

Разработка, программная реализация и проверка адекватности математической модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами

В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, Н.Н. Смирнов, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатеев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Снижение тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий промышленных предприятий является важной задачей, так как данные затраты тепловой энергии значительно влияют на себестоимость выпускаемой продукции. Существуют конструкции энергосберегающих окон с применением теплоотражающих экранов, а также технология предварительной осушки воздуха для систем прерывистого отопления зданий. Для обеспечения практического использования данных технологий необходимо разработать эмпирические формулы по определению приведенного сопротивления теплопередаче окон с теплоотражающими экранами с учетом внешних и внутренних факторов. В существующих методиках по определению трансмиссионных потерь через окна приведенное сопротивление теплопередаче принимается постоянным, хотя эта физическая величина для окон с использованием теплоотражающих экранов значительно изменяется.

Материалы и методы: Используются результаты экспериментальных исследований окон с теплоотражающими экранами, проведенных в сертифицированной климатической камере. Для проверки математической модели процесса теплопередачи через окно использовано конечно-элементное моделирование в программно-вычислительном комплексе Phoenix. Подбор параметров аппроксимирующей функции осуществлен с помощью методов наименьших квадратов.

Результаты: Создана математическая модель, описывающая процесс теплопередачи через окна с теплоотражающими экранами с учетом физико-геометрических параметров строительной конструкции. Разработана компьютерная программа по расчету процесса теплопередачи через окно, получены данные численного моделирования теплообмена при различных параметрах внутреннего и наружного воздуха. На основе разработанной методики получены выражения по определению приведенного сопротивления теплопередаче для конкретных типов стеклопакетов с теплоотражающими экранами, установленными снаружи. Адекватность предложенной математической модели подтверждена экспериментальными данными.

Выводы: Сопротивление окон с теплоотражающими экранами в процессе эксплуатации не является постоянной величиной и зависит от разности температур и значений скоростей внутреннего и наружного воздуха. Использование разработанной математической модели, программы по расчету приведенного сопротивления, эмпирических формул позволит более точно определить потенциал применения теплоотражающих экранов в окнах для систем прерывистого отопления зданий, в том числе в случае применения технологии предварительной осушки воздуха для влажного, мокрого или нормального режимов помещений промышленных предприятий.

Ключевые слова: окна с теплоотражающими экранами, математическая модель, приведенное сопротивление теплопередаче, центральная зона стеклопакета, теплообмен, система прерывистого отопления, регрессионный анализ, конвекция в воздушной прослойке.

Development, software implementation and verification of mathematical model of heat transfer through a window with heat-reflecting screens

V.M. Zakharov, E.G. Avdyunin, N.N. Smirnov, A.A. Yablokov, D.A. Lapateyev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: nsmirnov@bk.ru

Abstract

Background: Reducing heat losses through industrial enterprise building walling is an important task as these heat energy costs significantly impact production price. There are energy-efficient windows with heat-reflecting screen and air pre-drying technology for intermittent heating of buildings. In order to put these technologies into practice, it is necessary to develop empirical formulas that would account for indoor and outdoor conditions in calculation of reduced thermal resistance of windows with heat-reflecting screens. Thermal resistance is assumed constant in the existing methods of determining transmission losses through windows, although this physical quantity for windows with heat-reflecting screens varies considerably.

Materials and methods: The study was based on the results of field tests of windows with heat-reflecting screens in a certified climate chamber. The mathematical model of heat transfer through a window was verified in the finite-element simulation software package Phoenix. The approximating function parameters were selected by least squares method.

Results: We have developed a mathematical model to describe the heat transfer process through windows with heat-reflecting screens accounting for physical and geometrical parameters of building construction. We have also developed a computer program for calculation of heat transfer through the window and obtained results of numerical heat transfer simulation for different parameters of indoor and outdoor air. Based on the developed method, we have devised expressions to

determine reduced thermal resistance for specific types of glazing with heat-reflecting screens installed outside. The adequacy of the suggested mathematical model was confirmed by experimental data.

Conclusions: The resistance of windows with heat-reflecting screens in operation is not constant and depends on the temperature difference and velocity values of indoor and outdoor air. Using the developed mathematical model, program, empirical formulas for calculating thermal resistance will help more accurately determine the potential of using heat-reflecting screens in windows for intermittent heating systems, including technologies of air pre-drying for moist, wet or normal modes in industrial enterprise buildings.

Key words: windows with heat-reflecting screens, mathematical model, reduced thermal resistance, central zone of glazing unit, heat exchange, intermittent heating system, regression analysis, convection in air gap.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.013-026

Введение. Значительные затраты топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на промышленных предприятиях расходуются на поддержание параметров нормируемого микроклимата в производственных и административных зданиях. Весомая часть в данных энергетических затратах приходится на компенсацию трансмиссионных потерь через оболочку здания, особенно на восполнение тепловых потерь через светопрозрачные конструкции (окна, зенитные фонари и т.д.).

