

УДК 697.1: 699.86

О.Д. САМАРИН, канд. техн. наук, П.В. ВИНСКИЙ, инженер (20petr00@mail.ru),
Московский государственный строительный университет

Особенности теплопередачи в современном энергоэффективном остеклении

Рассмотрена специфика теплопередачи в современных энергоэффективных конструкциях оконных блоков. Показана связь между измеряемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций и текущей температурой наружного воздуха. Выявлены перспективы совершенствования оценки теплотехнических свойств заполнений светопроемов с целью более корректного вычисления годовых затрат теплоты на отопление здания и технико-экономического обоснования применения окон с повышенным уровнем теплозащиты.

Ключевые слова: теплопередача, конвекция, лучистый теплообмен, энергоэффективное остекление, оценка теплозащитных свойств остекления.

Сокращение запасов ископаемого органического топлива и его постоянное удорожание требует поддержания необходимой комфортности внутреннего микроклимата помещений при минимальных материальных и энергетических затратах. Особую актуальность данный вопрос приобретает в настоящее время в связи с принятием Закона РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Однако снижение энергозатрат представляется прежде всего экономической категорией, поэтому в первую очередь необходимо рассматривать малозатратные и быстрокупаемые мероприятия, в том числе использование архитектурно-конструктивных и объемно-планировочных решений здания. Поскольку теплотери через заполнения светопроемов занимают существенное место в общем тепловом балансе помещения и могут достигать до 40% от всех теплотерь зданий, а замена остекления на более энергоэффективное по сравнению с модернизацией несветопрозрачных конструкций с технической точки зрения значительно проще, основное внимание следует уделять именно остеклению [1]. Особенно это перспективно с учетом активной роли остекления в энергообеспечении здания за счет теплоступлений от солнечной радиации.

Теплопередача в оконных блоках характеризуется:

- теплопроводностью через оконный блок;
- конвективным теплообменом у наружной и внутренней поверхностей остекления и в межстекольном пространстве;
- лучистым теплообменом между слоями остекления, наружным и внутренним пространством.

Рассмотрим особенности влияния конвективного и лучистого теплообмена на теплопередачу в современном энергоэффективном остеклении. Этим вопросом ранее занимались М.А. Михеев, Мак Грегор, Р. Эмери, Д. Дропкин, Э.А. Сидоров, Г.З. Гершуни, Е.М. Жуковицкий и др.

Для расчета конвективного теплообмена в межстекольном пространстве оконных блоков с высотой h и толщиной δ при $h/\delta < 1$ может применяться зависимость:

$$Nu = 0,119Gr_x^{0,3} \quad [2] \quad (1)$$

Число Грасгофа $Gr = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2}$ характеризует соотношение подъемной силы, возникающей вследствие разности плотностей жидкости или газа, и сил молекулярного трения. Здесь g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; β – температурный коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; ΔT – разность температуры, K ; l – линейный размер, m ; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/c .

Число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ есть мера отношения теплового потока, передаваемого конвекцией в направлении, перпендикулярном стенке, к тепловому потоку, передаваемому теплопроводностью через пограничный слой. Здесь α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$; λ – коэффициент теплопроводности среды, $Вт/(м \cdot К)$. Зная величину Nu , можно вычислить α как $Nu \frac{\lambda}{l}$.

