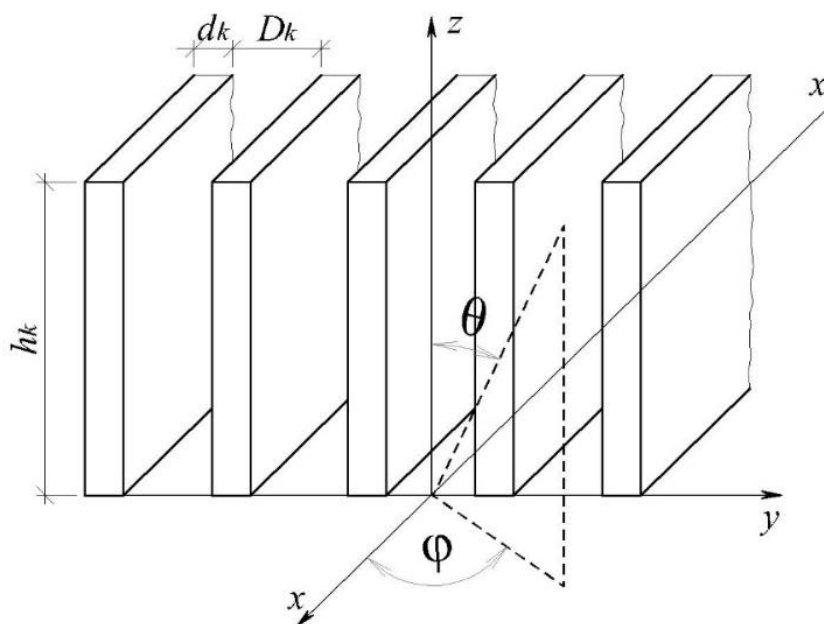


Рисунок 2 – Расчетная схема рядовой бесконечной системы кулис

Аналитическое решение было получено авторами на основе метода, предложенного в работе [5] для оценки дифракции плоской электромагнитной волны на абсолютно отражающей решетке.

Основным результатом аналитического решения явилось определение диффузного коэффициента звукопоглощения для такой расчетной схемы размещения кулис $\alpha_{\text{эkd}}$. Далее при наличии сведений о величине $\alpha_{\text{эkd}}$ расчет снижения шума за счет устройства кулис в помещении предлагалось производить, как и при устройстве плоской облицовки существующими методами расчета, учитывающими пропорции помещений и другие факторы, влияющие на распределение прямого и отраженного шума в объеме помещений [6].

Согласно [1] в случае высоких частот, когда геометрические параметры системы h_k и D_k больше длины волны, формула для определения $\alpha_{\text{эkd}}$ имеет вид

$$\alpha_{\text{эkd}} = \alpha_{\text{эп}} \cdot b \cdot \text{arctg}(1/2b), \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{эп}}$ – коэффициент звукопоглощения плоского элемента, изготовленного из того же пористо-волокнутого материала с той же толщиной d_k и уложенного на жестком основании; $b = h_k/L_k$ – параметр системы, связанной с высотой кулисы h_k и периодом решетки системы, равным $L_k = D_k + d_k$.

В [1] указано, что формула (1) справедлива при значениях $b < 0.5$. При значениях параметра b , когда $L_k > 3h_k$, формула для определения $\alpha_{\text{эkd}}$ имеет более простой вид

$$\alpha_{\text{эkd}} = \alpha_{\text{эп}} 2b(1 - b). \quad (2)$$

При этом в [1] сказано, что при таких соотношениях L_k и h_k система оказывается акустически более эффективной, чем облицовка из плоских элементов.

Следует иметь ввиду, что решение было получено для наиболее простого случая размещения звукопоглощающих элементов в виде бесконечной решетки и со значительными упрощениями процессов формирования звукового поля в пределах рассматриваемой решетки. Подобных решений в настоящее время не имеется для других, указанных на рис.1, кулисных систем. В [1] сказано, что в этом случае оценка их акустической эффективности возможна только экспериментально. В настоящее время это выполнить практически неосуществимо.