Достаточно часто параметры микроклимата определяются технологией производства конкретной продукции. Так, на прядильных и ткацких фабриках параметры микроклимата в производственных помещениях должны удовлетворять не только гигиеническим, но и технологическим требованиям, регламентированным в отраслевых нормах проектирования [1]. Технологический процесс прядения и ткачества зависит не только от температуры воздуха, но и от влажности полуфабриката [2]. При высокой относительной влажности воздуха увеличивается содержание влаги в волокнах хлопка и уменьшается их жесткость, значительно снижается частота обрыва ленты и улучшаются ее физические свойства (в том числе, механические и фрикционные). Увеличение относительной влажности воздуха приводит к снижению механической нагрузки на чесальные машины, в том числе уменьшается частота поломки движущихся деталей. В свою очередь, влажность полуфабриката определяется влажностью воздуха. Поэтому на протекание технологических процессов текстильного производства оказывает влияние не только температура, но и влажность окружающей среды. Высокая относительная влажность воздуха особенно характерна для производственных помещений таких текстильных предприятий, как хлопчатобумажные ($\varphi = 45\text{--}70\%$), шелковые ($\varphi = 50\text{--}75\%$), шерстяные ($\varphi = 60\text{--}75\%$), ковровые (55–75 %) фабрики.

Авторами [3] была разработана методика по определению значения температуры, до которой система автоматизации сможет понизить температуру воздуха при дежурном режиме отопления при условии недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности стекла окна. Минимальную температуру

внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления можно определить как

$$t_{\text{в}}^{\text{д}} = \frac{\tau_{\text{р}} \alpha_{\text{в}} R_{\text{окна}} - t_{\text{н}}}{\alpha_{\text{в}} R_{\text{окна}} - 1} + \Delta t_{\text{зап}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{р}}$ – температура точки росы при параметрах воздуха в рабочее время, которую можно определить по формуле Магнуса-Тетенса [3], °С; $\Delta t_{\text{зап}}$ – температурный запас по недопущению конденсации; $t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, °С; $R_{\text{окна}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной зоны окна, (м²·°С)/Вт; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к стеклу.

Температура точки росы $\tau_{\text{р}}$ в большей степени зависит от влажности и температуры воздуха в рабочее время.

В свою очередь, потери теплоты через наружные ограждающие светопрозрачные конструкции в теплотехнических расчетах определяются по формуле [4]

$$Q_{\text{h},j} = \frac{A_j}{R_j} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \left(1 + \sum_{i=1}^k \beta_i \right) \eta_j, \quad (2)$$

где A_j – расчетная площадь j -й ограждающей светопрозрачной конструкции, м²; R_j – приведенное сопротивление теплопередаче j -й ограждающей светопрозрачной конструкции, (м²·°С)/Вт; $t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха, °С; β_i – добавочные потери в долях от основных потерь; η_j – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху.

Исходя из формул (1) и (2) можно сделать вывод, что чем выше относительная влажность φ , тем выше будут температура точки росы, минимальная температура воздуха при дежурном режиме отопления и, следовательно, больше затраты на ТЭР. Аналогичные выводы можно сделать относительно сопротивления теплопередаче окон и зенитных фонарей. Чем выше значение R , тем будут ниже величина $t_{\text{в}}^{\text{д}}$ и, следовательно, потери теплоты через наружные ограждающие светопрозрачные конструкции $Q_{\text{h},j}$.

Сотрудниками ИГЭУ для повышения эффективности работы систем поддержания нормируемого технологического микроклимата на промышленных предприятиях с 1999 года [5]

разрабатываются и патентуются конструкции окон с теплоотражающими экранами панельного, рулонного и жалюзийного типа, выполненные из металла, которые значительно снижают тепловые потери. Применение экранов целесообразно в темное время суток или в отсутствие людей. Была также разработана методика [6] по предварительной осушке воздуха на промышленных предприятиях для снижения температуры точки росы τ_p и воздуха t_B^A .

Но для расчета реальной экономии тепловой энергии на компенсацию трансмиссионных потерь $\Delta Q_{h,j}$ необходимо знать фактическое сопротивление теплопередаче окон с теплоотражающими экранами. Следовательно, актуальной задачей является определение сопротивления R разработанных оконных конструкций не только исходя из результатов проведенных ранее натурных экспериментов, но и из расчетных данных математического моделирования с учетом изменяющихся параметров внутреннего микроклимата и окружающей среды. Математическое моделирование является также важным инструментом для определения оптимальных размеров конструкции окон с теплоотражающими экранами.