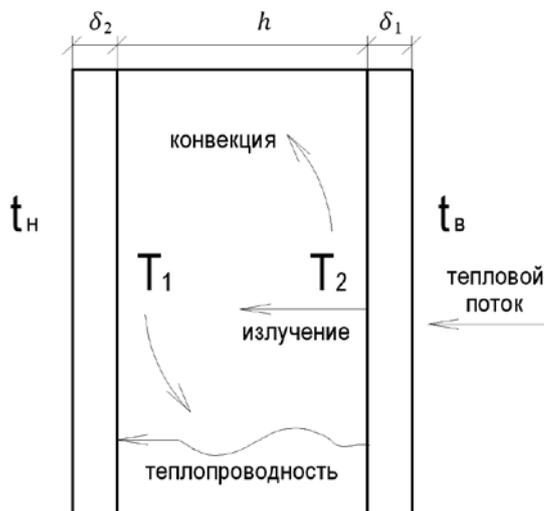


Рис. 1. Схема теплопередачи в оконном блоке

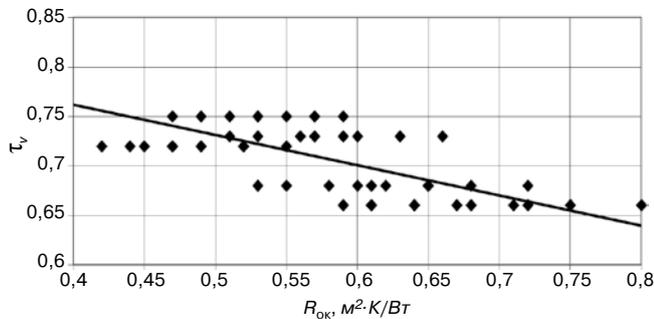


Рис. 2. Корреляционная зависимость коэффициента пропускания света в видимой части спектра τ_v от сопротивления теплопередаче $R_{ок}$

Для турбулентного режима течения в вертикальном ограниченном пространстве при условии, что на одной стороне $q_0 = const$, а на другой – $t_0 = const$, $10^6 < Ra < 10^9$, $1 < Pr < 20$, $1 < h/\delta < 40$ применяется уравнение: $Nu = 0,064 Ra^{0,33}$.

Число Рэлея $Ra = GrPr$ характеризует отношение потока теплоты в жидкости или газе за счет подъемной силы, возникающей вследствие неравномерности поля температуры у поверхности тела, к потоку за счет теплопроводности среды.

Число Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$, где a – коэффициент теплопроводности среды, m^2/s , является ее комплексным теплофизическим параметром.

Естественная тепловая конвекция в замкнутом межстекольном пространстве при различных потоках теплоты q_0 и температурах поверхностей t_1, t_2 существенно зависит от отношения h/δ .

Для расчета конвективного теплообмена в межстекольном пространстве оконных блоков с высотой h и толщиной δ при $h/\delta > 1$ для турбулентного режима зависимость выражается:

$$Nu_h = 0,05 [f(Pr) Ra_h]^{0,33} \quad (2)$$

Относительно границы перехода от ламинарного режима к турбулентному не существует единого мнения. По данным различных авторов, эта величина изменяется в большом диапазоне.

Для энергоэффективного остекления с применением селективных покрытий и заполнения воздушной прослойки инертными газами целесообразно использовать кондуктивно-конвективное число Нуссельта Nu_{mk} , которое учитывает перенос теплоты теплопроводностью и конвекцией [3].

В пределах $R_a = 7,2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5$ число Нуссельта в газовой прослойке двойного остекления описывается уравнением:

$$Nu_{mk} = 0,243 Ra^{0,268} (h/\delta)^{-0,24} \quad (3)$$

Для $R_a = 5 \cdot 10^5 - 1,6 \cdot 10^7$ можно записать соотношение:

$$Nu_{mk} = 0,42 Ra^{0,226} (h/\delta)^{-0,24} \quad (4)$$

Разграничение областей приходится на число Рэлея, приблизительно равное $5 \cdot 10^5$, что отвечает толщине прослойки около 40 мм. Иначе говоря, первая область характеризуется одноячейковым течением газа в прослойке, а вторая область – многоячейковым течением.

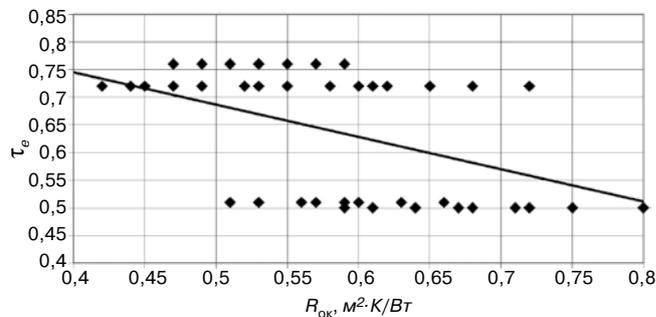


Рис. 3. Корреляционная зависимость коэффициента общего пропускания солнечной энергии τ_e от сопротивления теплопередаче $R_{ок}$