Так как отсутствует надежная методика оценки акустической эффективности для сложных кулисных систем, нами предлагается производить оценку эффективности приближенным расчетным методом, основанным на принципах геометрической теории

акустики. Для этой цели использован метод прослеживания лучей. Метод давно и широко используется в практике расчетов звуковых полей помещений. Он позволяет выполнять расчеты отраженного звука как при зеркальной, так и при рассеянной моделях отражения звуковой энергии от ограждений [7-12]. В статьях [13-14], в частности, показано, что метод может быть применен для оценки шума в помещениях с подобными данному случаю условиями.

2. Модели и методы

Для выполнения необходимых расчетов с использованием метода прослеживания лучей разработана компьютерная программа. Алгоритм численного метода, заложенный в компьютерную программу, разработан в соответствии с методикой, изложенной в [7].

Излучаемая источником звуковая энергия распределяется между большим количеством испускаемых источником лучей с бесконечно малыми пространственными углами распространения. Распределение звуковой мощности между лучами принимается пропорциональным пространственной диаграмме излучения. При каждом отражении луча его звуковая энергия уменьшается в соответствии с коэффициентом поглощения поверхности, от которой отражается луч. Направления отраженных лучей определяются согласно принятой диаграмме отражения. В случае зеркального отражения направление отраженного луча принимается из условия равенства, падающего и отраженного углов. Диффузное (рассеянное) отражение моделируется вероятностно согласно диаграмме рассеивания, например, в соответствии с законом Ламберта.

Уровень звукового давления в расчетных точках помещения определяется прямыми лучами, приходящими непосредственно от источника, и отраженными звуковыми лучами

$$L_i = 10 \lg \left[\frac{c(\varepsilon_i^{\text{пр}} + \varepsilon_i^3)}{I_0} \right], \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости; c – скорость звука в воздухе; $\varepsilon_i^{\text{пр}}$, ε_i^3 – плотности звуковой энергии, создаваемой в i -ой расчетной точке прямым звуком и зеркально отраженной звуковой энергией.

Плотность прямой звуковой энергии, приходящей в i -ую расчетную точку, определяется по выражению

$$\varepsilon_i^{\text{пр}} = \frac{W}{cNS_{\text{пр}}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_{\text{пр}}} \exp(-m_{\text{в}} r_{k\text{пр}i}) \right\}, \quad (4)$$

а плотность отраженных звуковых лучей, проходящих i -ую расчетную точку, по выражению

$$\varepsilon_i^3 = \frac{W}{cNS_{\text{пр}}} \left\{ \sum_{k=1}^{K_3} \left[\exp(-m_{\text{в}} r_{ki}) \prod_{p=1}^p (1 - \alpha_p)^{D_p} \right] \right\}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5): W – акустическая мощность источника звука; N – количество лучей, исходящих из источника; $S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения приемника звуковой энергии, который может приниматься в виде сферы с центром в расчетной точке; $K_{\text{пр}}$ – количество прямых лучей, приходящих в расчетную точку; K_3 – количество зеркально отраженных лучей, приходящих в расчетную точку; $m_{\text{в}}$ – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе; D_p – количество актов падения луча на p -ю поверхность в процессе распространения его на расстояние r_{ki} до i -ой расчетной точки; $r_{k\text{пр}i}$ – расстояние, прошедшее k -м прямым лучом от источника до i -ой расчетной точки; α_p – коэффициент звукопоглощения p -й поверхности ограждения, на которую падал прослеживаемый луч.

3. Результаты исследования и их анализ

Оценка акустической эффективности кулис предложенным методом выполнена для условий помещения размерами $36 \times 24 \times 6$ м. Расчеты произведены в октавной полосе частот со среднегеометрической частотой $f_{cp}=1000$ Гц. Средний коэффициент звукопоглощения всех необлицованных поверхностей ограждений помещений принят равным $\alpha=0.10$. Уровень акустической мощности источника в полосе с $f_{cp}=1000$ Гц равен 105 дБ. Источник располагается на уровне 1.5 м от пола. Излучение звуковой энергии производится в сферу. Расчетные точки приняты на высоте 1.5 м от пола помещения.