Целью данного исследования является разработка методики выведения эмпирических формул по нахождению приведенного сопротивления светопрозрачной части окон с теплоотражающими экранами на основе математической модели, описывающей процесс теплопередачи через данную ограждающую конструкцию.

Разработка математической модели, описывающей процесс теплопередачи через светопрозрачную часть окна с теплоотражающими экранами. Как известно, оконная конструкция состоит из светопрозрачной части и переплетов (деревянных, металлических, пластиковых).

Для большинства окон приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части для теплотехнических расчетов принимается постоянным, причем данные берутся из результатов сертификационных испытаний приведенного термического сопротивления окна. Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части окна R_o , $m^2 \cdot ^\circ C / \text{Вт}$, определяется по формуле

$$R_o = R_B + \sum R_i + R_H, \quad (3)$$

где R_B , R_H – сопротивления теплообмену на внутренней и внешней поверхностях ограждения соответственно, $(m^2 \cdot ^\circ C) / \text{Вт}$; $\sum R_i$ – сумма термических сопротивлений отдельных слоев стеклопакета и экранов, называемая термическим сопротивлением светопрозрачной части окна R_T , $(m^2 \cdot ^\circ C) / \text{Вт}$.

После подстановки в (3) выражений для сопротивлений теплообмену на внутренней и внешней поверхностях ограждения получим

$$R_o = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_H} = \frac{1}{\alpha_B^k + \alpha_B^l} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_H^k + \alpha_H^l}, \quad (4)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт} / (m^2 \cdot ^\circ C)$; α_B , α_H – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, $\text{Вт} / (m^2 \cdot ^\circ C)$; α_B^k , α_H^k – коэффициенты теплоотдачи конвекцией на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, $\text{Вт} / (m^2 \cdot ^\circ C)$; α_B^l , α_H^l – коэффициенты (условные) теплоотдачи излучением на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно, $\text{Вт} / (m^2 \cdot ^\circ C)$.

Следует отметить, что в конвективную составляющую при расчетах светопрозрачных конструкций также включают и теплопроводность.

В нормативной литературе при теплотехнических расчетах коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения принимают постоянными, независимыми от внешних факторов и распределения температур. Согласно рекомендациям [7], для окон $\alpha_B = 8,0 \text{ Вт} / (m^2 \cdot ^\circ C)$, $\alpha_H = 23 \text{ Вт} / (m^2 \cdot ^\circ C)$. В действительности коэффициенты теплоотдачи α_B и α_H не являются постоянными величинами, а зависят от параметров внутреннего и наружного воздуха.

Теплообмен на наружной поверхности окна. Моделирование процесса теплообмена на наружной поверхности производилось на основе результатов исследований ученых-тепловых физиков, таких как В.К. Савин [8], К.Ф. Фокин [9], Е.Г. Малявина [7], с использованием формул Франка

$$\alpha_H^k = 7,34 v_H^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_H} \quad (5)$$

и Стефана-Больцмана

$$\alpha_H^l = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{t_i + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{i+1} + 273}{100} \right)^4}{t_i - t_{i+1}}, \quad (6)$$

где v_H – скорость ветра снаружи, $\text{м} / \text{с}$; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения; t_i , t_{i+1} – температура серых тел (в данном случае – температура поверхности экрана t_H и окружающей среды t_n , соответственно, $^\circ C$).

Приведенный коэффициент излучения, согласно рекомендациям профессора МГСУ Е.Г. Малявиной, при произвольном расположении поверхностей удобнее считать по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} - \frac{1}{\varepsilon_{i+1}} - 1}, \quad (7)$$

где ε_i , ε_{i+1} – коэффициенты излучения двух серых поверхностей.

На основе проведенных исследований процесса теплопередачи через окна представители Американского общества инженеров по отоплению, холодоснабжению и кондициони-

рованию (ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.) Н. Ито (N. Ito), К. Кимура (K. Kimura) [10], Д.К. Арастех (D.K. Arasteh), М.С. Райли (Reilly M.S.) [11] предлагают нижеуказанные формулы для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией на наружной поверхности.

1. Если окно располагается с наветренной стороны:

- при скорости ветра $v_H < 2$ м/с

$$\alpha_H^K = 12,27 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C};$$

- при скорости ветра $v_H > 2$ м/с

$$\alpha_H^K = 8,07 \cdot v_H^{0,605}. \quad (8)$$

2. Если окно располагается с подветренной стороны:

$$\alpha_H^K = 18,64(0,3 + 0,05 \cdot v_H)^{0,605}. \quad (9)$$

Теплообмен на внутренней поверхности окна. Теплообмен на внутренней поверхности окна в большей степени определяется видом течения воздушных масс, обтекающих внутреннюю поверхность остекления, и разностью температур между внутренним воздухом $t_{вн}$ и на поверхности стекла τ_B .