Для кондуктивно-конвективного числа Нуссельта внутренней прослойки тройного остекления используется уравнение:

$$Nu_{mk} = 0,292 Ra^{0,263} (h/\delta)^{-0,24} \quad (5)$$

Для наружной прослойки тройного остекления уравнение записывается следующим образом:

$$Nu_{mk} = 0,319 Ra^{0,25} (h/\delta)^{-0,24} \quad (6)$$

Помимо конвективного между плоской поверхностью остекления и окружающими ее телами происходит также лучистый теплообмен, и на поверхность остекления от окружающих тел падает лучистый тепловой поток. Часть потока падающего излучения поглощается остеклением, другая часть отражается от поверхности остекления и вместе с потоком собственного излучения остекления направляется к окружающим ее поверхностям тел.

Количество теплоты, передаваемое излучением с поверхности F_1 на поверхность F_2 , равно:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{np1-2} c_0 \varphi_{1-2} F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4], \text{ Вт}, \quad (7)$$

где ε_{np1-2} – приведенная степень черноты системы, которая зависит от степени черноты поверхностей тел ε_1 и ε_2 ; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,67 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K^4)$; T_1 и T_2 – абсолютные температуры поверхностей, К; φ_{1-2} – коэффициент, показывающий, какая часть излучения черной поверхности F_1 попадает на поверхность F_2 . Иначе он называется угловым коэффициентом или коэффициентом облученности и является геометрической характеристикой при лучистом теплообмене между телами.

При лучистом теплообмене в межстекольном пространстве величина теплового потока падающего излучения между двумя телами равна:

$$Q_{1-2} = q_1 F_1 = \varepsilon_{np} c_0 F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4], \text{ Вт}, \quad (8)$$

где приведенная степень черноты $\varepsilon_{np} = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$.

Коэффициент теплоотдачи излучением равен:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{np} c_0 [((t_1 + 273)/100)^4 - ((t_2 + 273)/100)^4] / (t_1 - t_2), \text{ Вт}/(m^2 \cdot K). \quad (9)$$

Здесь t_1 и t_2 – температура поверхностей, °С.

Коэффициент лучистой теплоотдачи уменьшается с понижением абсолютных значений температуры, а коэффициент конвективной теплоотдачи растет с увеличением разности температур. Поэтому в многослойных

Газ, заполняющий межстекольное пространство	$K_{\text{ком}}$, Вт/(м ² ·К), при толщине воздушной прослойки, мм:			
	6	9	12	15
Воздух	2,4	1,98	1,7	1,64
SF ₆	2,02	1,96	1,93	1,89
Ar	1,99	1,61	1,41	1,37
Kr	1,39	1,17	1,15	1,13

светопрозрачных конструкциях теплозащитные качества воздушной полости, расположенной со стороны наружного воздуха, выше, чем в прослойке со стороны внутреннего воздуха [4].

Для уменьшения теплопотерь надо стремиться к уменьшению конвективной и лучистой составляющих теплопередачи. Основными путями повышения приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока является применение многокамерного стеклопакета, наличие низкоэмиссионного покрытия на стекле, заполнение камер стеклопакета инертными газами, увеличение ширины оконной коробки и др.

В настоящее время применяют два основных типа покрытия: мягкого на основе металла или оксида металла (серебра – Ag) и твердого на основе оксида олова SnO₂ [5]. Стекла с мягкими и твердыми покрытиями называются соответственно *i*- и К-стеклами.

Данные покрытия могут повысить теплозащитные свойства стеклопакетов до 70% за счет снижения излучательной способности. Примером может служить стеклопакет с двумя *i*-стеклами и заполненный осушенным воздухом СПД 4-10-4-10-4 (шириной 32 мм), сопротивление теплопередаче которого $R_{\text{ок}}$ составляет 0,96 м²·К/Вт [6].

