

Теоретическое обоснование экспериментальной зависимости для сопротивления теплопередаче оконных блоков

Рецензия эксперта на статью получена
10.12.2019 [Expert review on the article
received on December 10, 2019].

Применение оконных блоков с повышенным сопротивлением теплопередаче, представляющих собой главным образом стеклопакеты, в том числе с заполнением межстекольного пространства инертными газами и с теплоотражающими покрытиями на внутренней поверхности стёкол, служит одним из наиболее эффективных и относительно малозатратных способов снижения энергопотребления зданий на обеспечение их внутреннего микроклимата. Однако для получения достоверных данных при оценке класса энергопотребления зданий по методике СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» (далее СП 50) следует знать, что по требованиям ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче» (далее ГОСТ 26602.1) измерение сопротивления теплопередаче оконного блока $R_{ок}$ [$\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$] производится при расчётной температуре наружного воздуха t_n , равной температуре наиболее холодной пятидневки, но не выше -20°C . В то же время расчёт энергопотребления и определение класса энергосбережения здания по СП 50 осуществляется при средней температуре за отопительный период $t_{оп}$, из-за чего появляется заметная погрешность в вычислении теплотрат.

Вопросы теоретической и экспериментальной оценки изменения $R_{ок}$ в зависимости от t_n и некоторых других факторов, а также влияние этого изменения на энергопотребление здания рассматривались в работах ряда авторов, как отечественных, так и зарубежных [1–8], однако простых инженерных зависимостей для $R_{ок}$, пригодных для использования в практике проектирования, предложено не было.

Применение оконных блоков с повышенным сопротивлением теплопередаче, представляющих собой главным образом стеклопакеты, служит одним из наиболее эффективных и относительно малозатратных способов снижения энергопотребления зданий на обеспечение их внутреннего микроклимата

В связи с этим рассмотрим основные особенности теплопередачи через оконный блок и теплообмена на его поверхностях. Вообще говоря, конструкция оконного блока включает в себя как светопрозрачную, так и нестепрозрачную части, и их сопротивления теплопередаче должны зависеть от относительной разности температур по-разному, поскольку отличается физический механизм теплопереноса.

Так, для светопрозрачной части преобладающую роль играют конвекция и излучение, поэтому здесь величина $R_{ок}$ будет связана со значением числа Нуссельта, а значит, и безразмерного критерия Грасгофа:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, Gr = \frac{g \beta \Delta t l^3}{\nu^2} [3-5],$$

здесь α — коэффициент конвективного теплообмена, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $g = 9,81 \text{ м} / \text{с}^2$ — ускорение свободного падения; β — коэффициент температурного расширения среды, К^{-1} ; ν и λ — её кинематическая вязкость [$\text{м}^2 / \text{с}$] и теплопроводность [$\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$], соответственно; l — характерный размер, м (для оконного блока это обычно высота); Δt — расчётная разность температур [К], в качестве которой целесообразно принять $\Delta t = t_b - t_n$.

УДК 697.1:536.24. Научная специальность: 05.23.03.

Теоретическое обоснование экспериментальной зависимости для сопротивления теплопередаче оконных блоков

О. Д. Самарин, к.т.н., доцент; **П. В. Винский**, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

В работе рассмотрена актуальность уточнения уровня теплозащиты светопрозрачных конструкций, используемого при оценке годового энергопотребления зданий. Приведена теоретическая зависимость для сопротивления теплопередаче оконных блоков типа стеклопакетов, учитывающая характер изменения различных составляющих теплообмена на всех поверхностях остекления при колебаниях расчётной разности температур снаружи и внутри помещения. Показаны результаты расчётов с использованием данной зависимости, представлено их упрощённое описание в виде степенной формулы и дано их сопоставление с данными экспериментального определения теплозащитных свойств стеклопакетов, которые были получены авторами в ходе осуществления предыдущих исследований. Отмечено, что теоретическая зависимость является наиболее физически обоснованной и в достаточной степени подтверждается экспериментальными данными, в том числе имеющимися у других авторов.

Ключевые слова: оконный блок, стеклопакет, сопротивление теплопередаче, критерий Грасгофа, поле корреляции, степенная зависимость.

UDC 697.1:536.24. The number of scientific speciality: 05.23.03.