Для вертикальных внутренних поверхностей в случае естественной конвекции коэффициент α_B^K в отапливаемых помещениях В.Н. Богословским [12] предложено определять по формуле

$$\alpha_B^K = 1,66 \sqrt[3]{(t_B - \tau_B)}. \quad (10)$$

Академик В.К. Савин [8] на основе проведенных исследований предлагает определять коэффициент для подкупольного пространства зенитных фонарей по формуле

$$\alpha_B^K = 2,5 \sqrt[3]{(t_B - \tau_B)}. \quad (11)$$

В случае расположения светопрозрачного ограждения, отличного от вертикального, В.К. Савин на основе исследований предлагает изменять коэффициент в формуле (11) согласно табл. 1.

Таблица 1. Зависимость постоянного коэффициента в формуле (11) от угла наклона конструкции относительно горизонта

Угол наклона конструкции относительно горизонта	0	15	30	45	60	90
Постоянный коэффициент в формуле (11)	2,5	2,2	2,1	2,0	1,8	1,7

Исследователи из ASHRAE [10, 11] предлагают при данных условиях определять α_B^K по формуле

$$\alpha_B^K = 1,77 \sqrt[4]{(t_B - \tau_B)}. \quad (12)$$

Если в помещении работает рециркуляционный вентиляционный аппарат или приток в помещение осуществляется механической вентиляцией, конвекцию следует считать вынужденной (при скорости воздуха выше 0,3 м/с) и коэффициент конвективного теплообмена мож-

но определить по формуле или по зависимости, рекомендуемой ASHRAE [10]:

$$\alpha_B^K = 5,6 + 3,8 \cdot v_B, \quad (13)$$

где v_B – скорость воздуха у внутренней поверхности ограждения, м/с.

Термическое сопротивление стеклопакета. Термическое сопротивление стеклопакета можно определить как

$$R_T = \sum R_i = \sum (R_{ст,i} + R_{пр,j}), \quad (14)$$

где $R_{ст,i}$ – сопротивление теплопередаче i -го стекла, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, определяемое отношением толщины стекла $\delta_{ст,i}$ к его теплопроводности $\lambda_{ст,i}$:

$$R_{ст,i} = \frac{\delta_{ст,i}}{\lambda_{ст,i}}; \quad (15)$$

$R_{пр,j}$ – сопротивление теплопередаче j -й воздушной (газовой) прослойки, ограниченной стеклами или теплоотражающими экранами, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$.

Так как стекло является полупрозрачным телом, то уместно использовать эффективную теплопроводность $\lambda_{эф}$, учитывающую проникающее излучение.

Теплообмен в воздушной прослойке.

Сопротивление теплопередаче для воздушной прослойки $R_{пр}$ можно определить по следующей формуле:

$$R_{пр} = \frac{1}{\alpha_{пр}^л + \alpha_{пр}^к}, \quad (16)$$

где $\alpha_{пр}^л$ – лучистая составляющая теплообмена в воздушной прослойке; $\alpha_{пр}^к$ – конвективная составляющая теплообмена внутри воздушной прослойки стеклопакета.

Лучистая составляющая теплообмена в воздушной прослойке описывается также уравнением Стефана-Больцмана:

$$\alpha_{пр}^л = 5,67 \times \varepsilon_{пр} \frac{\left(\frac{t_i + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{i+1} + 273}{100}\right)^4}{t_i - t_{i+1}}, \quad (17)$$

где t_i – температура на поверхности стекла (экрана), ограничивающей воздушную прослойку, с теплой стороны; t_{i+1} – температура на поверхности стекла (экрана), ограничивающей воздушную прослойку, с холодной стороны.

Расчет конвективной составляющей теплообмена внутри воздушной прослойки стеклопакета является довольно сложной задачей, но в общем случае определяется по формуле

$$\alpha_{пр}^к = \frac{\lambda}{h} \text{Nu}, \quad (18)$$

где λ – теплопроводность воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; h – толщина воздушной прослойки, м; Nu – критерий подобия Нуссельта.

В иностранной литературе [11] при расчете вертикальных воздушных прослоек в окнах при значении числа Релея $Ra < 2 \cdot 10^5$ принято использовать следующую формулу для определения числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = (1 + (0,0303 \cdot Ra^{0,402})^{11})^{0,091}. \quad (19)$$

Для прослоек, расположенных не вертикально, также предлагаются соответствующие формулы [11].