Исследование акустической эффективности выполнено для кулис кессонной системы. Рассматривались варианты кулис высотой 0.5 и 1.0 м, расположенные в виде ячеек с размерами в плане 1.5×1.5 м. Звукопоглощение поверхностей кулис принималось с коэффициентами $\alpha_k=0.10$ и $\alpha_k=0.80$. Расчеты производились при расположении кулис на потолке без звукопоглощения с $\alpha_n=0.10$ и со звукопоглощающей облицовкой потолка с $\alpha_n=0.80$.

Схемы размещения расчетных точек в помещении и кулис приведены на рис.3.

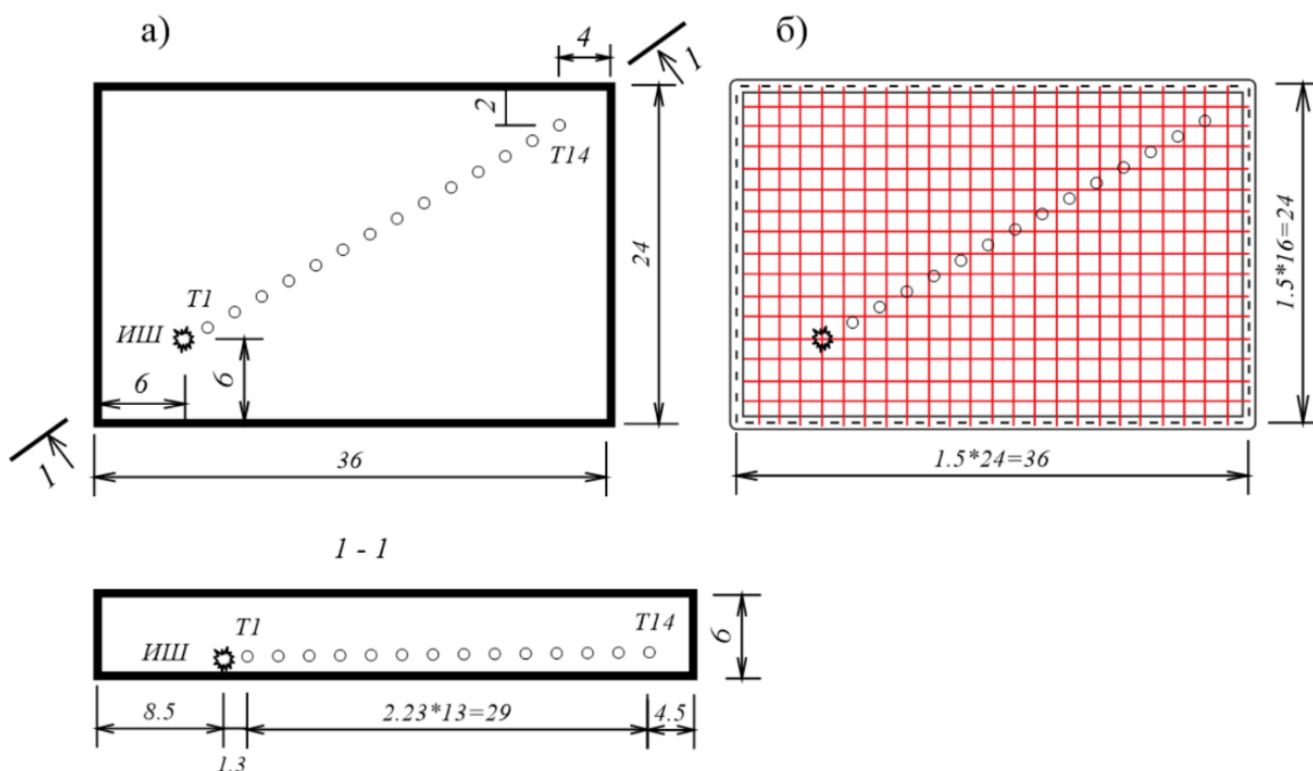


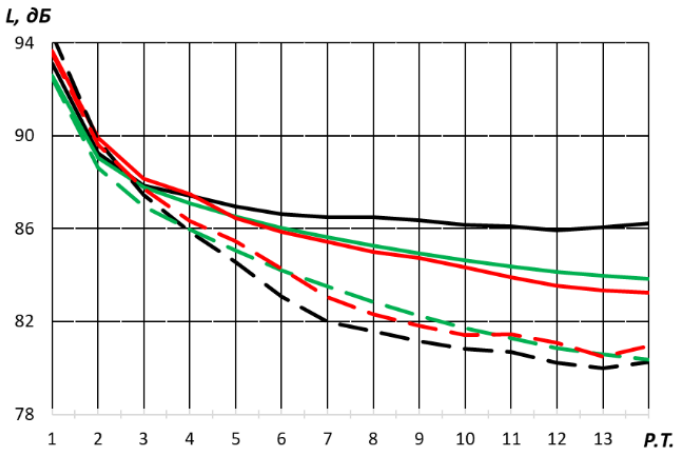
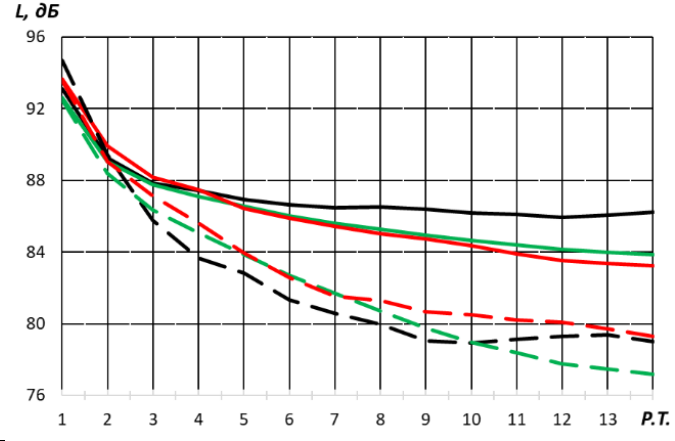
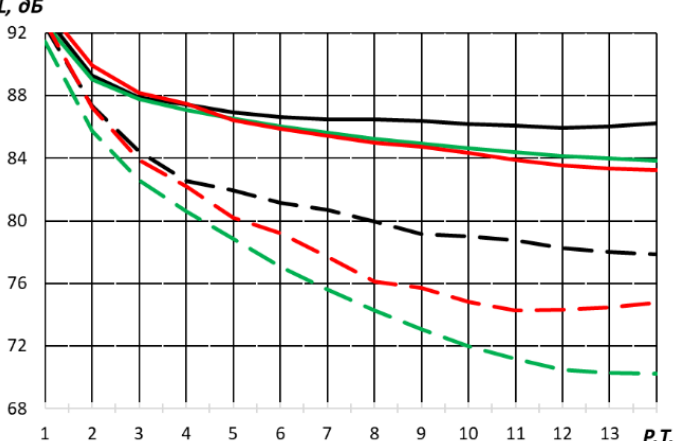
Рисунок 3 – Схемы расположения в помещении:
а) источника (ИШ) и расчетных точек (РТ); б) кулис. Размеры даны в метрах