Theoretical justification of the experimental dependence for the thermal resistance of window units

O. D. Samarín, PhD, Associated Professor; **P. V. Vinskii**, lecturer, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGUSU)

The paper considers the relevance of clarifying the level of thermal protection of translucent structures used in assessing the annual energy consumption of buildings. The theoretical dependence for the thermal resistance of window units of the type of double-glazed windows is presented, taking into account the nature of the changes in the various components of heat exchange on all surfaces of glazing with fluctuations in the calculated temperature difference outside and inside the room. The results of calculations with the use of this dependence are shown, their simplified description in the form of a power formula is presented and their comparison with the data of experimental determination of heat-protective properties of double-glazed windows, which were obtained by the authors in the course of previous studies, is given. It is noted that the theoretical dependence is the most physically justified and sufficiently confirmed by experimental data, including those available from other authors.

Key words: window unit, glass stack, thermal resistance, Grashoff criterion, correlation field, power dependence.

Для части теплопереноса, вызванного конвекцией, эта зависимость будет степенной, хотя в основном это справедливо для центральной части стеклопакета. Для лучистой составляющей она либо отсутствует, либо не степенная, потому что в данном случае связь с Gr оказывается лишь косвенной — постольку, поскольку разность температур, непосредственно определяющая теплообмен излучением, влияет на значение критерия Gr .

Для несветопрозрачной части основную роль в теплопереносе играет теплопроводность, поэтому там зависимость оказывается также очень опосредованной, в той мере, в которой температура влияет на теплофизические свойства материала и на коэффициенты поверхностного теплообмена.

Поэтому в самом общем виде зависимость для величины $R_{ок}$ можно описать следующим выражением:

$$R_{ок} = \frac{A_{ст} + A_{рам}}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{\alpha_v} + \frac{N}{B + CGr^n} + \frac{A_{рам}}{R_{рам}}} + L\Psi, \quad (1)$$

где $A_{ст}$ и $A_{рам}$ — площади светопрозрачной и несветопрозрачной частей оконного блока, соответственно, m^2 ; α_v и α_n — коэффициенты полного теплообмена на внутренней и наружной поверхностях светопрозрачной части, соответственно, $Вт/(м^2 \cdot К)$; $R_{рам}$ — сопротивление теплопередаче несветопрозрачной части [$м^2 \cdot К/Вт$] в предположении, что оно очень слабо зависит от разности температур; L — периметр рамы, $м$; Ψ — удельные потери теплоты через линейную теплотехническую неоднородность — примыкание к оконному переплету, $Вт/(м \cdot К)$; B и C — числовые коэффициенты [$Вт/(м^2 \cdot К)$] для нестепенной и степенной частей зависимости коэффициента теплопередачи через светопрозрачную часть от критерия Gr , то есть практически для лучистой и конвективной составляющих; N — число внутренних поверхностей остекления.

Однако с точки зрения возможности практического использования и последующего анализа получаемых результатов основное значение имеет не столько физическая обоснованность формулы и полнота учёта ею влияющих факторов, сколько простота и прозрачность, а также уровень точности, которую она обеспечивает и которая должна соответствовать имеющейся неточности исходных данных и принятой погрешности инженерных расчётов. И если все перечисленные условия выполняются, получаемая упрощённая зависимость оказывается вполне равноценной исходной.