Но такое остекление, как правило, имеет пониженное светопропускание, в связи с чем могут возникнуть трудности с выполнением требований к необходимой естественной освещенности в помещениях, выражаемые нормируемым значением коэффициента естественной освещенности (КЕО). Это хорошо заметно по зависимостям, построенным по данным [5] и представленным на рис. 2 и 3.

В соответствии с рис. 3, корреляционную зависимость наиболее важной для расчета суммарного энергопотребления здания величины τ_e от $R_{\text{ок}}$ можно записать в виде $\tau_e = 1 - 0,6R_{\text{ок}}$. Для снижения конвективного теплообмена межстекольное пространство заполняют различными инертными газами (аргон, криптон, ксенон), которые имеют другие теплофизические свойства по сравнению с воздухом (таблица).

Так, замещение осушенного воздуха на криптоновую смесь в СПД 4-10-4-10-4 (шириной 32 мм) с обычными стеклами позволяет повысить его сопротивление теплопередаче с 0,54 до 0,65 м²·К/Вт – более чем на 20% [6].

Применение теплоотражающего покрытия эффективно одновременно с применением заполнения межстекольного пространства инертными газами. В этом случае сопротивление газовой прослойки теплопередаче повышается на величину до 30%.

В то же время обоснование применения заполнений светопроемов с высокими теплозащитными качествами требует адекватной оценки этих качеств, что значительно затрудняется несовершенством и противоречивостью нормативно-методической базы в данной области [7], а также несопадением отечественных и зарубежных требова-

ний к методике теплотехнических испытаний окон. Кроме того, определение $R_{\text{ок}}$ по ГОСТ 26602.1–99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче» осуществляются при расчетной температуре наружного воздуха t_n , равной температуре наиболее холодной пятидневки, но не выше –20°C, а оценка энергопотребления и энергоэффективности по СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий», в том числе по его актуализированной редакции СП 13.13330.2012, – при средней температуре за отопительный период, вследствие чего возникает большая погрешность в расчетах теплотрат. Как показали результаты многочисленных лабораторных испытаний, сопротивление теплопередаче полноразмерного элемента фасадной конструкции при температуре наружного воздуха, соответствующего температуре наиболее холодной пятидневки для Москвы $t_n = -28^\circ\text{C}$, и при температуре наружного воздуха $t_n = -10^\circ\text{C}$, соответствующей средней температуре января-февраля (СНиП 23-01–99* «Строительная климатология»), отличаются на 12–18% [8]. А в сравнении со средней температурой за отопительный период расхождения могут достигать уже 20–25%, что ведет к значительным погрешностям вычислений.

Таким образом, для совершенствования оценки теплотехнических свойств заполнений светопроемов необходимо предложение принципов и условий теплотехнических испытаний, учитывающих специфику климатических условий РФ и гармонизированных с европейскими стандартами, а также предложение расчетных зависимостей $R_{\text{ок}}$ от t_n , пригодных для оценки энергопотребления здания за отопительный период.

Список литературы

1. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М.: АСВ. 2011. 296 с.
2. Акельев В.Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / Под общ. ред. А.П. Несенчука Минск: БНТУ, 2010. 317 с.
3. Корепанов Е.В. Конвективный теплообмен в газовых прослойках окон с двойным и тройным остеклением // Материалы III Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». М.: МГСУ, 2009. С. 107–110.
4. Савин В.К. Строительная физика. Энергоперенос. Энергоэффективность. Энергосбережение. М.: Лазурь, 2005. 432 с.
5. Борискина И.В., Плотников А.А., Захаров А.В.. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий. СПб.: Выбор, 2008. 360 с.
6. Ким Л.М., Магай А.А., Черненко Е.Н. Повышение теплофизических качеств светопрозрачных конструкций // Окна. Двери. Фасады. 2011. № 2 (41). С. 70–75.
7. Куренкова А.Ю., Миков В.Л. О влиянии терминологии на теплотехнические показатели окон // Материалы II Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». М.: МГСУ, 2007. С. 58–62.
8. Верховский А.А., Нанасов И.И., Елизарова Е.В., Гальцев Д.И., Щередин В.В. Новый подход к оценке энергоэффективности светопрозрачных конструкций // Светопрозрачные конструкции. 2012. № 1 (81). С. 10–15.