Кроме метода прослеживания лучей при расчетах для сравнения использовались результаты, полученные численным статистическим энергетическим методом, дающим возможность выполнять расчеты уровней звукового давления в помещениях со сложной структурой. Он, в частности, был предложен нами для расчетов шума в помещениях с перегородками при диффузном отражении звука от ограждений [15]. Аналогичный подход к расчету применен и в данном случае для помещения с кулисами.

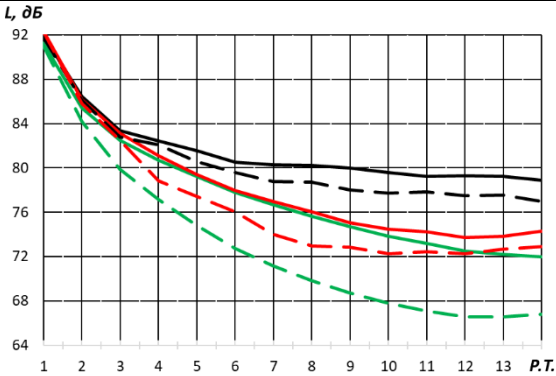
При анализе также использовались результаты расчетов методом прослеживания лучей и численным статистическим энергетическим методом в помещении без кулис при отсутствии и наличии звукопоглощающей облицовки на потолке. Результаты расчетов при наличии кулис

разной высоты и с разными коэффициентами звукопоглощения кулис и потолка приведены в таблице 1. На графиках в таблице 1 приведены для сравнения также и результаты расчетов в помещении без кулис.

