

Теплофизические и звукофизические свойства различных оконных блоков зданий и сооружений

В.М. Фокин, Д.Г. Усадский

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград
Институт архитектуры и строительства*

Аннотация: в данной статье рассматриваются теплофизические и звукофизические свойства оконных блоков различной конструкции, применяемых в зданиях и сооружениях. Для практического исследования предлагаются некоторые зависимости, которые позволяют описать различные свойства оконных блоков в деревянных, металлических и пластиковых переплётах

Ключевые слова: теплофизические свойства, звукофизические свойства, светопрозрачные ограждения, оконные блоки.

Все тела непрерывно посылают в окружающее пространство электромагнитные волны различной частоты (длины). Большинство твёрдых тел излучают волны с длиной волны от нуля до бесконечности, в том числе и звуковые волны. Твёрдые тела излучают и поглощают энергию волн поверхностью – поверхностное излучение (поглощение), а газы объёмом – объёмное излучение (поглощение)[1]. Энергия волн любой длины всегда превращается или трансформируется в тепловую энергию.

Единицей интенсивности звука (или силой звука) является $\text{Вт}/\text{м}^2$ - количество энергии (Дж), проходящее в секунду через единицу площади (м^2), перпендикулярной к направлению распространения волн. За нулевой уровень интенсивности звука принято значение 10^{-12} ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Плотностью энергии называют количество звуковой энергии (Дж), проходящее в единице объёма (м^3). Если звуковой луч на своём пути встречает какое-либо тело, то из всего общего количества попадающей на тело энергии $I_{\text{пад}}$ часть её отражается в окружающее пространство $-I_{\text{отр}}$, некоторая доля энергии поглощается в теле $-I_{\text{пог}}$ и трансформируется в объёмную с плотностью ϵ ($\text{Дж}/\text{м}^3$), а оставшаяся

часть $-I_{\text{пр}}$, проходит сквозь тело и через окружающее пространство, после часть попадает на другие тела.

Следовательно, энергия падающей звуковой волны может быть условно разделена на три части: отражённую, поглощённую и пропущенную, т.е. $I_{\text{пад}} = I_{\text{отр}} + I_{\text{пог}} + I_{\text{пр}}$.

В справочной литературе по акустике для количественной оценки каждой части энергии звуковой волны вводят следующие понятия или коэффициенты:

1. Коэффициент отражения $\alpha_{\text{отр}}$ – отношение интенсивности отражённой звуковой волны $I_{\text{отр}}$ к интенсивности падающей волны $I_{\text{пад}}$, т.е.

$$\alpha_{\text{отр}} = I_{\text{отр}}/I_{\text{пад}}.$$

2. Коэффициент поглощения $\alpha_{\text{пог}}$ – отношение интенсивности поглощённой энергии звуковой волны $I_{\text{пог}}$ к интенсивности падающей волны $I_{\text{пад}}$. Т.е. $\alpha_{\text{пог}} = I_{\text{пог}}/I_{\text{пад}}$.

$$\alpha_{\text{пог}} = I_{\text{пог}}/I_{\text{пад}}.$$

3. Коэффициент звукопроводности $\alpha_{\text{пр}}$ – отношение интенсивности прошедшей (пропущенной) звуковой волны $I_{\text{пр}}$ к интенсивности падающей волны $I_{\text{пад}}$, т.е. $\alpha_{\text{пр}} = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}}$.

$$\alpha_{\text{пр}} = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}}.$$

$$\text{В соответствии с законом сохранения энергии } \alpha_{\text{пог}} + \alpha_{\text{отр}} + \alpha_{\text{пр}} = 1$$

Однако в справочной литературе приведены значения коэффициентов для одного и того же материала (вещества), которые в сумме превышают единицу. При явлении дифракции наблюдается превышение одного только коэффициента звукопоглощения больше единицы. Поэтому так необходимо определиться в том, что коэффициенты поглощения и звукопроводности при

падении звуковых волн с интенсивностью $I_{\text{пад}}$ на какую-либо перегородку (ограждение) значительно больших размеров в сравнении с длиной волны, интенсивность звукопоглощения $I_{\text{пог}}$ и интенсивность звука с другой стороны перегородки (ограждения) $I_{\text{пр}}$ определяется при условии отсутствия отражения звука в пространстве до и после перегородки (ограждения). Поэтому более правильно называть эти коэффициенты (отражения, поглощения, звукопроводности) – коэффициентом по интенсивности отражения, поглощения и звукопроводности.