Академиком В.К. Савиным [8, 13] на основании проведенных исследований при соотношении высоты воздушной прослойки H , м, к ее толщине h , м, больше восьми $\left(\frac{H}{h} > 8\right)$, что

наиболее характерно для большинства современных стеклопакетов, было предложено использовать зависимости для горизонтальных ($\psi = 0$), вертикальных $\left(\psi = \frac{\pi}{2}\right)$ и наклонных $\left(0 < \psi < \frac{\pi}{2}\right)$ газовых прослоек в виде

$$\alpha_{пр}^k = \frac{\lambda}{h} Nu = \frac{\lambda}{h} 0,21 \cdot (1 + \psi)^{-0,33} Gr_h^{0,25}, \quad (20)$$

где ψ – угол наклона стеклопакета относительно горизонта, радиан.

Критерий Грасгоффа Gr определяется как

$$Gr = \frac{g h^3 \beta \Delta t}{\nu^2}, \quad (21)$$

где β – температурный коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; g – ускорение свободного падения, m/s^2 ; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ; Δt – разность температур поверхностей, ограничивающих воздушную прослойку, $^{\circ}C$.

Следовательно, для вертикальных прослоек

$$\alpha_{пр}^k = 0,283 \cdot \lambda \left(\frac{\beta}{\nu^2}\right)^{0,25} \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25} = 0,283 \cdot A \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}. \quad (22)$$

Был произведен расчет значения коэффициента $A = \lambda \left(\frac{\beta}{\nu^2}\right)^{0,25}$ для средней температуры среды в прослойке t_{cp} в диапазоне от -20 до $+20$ $^{\circ}C$ (табл. 2, рис. 1), причем было установлено, что для воздуха в данном температурном интервале значение A отличается от значения $A_{t=0^{\circ}C}$, определенного при $0^{\circ}C$, на $\pm 2,1$ %, для аргона – на $\pm 3,5$ %, для криптона – на $\pm 3,6$ %.

Для удобства расчетов коэффициент теплоотдачи конвекцией при средней температуре в прослойке $t_{cp} = 0^{\circ}C$ и ее вертикальном положении был определен следующим образом:

- для воздуха

$$\alpha_{пр}^k = 0,466 \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}; \quad (23)$$

- для аргона

$$\alpha_{пр}^k = 0,334 \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}; \quad (24)$$

- для криптона

$$\alpha_{пр}^k = 0,246 \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}. \quad (25)$$

Таблица 2. Значения коэффициента A в зависимости от средней температуры газов в прослойке

Среда	$t_{cp}, ^{\circ}C$	Значение коэффициента $A = \lambda \left(\frac{\beta}{\nu^2}\right)^{0,25}$ в формуле (22)	Расхождение с коэффициентом A при $t_{cp} = 0^{\circ}C$, %
Воздух	-20	1,68	1,7
	-10	1,66	0,9
	0	1,65	0
	10	1,63	-1,3
	20	1,61	-2,1
Аргон	-20	1,22	3,5
	-10	1,20	1,8
	0	1,18	0
	10	1,16	-1,6
	20	1,15	-3,0
Криптон	-20	0,904	3,6
	-10	0,887	1,7
	0	0,872	0
	10	0,860	-1,4
	20	0,850	-2,6

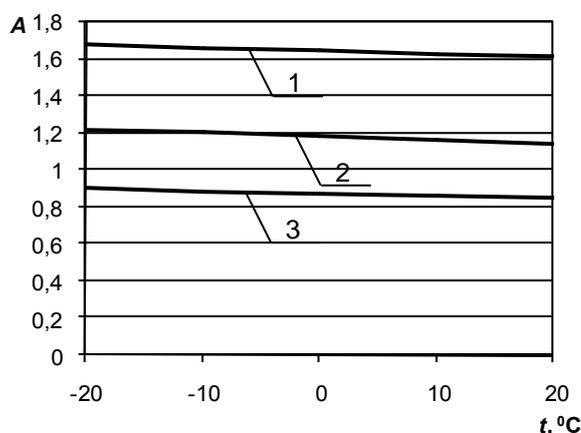


Рис. 1. Зависимость коэффициента A от средней температуры среды: 1 – для воздуха; 2 – аргона; 3 – криптона

Расчетная схема модели. Была составлена расчетная схема модели, описывающей процесс теплопередачи через светопрозрачную часть окна с использованием теплоотражающих экранов (рис. 2).