Таблица 1 – Уровни звукового давления в помещении с кулисами кессонного типа

№ п/п	Варианты	Уровни звукового давления в расчетных точках
1	2	3
1	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_p = 0.10$	
2	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_p = 0.10$	
3	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка $\alpha_p = 0.10$	

1	2	3
4	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка $\alpha_n = 0.10$	
5	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_n = 0.80$	
6	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.10$; потолка $\alpha_n = 0.80$	
7	Высота кулис 0.5 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка $\alpha_n = 0.80$	

1	2	3
8	Высота кулис 1.0 м. Коэффициенты звукопоглощения: кулис $\alpha_k = 0.80$; потолка	 Условные обозначения Помещение без кулис: — — — — — расчет методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука; — — — — — то же при рассеянном отражении; — — — — — расчет статистическим энергетическим методом при диффузном отражении. Помещение с кулисами: — — — — — расчет методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука; — — — — — то же при рассеянном отражении; — — — — — расчет статистическим энергетическим методом при диффузном отражении.

Акустическая эффективность кессонной системы кулис зависит от характера отражения звука от поверхностей кулис и от ограждений помещения. При диффузном (рассеянном) отражении звука эффективность кулис выше, чем при зеркальном отражении. Эта разница существенно возрастает при росте звукопоглощения кулис, и особенно, при одновременном росте звукопоглощения кулис и потолка. В наибольшей мере эта разница проявляется в дальней от источника зоне помещения.

1. Сравнение расчетов, полученных методом прослеживания лучей, с данными расчетов статистическим энергетическим методом показывают, что последний существенно завышает эффективность шума. Распределение отраженной звуковой энергии в большей мере соответствует зеркально-диффузной лучевой модели отражения. Об этом, в частности, свидетельствует сравнение результатов, полученных методом прослеживания лучей при рассеянном отражении и при комбинированном методе, реализующем зеркально-диффузную модель отражения звука [7, 16, 17]. В случае данного помещения результаты расчетов методом прослеживания лучей при рассеянном отражении звука совпадают с результатами расчетов комбинированным методом, когда коэффициент рассеяния составляет 40% от падающей на ограждение зеркальной энергии. В тоже время в помещении без кулис расчеты обоими методами полностью совпадают при отсутствии звукопоглощающей облицовки на потолке (см. пункты 1-4 табл.1), а при ее наличии расхождения не превышают 1.0 дБ (см. пункты 5-8 табл.1). В целом сравнения результатов расчетов разными методами показывают, что наиболее приемлемым методом для расчетов в помещении с кулисами является метод прослеживания лучей при рассеянном отражении звука от ограждений.

2. Акустическая эффективность кулис в наибольшей мере проявляется при отсутствии звукопоглощающих облицовок на потолке помещения, и при этом существенно зависит от звукопоглощающих характеристик самих кулис. В данном случае при отсутствии звукопоглощающих облицовок на потолке и при малом звукопоглощении кулис акустическая эффективность системы не превышает 4 дБ в дальней от источника зоне помещения (см.

пункты 1-2 табл.1). При высоком коэффициенте звукопоглощения кулис их акустическая эффективность возрастает до 10 дБ (см. пункты 3-4 табл.1). При наличии звукопоглощающих облицовок на потолке акустическая эффективность данной системы кулис не превышает эффективности звукопоглощающей облицовки потолка в помещении без кулис (см. пункты 5-8 табл.1). Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости при выборе кулис данной системы исходить не только из их акустической эффективности, но и учитывать экономическую целесообразность их применения. Как видно из пунктов 5-8 таблицы 1, при этих вариантах кессонная система при равенстве акустической эффективности менее экономична, чем плоская звукопоглощающая облицовка.