Эффективность отражения звука зависит от степени различия акустических сопротивлений обеих сред, а также от угла падения звуковых волн. Акустическое сопротивление (т.е. произведение плотности материала и скорости звука в нём) в твёрдых телах значительно больше по сравнению с воздухом, поэтому коэффициент отражения приближается к единице.

Эффективность поглощения звука различными материалами определяется нормальным коэффициентом поглощения (для угла падения 90°) и диффузионным коэффициентом поглощения (для различные углов падения звука). Коэффициент поглощения зависит от частоты звука, а большинство материалов имеют не монотонную зависимость коэффициента поглощения от частоты. Коэффициент поглощения также зависит от толщины материалов и состояния их поверхности.

Эффективность передачи звуковых колебаний через перегородки (ограждения) в реальных условиях зависит от воздушного, материального и мембранного способа передачи звуковой энергии[7]. Для снижения воздушного переноса в ограждениях заделывают поры и щели. Для уменьшения мембранного переноса стены выполняют массивными[6]. Материальный перенос осуществляется посредством поперечных колебаний через материал стены или по трубам систем отопления, водоснабжения и т.п.

Коэффициент звукопроводности $\alpha_{\text{пр}}$ и звукоизоляции $Q_{\text{пер}}$ перегородки (ограждения) в зависимости от звукового давления имеют вид:

$$\alpha_{\text{пр}} = J_{\text{пр}} / J_{\text{пад}} = P_{\text{пр}}^2 / P_{\text{пад}}^2; \quad (1)$$

$$Q_{\text{пер}} = L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}} = 20 \log(P_{\text{пад}} / P_{\text{пр}}); \quad (2)$$

где: $L_{\text{пад}}$ и $L_{\text{пр}}$ – уровни звукового давления в децибелах, а $P_{\text{пад}}$ и $P_{\text{пр}}$ – звуковое давление в Па, соответственно с внешней и внутренней стороны перегородки.

Коэффициент звукопроводности равен единице при нулевом значении звукоизоляции; равен 0,1 при $Q_{\text{пер}} = 10$ дБ; равен 0,01 при $Q_{\text{пер}} = 20$ дБ. При увеличении звукоизоляции более 20 дБ, коэффициент звукопроводности начинает уменьшаться[1]. Коэффициент звукопроводности и звукоизоляции имеют степенную зависимость:

$$\alpha_{\text{пр}} = 10^{-0,1 \cdot Q_{\text{пер}}}; \quad (3)$$

Для исследования теплозвукофизических свойств разработана экспериментальная установка и методика определения звукоизоляционных свойств $Q_{\text{пер}}$ для светопрозрачных ограждений зданий и сооружений. В качестве датчиков измерения шума в дБ использованы СМ-01В ContactMicrofon. Конструкция стеклопакетов выполнена по различным схемам: однокамерные, двухкамерные, с плёнкой и без плёнки, с различной воздушной прослойкой, а также пластик – оконный профиль. В таблице 1 приведены экспериментальные значения для стеклопакетов: эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ (Вт/м·К); эквивалентное термическое

сопротивление $R_{зкв}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$); звукоизоляция - $Q_{пер}$ (дБ); коэффициент звукопроводности $\alpha_{пр}$

Таблица №1.

Теплофизические и звукофизические свойства стеклопакетов и пластикового оконного профиля.

Схема стеклопакета	Конструкция стеклопакета	Теплопроводность $\lambda_{зкв}$ ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$)	Термическое сопротивление $R_{зкв}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$)	Звукоизоляция $Q_{пер}$ (дБ)
К-1	4-16-4	0,167	0,144	22
К-2	4и-16-4	0,05	0,48	26
К-3	4бронза-16-4	0,160	0,149	28
К-4	4и-24-4	0,054	0,597	31
К-5	4-10-4-10-4	0,125	0,256	33
К-6	4и-10-4и-10-4	0,072	0,447	34
К-7	4и-10-4-10-4и	0,049	0,655	36

В реальных условиях эксплуатации и строительства зданий и сооружений чаще всего используют светопрозрачные ограждения[2], выполненные из двух или трёх различных материалов. Например, оконный блок состоит из одно- или двухкамерного стеклопакета в пластиковом, деревянном или алюминиевом профиле (обрамлении), причем с различным соотношением площадей поверхностей[9].