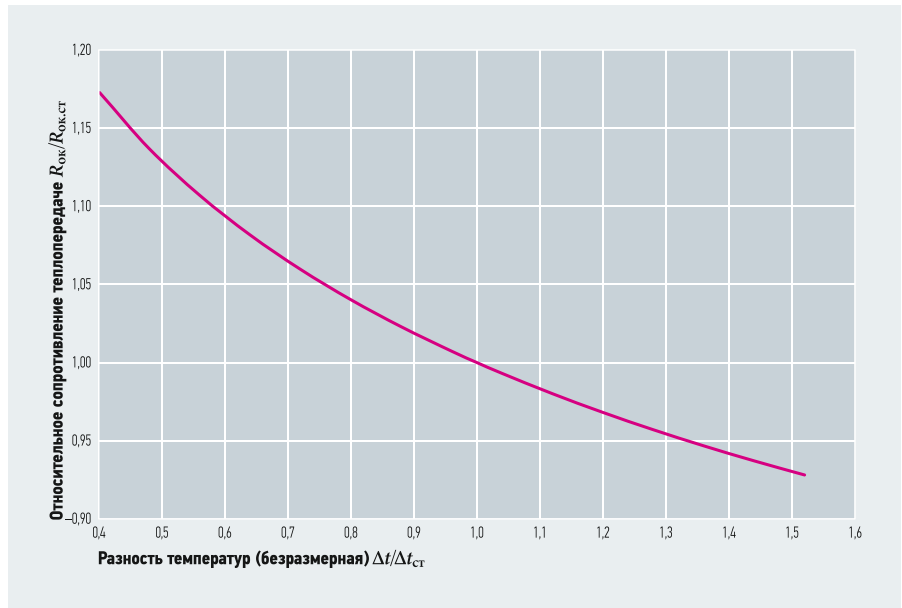


Рис. 1. Зависимость относительного сопротивления теплопередаче оконного блока от безразмерной разности температур

Характеристики оконного блока для расчёта сопротивления теплопередаче

табл. 1

$A_{ст}, m^2$	$A_{рам}, m^2$	L, m	$\Psi, Вт/(м \cdot К)$	$\alpha_v, Вт/(м^2 \cdot К)$	$\alpha_n, Вт/(м^2 \cdot К)$	$R_{рам}, м^2 \cdot К/Вт$	$B, Вт/(м^2 \cdot К)$	$C, Вт/(м^2 \cdot К)$	k	n	N
1,18	0,61	5,36	0	8,0	23	0,6	4,9	0,00213	0,4	0,3	2,0

В связи с этим были выполнены расчёты значений $R_{ок}$ по выражению (1) для различных значений входящих в него параметров, но лежащих в пределах, имевших место при выполнении авторами экспериментальных исследований, с целью сравнения с результатами, даваемыми полученной ранее упрощённой степенной зависимостью.

Заметим вначале, что величина α_v , несмотря на то, что её нормируемое значение приведено в СП 50, на самом деле также является переменной и должна описываться такой же по форме зависимостью, как и для коэффициента теплообмена в межстекольном пространстве, то есть $B + CGr^n$, где Gr_v — критерий Грасгофа, вычисляемый по разности температур внутреннего воздуха и на внутренней поверхности остекления. Поскольку она пропорциональна общей разности температур с коэффициентом, равным $\alpha_v R_{ок}$, но оба множителя являются переменными, можно в первом приближении считать, что $Gr_v = kGr$, где k — неко-

торый параметр, который предварительно можно оценить в 0,3–0,4, с последующим уточнением по ходу расчёта.

Кроме того, строго говоря, дополнительные теплотери через линейную теплотехническую неоднородность в виде оконного откоса должны определяться при расчёте приведённого сопротивления несветопрозрачной части фасада, поэтому, во избежание двойного учёта, при вычислении $R_{ок}$ нужно полагать $\Psi = 0$. На рис. 1 представлены результаты вычислений по формуле (1) для оконного блока в виде однокамерного стеклопакета с характеристиками, приведёнными в табл. 1.

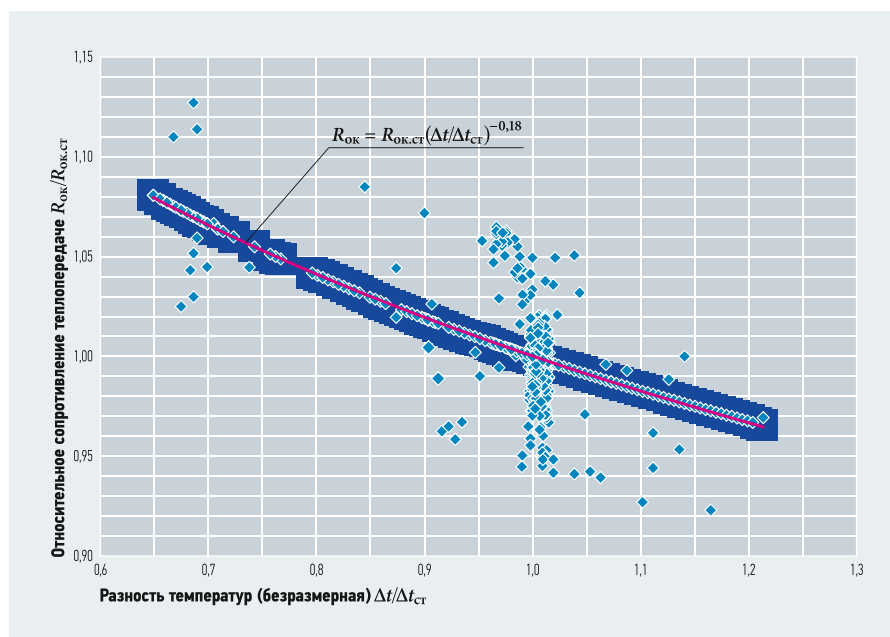
Для общности вычисляемые значения изображены в безразмерном виде. Обнаруживаемая зависимость хорошо аппроксимируется степенной формулой:

$$R_{ок} = R_{ок,ст} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_{ст}} \right)^{-0,18}. \quad (2)$$

Соответствующий график совпадает с кривой на рис. 1 в пределах толщины линии. Здесь $R_{ок,ст}$ — значение $R_{ок}$, полученное при $\Delta t = \Delta t_{ст}$, то есть при некоторой стандартной разности температур $(t_v - t_n)_{ст}$, в качестве которой можно, например, рассматривать разность, требуемую по ГОСТ 26602.1.

Таким образом, несмотря на кажущуюся сложность исходной формулы (1), результаты расчётов по ней позволяют с очень хорошей точностью пользоваться упрощённым выражением в форме (2).

С точки зрения возможности практического использования и анализа получаемых результатов основное значение имеет не столько физическая обоснованность формулы, сколько простота и прозрачность, а также уровень точности



■ Рис. 2. То же, что на рис. 1, по экспериментальным данным [9] с исключением недостоверных измерений

Однако в публикации [9] авторами на основании обработки экспериментальных данных первоначально было получено соотношение типа (2), но с гораздо большим показателем степени, равным $(-0,58)$. В то же время предварительная оценка последующих измерений, приведённых в [10], свидетельствовала о справедливости именно формулы (2) с показателем $(-0,18)$, хотя разброс точек на поле корреляции допускал возможность интерпретации результатов в пользу подтверждения данных [9].

Однако представленный выше теоретический анализ показывает, что с учётом всех составляющих теплообмена на по-

Мы получили дополнительное обоснование полученной ранее авторами формы экспериментальной зависимости теплозащитных свойств современных заполнений световых проёмов от текущих параметров наружного климата. Поэтому её действительно можно использовать в инженерных расчётах для более точной оценки годового энергопотребления зданий и определения их класса энергосбережения в соответствии с методикой СП 50



■ Рис. 3. То же, что на рис. 1, по экспериментальным данным [10]

верхностях остекления и характера их зависимости от величины Δt наиболее физически обоснованной является зависимость в форме (2) с принятым в ней показателем степени, которая в действительности подтверждается результатами [10] и даже частично [9], если из них исключить серию измерений, содержащую, по-видимому, грубые ошибки за счёт отклонения от необходимых условий, а также соответствует данным других авторов, в частности, [1, 3, 5, 7, 8]. Соответствующие поля корреляции показаны на рис. 2 и 3.

Таким образом, мы получили дополнительное обоснование полученной ранее авторами формы экспериментальной зависимости теплозащитных свойств современных заполнений световых проёмов от текущих параметров наружного климата. Поэтому её действительно можно использовать в инженерных расчётах для более точной оценки годового энергопотребления зданий и определения их класса энергосбережения в соответствии с методикой СП 50, как это было предложено в работах [9, 10], при условии использования показателя степени, указанного в формуле (2).

Данное выражение имеет простой вид и доступно для применения в практике массового проектирования. ●