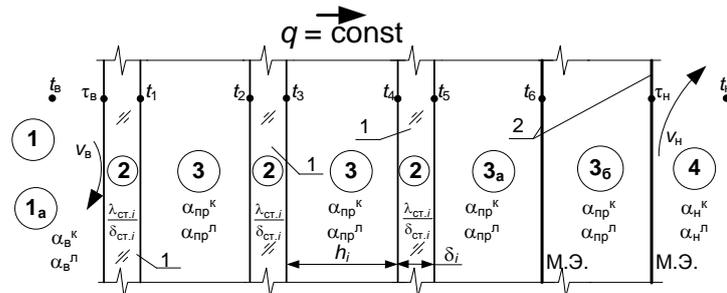


Рис. 2. Расчетная схема модели, описывающей процесс теплопередачи через окно с экранами: 1 – стёкла; 2 – металлические экраны

Математическая модель теплообмена через оконную систему с экранами рассматривается как многослойная безынерционная система [14], состоящая из слоев остекления, металлических экранов и замкнутых воздушных прослоек. Каждый слой имеет свои физико-геометрические параметры, определяемые применяемым материалом остекления и экранов, типом заполнения воздушных прослоек, толщиной слоев ($h, \delta_{ст.i}$) и т.д. На границах раздела сред (слоев) задаются условия равенства температур и тепловых потоков. В каждой воздушной прослойке, а также на внутренней и наружной поверхностях конструкции находится коэффициент теплоотдачи $\alpha_{i(j)}$, представляющий собой сумму конвективного $\alpha_{i(j)}^п$ и лучистого $\alpha_{i(j)}^к$ теплообмена:

$$\alpha_{i(j)} = \alpha_{i(j)}^п + \alpha_{i(j)}^к. \quad (26)$$

На рис. 2 и в табл. 2 в кружках указаны блоки уравнений, используемых для описания теплообмена в соответствующем слое.

Общим связующим уравнением в математической модели выступило уравнение постоянства удельного теплового потока:

$$q = \frac{(t_b - t_n)}{R_o} = \frac{\lambda_{ст.i}}{\delta_{ст.i}} (t_{ст.i} - t_{ст.i+1}) = \alpha_{пр.j} (t_j - t_{j+1}) = \quad (27)$$

$$\alpha_b (t_b - \tau_b) = \alpha_n (\tau_n - t_n) = const.$$

Таким образом, решение задачи определения значений температур поверхностей, теп-

лового потока, приведенного сопротивления теплопередаче через многослойную оконную конструкцию с теплоотражающими экранами состоит в решении системы уравнений в каждом слое. В математической модели не учитывались лучистые потоки от нагретого оборудования, расположенного внутри помещения, солнечная инсоляция, а также инертность конструкций.

Программная реализация математической модели. Система уравнений с граничными условиями третьего рода решалась численно в программной среде Matlab.

Разработанная математическая модель была реализована в программе для расчета процесса теплопередачи для стеклопакета (СП) с металлическими теплоотражающими экранами «Стеклопакет+Экраны». Была создана функция описания процесса теплообмена для каждого слоя энергосберегающей конструкции на основе вышеуказанных уравнений (см. табл. 2).

В качестве начальных данных в программу вводятся: число слоев остекления; число металлических экранов; последовательность расположения блоков уравнений. Тем самым описываются варианты расположения экранов относительно стеклопакета. Указывается геометрия оконной конструкции за счет введения таких данных, как толщина стекла $\delta_{ст}$, толщины (диапазон толщин) прослойки h между экранами, стеклами.

Таблица 2. Блоки уравнений, описывающих составляющие коэффициента теплоотдачи α_i в слоях расчетной схемы модели

№ блока	Вид теплообмена	Описывающие уравнения*
1	От внутреннего воздуха к стеклу (экрану), естественная конвекция	(10), (11), (12), (6), (7) [(10), (6), (7)]
1а	От внутреннего воздуха к стеклу (экрану), вынужденная конвекция	(13), (6), (7) [(13), (6), (7)]
2	Внутри стекла	$\frac{\lambda_{ст.i}}{\delta_{ст.i}}$
3	Внутри воздушной прослойки между стеклами	(18), (19), (20), (22), (17), (7) [(22), (17), (7)]
3а	Внутри воздушной прослойки между стеклом и экраном	(18), (19), (20), (22), (17), (7) [(22), (17), (7)]
3б	Внутри воздушной прослойки между экранами	(18), (19), (20), (22), (17), (7) [(22), (17), (7)]
4	От стекла (экрана) к наружному воздуху, вынужденная конвекция	(5), (6), (7), (8), (9) [(5), (6), (7)]

* В квадратных скобках указаны уравнения, применяемые в разработанной авторами программе «Стеклопакет+Экраны».

Указываются параметры сред, такие как теплопроводность, степень черноты. В качестве начальных данных приводятся значения (диапазон значений) температуры и скорости внутреннего и наружного воздуха, а также вид конвекции на внутренней поверхности окна. Для начала работы итерационного решателя, написанного на языке Matlab, задаются начальные приближенные значения теплового потока и температур на поверхностях. Программа на основе начальных данных определяет текущие значения коэффициентов теплоотдачи, тепловых потоков и уточненные значения температур поверхностей. С помощью функции *fsolve* вызывается оптимизатор и находятся искомые значения удельного теплового потока и температур поверхностей. Рассчитываются значения сопротивлений всех слоев оконной конструкции и приведенное сопротивление центральной зоны стеклопакета с экранами.