3. Расчеты уровней звукового давления при разной высоте кулис показали, что метод реагирует на изменение их высоты. Результаты показывают, что изменение высоты кулис дает повышение эффективности не более чем на 2.0 дБ. Видно, что в данном случае эффективность несущественно изменяется при изменении высоты кулис. Установлено, что эффективность кулис зависит от звукопоглощения потолка и кулис (см. пункты 5-8 табл.1). Это, в частности, свидетельствует о реагировании принятого метода расчета на изменение геометрических и акустических характеристик кессонной системы кулис.

4. Заключение

1. С использованием рассмотренной методики выполнена оценка акустической эффективности кессонной системы кулис. Несмотря на приближенный характер методики, она дает возможность оценить влияние на акустическую эффективность геометрических и акустических характеристик системы, а также оценить экономическую эффективность ее применения по сравнению с другими методами снижения шума.

2. Методика может быть рекомендована к применению на ранних стадиях проектирования шумозащитных мероприятий в зданиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов, Е.Я. Юдин, Г. Хюбнер и др. Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. М.: Стройиздат, 1987. 558 с.
2. Beranek L.L. Noise Reduction/ New York: MCGraw-Hill, 1960/
3. Борисов Л.А., Сергеев М.В., Чудинов Ю.М. Метод расчета звукопоглощающих систем кулисного типа / Труды НИИСФ: Исследования по строительной акустике. М., 1981. С.15-22.
4. Чудинов Ю.М. Определение коэффициента звукопоглощения системы акустических кулис методом геометрической акустики (высокие частоты) / Тр. НИИСФ: Проблема борьбы с промышленными и городскими шумами в зданиях и на территории застройки. М., 1982. С. 10-14.
5. Дерюгин Л.Н. О теории дифракции на отражающей решетке. ДАН СССР, 93, 6. М., 1953.
6. Антонов А.И., Бацунова А.В., Шубин И.Л. Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях // Приволжский научный журнал. 2015. Т.3. №35. С 89-96.
7. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Шубин И.Л. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений. – М.: ООО «Директмедиа Паблишинг», 2022. 192 с.
8. Dai Gen-hua. Estimation of the influence of diffusion on reverberation using ray-tracing simulation // Acustica. 1983. V.54. P. 43-45.
9. Embrechts J.J. Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques // Acustica. 1984. V.51, №6. P. 288-295.
10. Hodgson, M. On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms // Journal of the Acoustical Society of America. 1990. Vol. 88. N. 2. P. 871–878.
11. Santon F., Daumas A. Prevision des niveaux de bruit dans les ateliers textiles // Rev d'acoustique. 1983. №65. P.109-112.
12. Hodgson M., Cousins O., Chan G., Valeau V. Ray-tracing prediction of sound-pressure and sound-intensity fields in empty and fitted rooms / J. Acoust. Soc. Am. 123, 3760 (2008). DOI.org/10.1121/1.2935343.
13. Chevret P., Chatillon J. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices / J. Acoust. Soc. Am. 132, 3125-3137 (2012). DOI.org/10.1121/1.4754554.
14. Keränen J., Saarinen P., Hongisto V. Prediction accuracies of ray-tracing and regression models in open-plan offices / Building and Environment/ Vol.239, 1 July 2023, 110406. DOI.org/10.1016/j.buildenv.2023.110406.

15. Гусев В.П., Антонов А.И., Жоголева О.А., Леденев В.И. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных помещениях с перегородками неполной высоты // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2(368). С. 260-267.
16. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). P. 13-22. DOI 10.18720/MCE.77.2.
17. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Меркушева Н.П. Цифровизация акустических расчетов при автоматизированном проектировании зданий // Приволжский научный журнал. 2019. № 4(52). С. 31-40.