1. Curtland Chr. High-performance glazings: Windows of opportunity. Buildings. 2013. No. 10. Pp. 13–23.
2. Horikiri K., Yao Y., Yao J. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment. Building and Environment. 2014. No. 77. Pp. 135–147.
3. Корепанов Е.В. Анализ путей повышения сопротивления теплопередаче окон // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты, 2015. №20. С. 84–88.
4. Корепанов Е.В. Выбор критериальных уравнений для эквивалентной теплопроводности светопрозрачной части окна при расчёте теплопотерь через стены с окнами // Журнал С.О.К., 2016. №12. С. 76–79.
5. Кривошеин А.Д. К вопросу о проектировании тепловой защиты светопрозрачных и непрозрачных конструкций [Электр. ресурс]. «Окна. Двери. Фасады» от 05.05.2014. Режим доступа: odf.ru. Дата обращения: 28.02.2016.
6. Allan Hani, Teet-Andrus Koiv. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings. Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. No. 3. Pp. 231–238.
7. Зимин А.Н., Бочков И.В., Крышов С.И., Умнякова Н.П. Сопротивление теплопередаче и температура на внутренних поверхностях светопрозрачных ограждающих конструкций жилых зданий г. Москвы // Жилищное строительство, 2019. №6. С. 24–29.
8. Захаров В.М., Авдониин Е.Г., Смирнов Н.Н., Яблоков А.А., Лапатеев Д.А. Разработка, программная реализация и проверка адекватности математической модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами // Вестник ИГЭУ, 2016. №3. С. 13–26.
9. Самарин О.Д., Винский П.В. Экспериментальная оценка теплозащитных свойств оконных блоков // Жилищное строительство, 2014. №11. С. 41–43.
10. Самарин О.Д., Винский П.В. Подтверждение экспериментальной оценки теплозащитных свойств оконных блоков // Журнал С.О.К., 2018. №4. С. 81–83.

References — see page 93.

Theoretical justification of the experimental dependence for the thermal resistance of window units. Pp. 85–87.

O.D. Samarin, PhD, Associated Professor; **P.V. Vinskii**, lecturer, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. Chr. Curtland. High-performance glazings: Windows of opportunity. Buildings. 2013. No. 10. Pp. 13–23.
2. K. Horikiri, Y. Yao, J. Yao. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment. Building and Environment. 2014. No. 77. Pp. 135–147.
3. E.V. Korepanov. *Analiz putej povysheniya soprotivleniya teploperedache okon* [The analysis of ways to increase the heat transfer resistance of windows]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty* ["The fundamental and applied researches: problems and results" Magazine]. 2015. No. 20. Pp. 84–88. [In Russian]
4. E.V. Korepanov. *Vybor kriterial'nykh uravnenij dlja jekvivalentnoj teploprovodnosti svetoprozrachnoj chasti okna pri raschete teplopoter' cherez steny s oknami* [Selection criterial equations for the equivalent thermal conductivity of the translucent part of the window when calculating the heat loss through the wall]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2016. No. 12. Pp. 76–79. [In Russian]
5. A.D. Krivoshein. *K voprosu o proektirovanii teplovoj zashchity svetoprozrachnykh i neprozrachnykh konstrukcij* [On the question of design of thermal protection of translucent and opaque constructions]. "Okna. Dveri. Fasady" ["Window. Doors. Facades" Magazine] on May 5, 2014. Web-source: odf.ru. Access data: February 28, 2016. [In Russian]
6. Allan Hani, Teet-Andrus Koiv. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings. Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. No. 3. Pp. 231–238.
7. A.N. Zimin, I.V. Bochkov, S.I. Kryshov, N.P. Umnjakova. *Soprotivlenie teploperedache i temperatura na vnutrennih poverkhnostyah svetoprozrachnykh ograzhdajushhih konstrukcij zhilykh zdaniy g. Moskvy* [Heat transfer resistance and temperature on the inner surfaces of translucent walling of residential buildings in Moscow city]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* ["Housing construction" Magazine]. 2019. No. 6. Pp. 24–29. [In Russian]
8. V.M. Zaharov, E.G. Avdjunin, N.N. Smirnov, A.A. Jablov, D.A. Lapateev. *Razrabotka, programnaya realizacija i proverka adekvatnosti matematicheskoi modeli processa teplopere-dachi cherez okno s teplootrazhajushimi jekranami* [Development, software implementation and checking the adequacy of the mathematical model of the heat transfer process through a window with heat-reflecting screens]. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of Ivanovo State Energy University]. 2016. No. 3. Pp. 13–26. [In Russian]
9. O.D. Samarin, P.V. Vinskij. *Jeksperimental'naja ocenka teplozashhitnykh svoystv okonnykh blokov* [Experimental assessment of heat-shielding properties of window blocks]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* ["Housing construction" Magazine]. 2014. No. 11. Pp. 41–43. [In Russian]
10. O.D. Samarin, P.V. Vinskij. *Podtverzhenie jeksperimental'noj ocenki teplozashhitnykh svoystv okonnykh blokov* [Confirmation of the experimental evaluation of the heat-shielding properties of window blocks]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 4. Pp. 81–83. [In Russian]