Экспериментально определить тепло- и звукофизические свойства (ТЗФС) оконного блока с различным соотношением смежных материалов вызывает трудности[4], поэтому для решения подобных задач предлагается методика средних значений. Итак, для двух (нескольких) смежных участков светопрозрачного ограждения – оконного блока[5]:

Общая звукопроводность двух (нескольких) смежных участков равна сумме звукопроводностей:

$$A_{\text{пр}} = \sum_k \alpha_{\text{пр},k} \cdot F_{\text{пер},k}; \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{пр},k}$ – коэффициент звукопроводности k -ого участка оконного блока (перегородки); $F_{\text{пер},k}$ – площадь k -ого участка перегородки, м^2 .

Среднее значение коэффициента звукопроводности

$$\alpha_{\text{пр},\text{ср}} = A_{\text{пр}}/F_{\text{пер},\Sigma} = A_{\text{пр}}/\sum_k F_{\text{пер},k}; \quad (5)$$

где $F_{\text{пер},\Sigma}$ – общая площадь оконного блока (перегородки), м^2 .

По среднему значению $\alpha_{\text{пр},\text{ср}}$ вычисляется среднее значение звукоизоляции (дБ) оконного блока.

$$Q_{\text{пер},\text{ср}} = 10 \cdot \log(1/\alpha_{\text{пр},\text{ср}}); \quad (6)$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности оконного блока

$$\lambda_{\text{ср}} = \sum_k \lambda_{\text{экв},k} \cdot F_{\text{пер},k} / F_{\text{пер},\Sigma}; \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{экв},k}$ – эквивалентный коэффициент k -ого смежного участка (стеклопакета и пластикового профиля), $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [10].

Среднее значение термического сопротивления[8] оконного блока

$$R_{\text{ср}} = \sum_k R_{\text{экв},k} \cdot F_{\text{пер},k} / F_{\text{пер},\Sigma}; \quad (8)$$

где $R_{\text{экв},k}$ – эквивалентное термическое сопротивление k -ого смежного участка, $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$ [3].

В таблице 2 приведены значения ТЗФС оконных блоков в зависимости от схемы (конструкции) стеклопакетов. Конструкция оконных блоков состоит из участков: 70% – стеклопакет, 30% – пластиковый профиль. Расчёты выполнены на 1 м^2 оконного блока.

Таблица №2.

Теплофизические и звукофизические свойства оконного блока, состоящего из стеклопакета (70%) и пластикового профиля (30%), на 1 м² оконного блока.

Схема стеклопакета	Конструкция стеклопакета	Теплопроводность $\lambda_{\text{ПКБ}}$ (Вт/м·К)	Термическое сопротивление $R_{\text{ПКБ}}$ (м ² ·К/Вт)	Звукоизоляция $Q_{\text{пер}}$ (дБ)
К-1	4-16-4	0,171	0,144	18
К-2	4и-16-4	0,059	0,48	20
К-3	4бронза-16-4	0,18	0,149	21
К-4	4и-24-4	0,0614	0,597	26
К-5	4-10-4-10-4	0,137	0,256	25
К-6	4и-10-4и-10-4	0,085	0,447	28
К-7	4и-10-4-10-4и	0,059	0,655	32

Резюме.

1. В работе впервые приведена зависимость коэффициента звукопроводности $\alpha_{\text{пр}}$ от звукоизоляции $Q_{\text{пер}}$ (формула 3);

2. В работе впервые приведена зависимость звукоизоляции $Q_{\text{пер}}$ от коэффициента звукопроводности $\alpha_{\text{пр}}$ (формула 6);

3. В работе впервые приведены тепло- и звукофизические свойства оконных блоков, состоящих из смежных участков: пластикового профиля (30%) и стеклопакетов (70%) различной конструкции (одно- и двухкамерные, с теплозащитными плёнками в различных комбинациях);

4. В работе впервые приведены тепло- и звукофизические свойства стеклопакетов различной конструкции (одно- и двухкамерные, с теплозащитными плёнками в различных комбинациях);

5. В работе приведена методика расчёта средних значений для смежных участков светопрозрачных ограждений:

– Среднее значение звукоизоляции $Q_{\text{пер, ср}}$;

– Среднее значение термического сопротивления $R_{ср}$

6. Наиболее оптимальной конструкцией стеклопакета с точки зрения теплофизических свойств является конструкция 4п-10-4-10-4п.