Результаты моделирования в программе. Результаты работы программы «Стеклопакет+Экраны» иллюстрирует рис. 3.

В качестве светопрозрачной конструкции использовался двухкамерный стеклопакет 4М1х10х4М1х10х4М1. Снаружи на равном расстоянии друг от друга $h = 10$ мм моделировалась установка теплоотражающих металлических экранов (МЭ), выполненных из полированного алюминия с $\varepsilon = 0,05$. Следовательно, формулу оконной конструкции можно записать как 4М1х10х4М1х10х4М1х10хМЭх10хМЭ. Температура внутреннего воздуха задавалась равной 20 °С, наружного – минус 15 °С. Скорость воздушного потока снаружи была задана равной 5 м/с. В ходе расчетов были определены значения температур на поверхностях. Невязка в расчетах температур поверхностей изменялась от 0,04 до 0,18 °С (или от 0,1 до 0,5 %). Температура на внутренней поверхности окна (рис. 3) t_b составила 16,3 °С; на внешней поверхности стеклопакета – $t_s = 7,3$ °С; на первом экране – $t_6 = -2,95$ °С; на втором – $t_n = -13,6$ °С. Тепловой поток составил 29,5 Вт/м², приведенное сопротивление теплопередаче $R_o = 1,18$ (м²·°С)/Вт, что на 0,70 (м²·°С)/Вт (или на 146 %) больше сопротивления СП 4М1х10х4М1х10х4М1 без экранов ($R_o = 0,48$ (м²·°С)/Вт).

Необходимо отметить, что значительную часть в приведенном сопротивлении данной конструкции дали термические сопротивления воздушных прослоек между стеклом и экраном ($R_{np} = 0,34$ (м²·°С)/Вт или 30 %) и между экранами ($R_{np} = 0,36$ (м²·°С)/Вт или 31 %), причем в данных слоях из-за высоких отражательных способностей полированного алюминия лучистый тепловой поток составил всего 8 и 5 % соответственно. Снаружи, ввиду высоких скоростей передвижения воздушных масс и небольшого ε полированного алюминия, лучистый тепловой поток пренебрежительно мал относительно конвективного и составляет всего 1 %.

Термическое сопротивление воздушных прослоек внутри стеклопакета составило 0,14 (м²·°С)/Вт (или 12 %). Внутри стеклопакета преобладает лучистый тепловой поток ($q^l = 70$ %).

В программе были также рассчитаны значения сопротивления теплопередаче оконной конструкции в составе СП 4М1х10х4М1х10х4М1 и металлических экранов при изменении разницы температур Δt между внутренним и наружным воздухом от 30 до 50 °С (при условии естественной конвекции внутри и $v_n = 5$ м/с (рис. 4, 5)).

Согласно полученным данным компьютерного моделирования (рис. 4), при изменении разницы температур Δt приведенное сопротивление теплопередаче оконной конструкции R_o остается условно постоянным для стеклопакета, так как изменения лучистого и конвективного коэффициентов теплоотдачи в воздушных прослойках взаимно компенсируются. Если же в конструкцию окна добавляются металлические экраны, установленные снаружи, то приведенное сопротивление объекта не только значительно увеличивается, но и становится зависимым от разницы температур Δt . Так, в случае использования одного металлического экрана снаружи при изменении Δt от 30 до 50 °С сопротивление окна R_o уменьшается с 0,83 до 0,79 (м²·°С)/Вт (или на 0,04 (м²·°С)/Вт). При применении трех металлических экранов данное снижение становится еще более заметным: сопротивление уменьшается с 1,72 до 1,58 (м²·°С)/Вт (или на 0,14 (м²·°С)/Вт). Эффект зависимости R_o от Δt придают оконной конструкции металлические экраны с высокой отражательной способностью, сводящие лучистый тепловой поток в воздушной прослойке к минимуму, причем чем больше число экранов, тем значительнее эффект. Дело в том, что при использовании экранов конвективный тепловой поток в воздушной прослойке увеличивается до 80–97 %, и ее термическое сопротивление, согласно (22), становится в большей степени зависимым от разницы температур на границах слоя и толщины прослойки. Если экраны в прослойке определенной толщины отсутствуют, то ее термическое сопротивление остается неизменным. Данное утверждение наглядно иллюстрируют рис. 4, 5.

Моделировалось также изменение толщины воздушной прослойки как в стеклопакете, так и в воздушном слое, образованном металлическими экранами, при скорости наружного воздуха $v_n = 5$ м/с и разности температур Δt между внутренним и наружным воздухом, равной 35 °С ($t_b = 20$ °С, $t_n = -15$ °С). Результаты влияния толщины h на термическое сопротивление воздушной прослойки R_{np} иллюстрирует рис. 6. Данные приведены для оконной конструкции 4М1хhх4М1хhх4М1хhхМЭхhхМЭ.