REFERENCES

1. Osipov G.L., Yudin E.Ya., Hyubner G. et al. Noise reduction in buildings and residential areas / Ed. by G.L. Osipov, E.Ya. Yudin. Moscow: Strojizdat, 1987. 558 p. (rus)
2. Beranek L.L. Noise Reduction. New York: McGraw-Hill, 1960.
3. Borisov L.A., Sergeev M.V., Chudinov Yu.M. Calculation method for sound-absorbing systems of the rocker type. Trudy NIISF: Issledovaniya po stroitel'noj akustike [Proceedings of the NIISF: Research on building acoustics]. Moscow, 1981. Pp. 15-22. (rus)
4. Chudinov Yu.M. Determination of the sound absorption coefficient of the acoustic curtain system by geometric acoustics (high frequencies). Tr. NIISF: Problema bor'by s promyshlennymi i gorodskimi shumami v zdaniyah i na territorii zastrojki [Tr. NIISF: The problem of combating industrial and urban noise in buildings and on the territory of development]. Moscow, 1982. Pp. 10-14. (rus)
5. Deryugin L.N. On the theory of diffraction on a reflecting grating. DAN SSSR, 1953. Vol. 93. No. 6. (rus)
6. Antonov A.I., Bacunova A.V., Shubin I.L. The conditions determining the processes of formation of the noise regime in closed volumes, and their consideration when assessing the distribution of sound energy in rooms. Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2015. Vol. 3. No. 35. Pp. 89-96. (rus)
7. Antonov A.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V., Shubin I.L. Calculations of noise in civil and industrial buildings with mirror-diffuse reflection of sound from fences. Moscow: Direktmedia Publishing, 2022. 192 p. (rus)
8. Dai Gen-hua. Estimation of the influence of diffusion on reverberation using ray-tracing simulation. Acustica. 1983. Vol. 54. Pp. 43-45.
9. Embrechts J.J. Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques. Acustica. 1984. Vol. 51. No. 6. Pp. 288-295.
10. Hodgson M. On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms. Journal of the Acoustical Society of America. 1990. Vol. 88. No. 2. Pp. 871-878.
11. Santon F., Dumas A. Prevision des niveaux de bruit dans les ateliers textiles. Revue d'acoustique. 1983. No. 65. Pp. 109-112.
12. Hodgson M., Cousins O., Chan G., Valeau V. Ray-tracing prediction of sound-pressure and sound-intensity fields in empty and fitted rooms. Journal of the Acoustical Society of America. 2008. Vol. 123. Pp. 3760. DOI:10.1121/1.2935343.
13. Chevret P., Chatillon J. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices. Journal of the Acoustical Society of America. 2012. Vol. 132. Pp. 3125-3137. DOI:10.1121/1.4754554.
14. Keränen J., Saarinen P., Hongisto V. Prediction accuracies of ray-tracing and regression models in open-plan offices. Building and Environment. 2023. Vol. 239. 110406. DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110406.
15. Gusev V.P., Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenyov V.I. Noise calculations in the design of noise protection in industrial premises with partitions of incomplete height. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. 2017. No. 2(368). Pp. 260-267. (rus)
16. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). Pp. 13-22. DOI:10.18720/MCE.77.2.
17. Antonov A.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V., Merkusheva N.P. Digitalization of acoustic calculations in automated building design. Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2019. No. 4(52). Pp. 31-40. (rus)

Информация об авторах

Антонов Александр Иванович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, д-р. техн. наук, ст. науч. сотр.
E-mail: niisf@mail.ru

Гусев Владимир Петрович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, д-р. техн. наук, вед. науч. сотр.

E-mail: niisf@mail.ru

Леденев Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, д-р. техн. наук, проф., проф. кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Матвеева Ирина Владимировна

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Information about authors

Antonov Alexander Iv.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, doctor in tech. sc., senior researcher

E-mail: niisf@mail.ru

Gusev Vladimir P.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, doctor in tech. sc., leading researcher

E-mail: niisf@mail.ru

Ledenev Vladimir Iv.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia, doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. «Urban development and roads»,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Matveeva Irina VI.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia, candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. «Urban development and roads»,

E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Статья поступила в редакцию 11.06.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 11.06.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 11.08.2025