7. Полученные в работе материалы исследований ТЗФС светопрозрачных ограждений зданий и сооружений позволяет выполнить технико-экономические расчёты по выявлению оптимальной конструкции оконного блока по дисконтированным коэффициентам и срокам окупаемости.

Литература

1. Корольков В.Г., Сапожков М.А.; Справочник по акустике. Под общей редакцией М.А. Сапожкова - М.: Радио и связь, 1979. – 312 с.
 2. Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г. Стеклопакеты и их теплофизические свойства: монография. - Санкт-Петербург: Научные технологии, 2017. - 130 с.
 3. Kobuliev Z.V. Modeling of process of karring heat and account of heat conductivity of composite materials / Z.V.Kobuliev, A.Sh.Sharifov, M.M.Safarov // ICCE/6, Sixth annual international conference on composites engineering. - Orlando, Florida, 1999. -pp.761-762.
 4. Шеина С.Г., Миненко А.Н. Анализ и расчет «мостиков холода» с целью повышения энергетической эффективности жилых зданий // Инженерный вестник Дона, 2012, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1097.
 5. Руденко, Н.Н., Фурсова И.Н. Влияние нестационарных тепловых условий на определение термического сопротивления ограждения // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_84_Rudenko.pdf_2079.pdf.
 6. Bhatia A. Heat Loss Calculations and Principles, M04-003 Continuing Education and Devekopment, NY. 52 p.
-



7. Hans U. Fuchs. The Dynamics of Heat: A Unified Approach to Thermodynamics and Heat Transfer. 734 p.
8. Малявина Е.Г. Теплопотери здания. Справочное пособие. Москва «АВОК-ЭКСПРЕСС», 2007. 265 с.
9. Ковылин А. В., Карапузова Н. Ю., Усадский Д. Г., Лепилов В. И. Теплофизические свойства светопрозрачных конструкций зданий и сооружений: монография / Волгогр. гос. техн. ун-т. - Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2018. - 97 с.
10. Лепилов В. И., Карапузова Н. Ю., Ковылин А. В., Попова А.В., Усадский Д. Г. Теоретические основы определения теплофизических свойств материалов и тепломассообменных процессов в ограждениях: учеб. пособие / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архитектур. -строит. ун-т. - Волгоград, 2015. - 116 с.

References

1. Korol'kov V.G., Sapozhkov M.A.; Spravochnik po akustike. Pod obshej redakciej M.A. Sapozhkova [Handbook of acoustics]. M.: Radioisvyaz', 1979. 312 p.
2. Fokin V. M., Kovylin A. V., Usadskij D. G. Steklopakety` i ix teplofizicheskie svojstva: monografiya [Double-glazed windows and their thermophysical properties] Sankt-Peterburg: Naukoemkie texnologii, 2017. 130 p.
3. Kobuliev Z.V. Sixth annual international conference on composites engineering. Orlando, Florida, 1999. pp.761-762.
4. Sheina S.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4r1y2012/1097.
5. Rudenko, N.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/R_84_Rudenko.pdf_2079.pdf.
6. A. Bhatia. M04-003 Continuing Education and Devekopment, NY. 52 p.



7. Hans U. Fuchs. A Unified Approach to Thermodynamics and Heat Transfer. 734 p.
8. Malyavina E.G. Teplopoteri zdaniya. Spravochnoe posobie.[Heat loss of the building. Reference Guide]. Moskva «AVOK-E`KSPRESS», 2007. 265 p.
9. Kovylin A. V., Karapuzova N. Ju., Usadskij D. G., Lepilov V. I. Teplofizicheskie svojstva svetoprozrachny`x konstrukcij zdaniy i sooruzhenij: monografiya [Thermo physical properties of translucent structures of buildings and structures]; Volgogr.gos. texn. unt. Volgograd: IzdvoVolgGTU, 2018. 97 p.
10. Lepilov V. I., Karapuzova N. Ju., Kovylin A. V., Popova A.V., Usadskij D. G. Teoreticheskie osnovy` opredeleniya teplofizicheskix svojstv materialov i teplomass obmenny`x processov v ograzhdeniyax: [The theoretical basis for determining the thermophysical properties of materials and heat and mass transfer processes in fences] Mvo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Volgogr. gos. arxitektur. stroit. unt. Volgograd, 2015. 116 p.