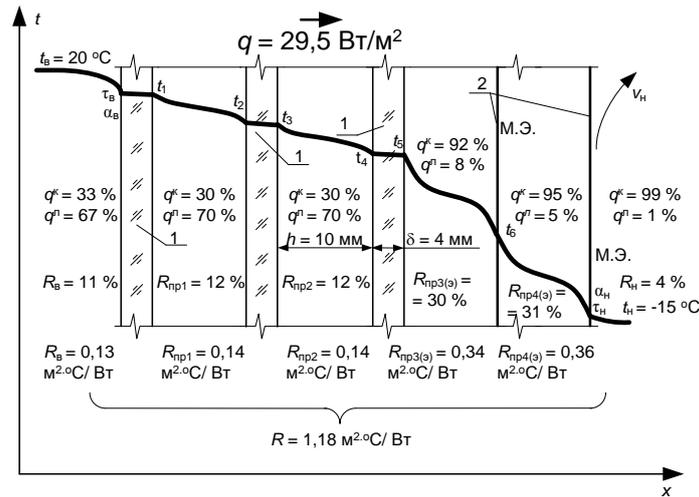


Рис. 3. Результаты моделирования процесса теплопередачи через стеклопакет с экранами в разработанной программе: 1 – стёкла; 2 – алюминиевые экраны

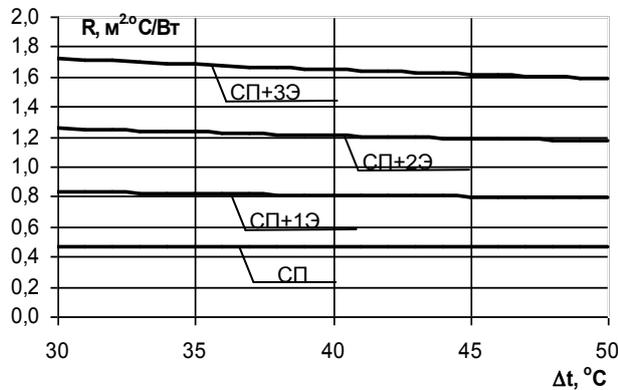


Рис. 4. Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче R_0 от разности температур между внутренним и наружным воздухом: СП – стеклопакет 4М1х10х4М1х10х4М; СП+1Э – стеклопакет с установленным снаружи одним металлическим экраном; СП+2Э – то же с двумя экранами; СП+3Э – то же с тремя экранами

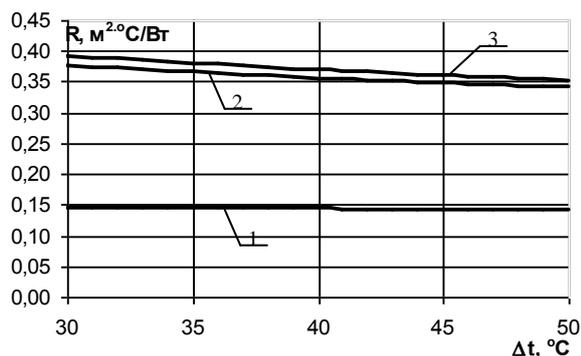


Рис. 5. Зависимость термического сопротивления теплопередаче воздушных прослоек $R_{пр}$ от разности температур Δt между внутренним и наружным воздухом для оконной конструкции в виде стеклопакета и двух установленных снаружи экранов (4М1х10х4М1х10х4М1х10хМЭх10хМЭ): 1 – прослойка между стёклами; 2 – между стеклом и экраном; 3 – между экранами

Согласно полученным данным, при изменении значения толщины прослойки h от 5 до 30 мм термическое сопротивление воз-

душной прослойки $R_{пр}$, ограниченной двумя стеклами, увеличилось незначительно (с 0,135 до 0,154 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$), т.е. на 14 %), а $R_{пр}$ прослойки между двумя экранами возросло от 0,31 до 0,48 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$), т.е. на 55 %. Следовательно, термическое сопротивление воздушных прослоек в стеклопакете и между экранами зависит как от ее ширины, так и от приведенной величины степени черноты $\epsilon_{пр}$. Чем ниже $\epsilon_{пр}$, тем большее приращение в термическом сопротивлении мы получаем от увеличения толщины прослойки, так как коэффициент теплоотдачи излучением пропорционально зависит от степени черноты $\epsilon_{пр}$. При небольших $\epsilon_{пр}$ преобладающую роль в теплообмене играет конвективный теплообмен, который, в свою очередь, зависит от толщины прослойки (см. формулу (22)).

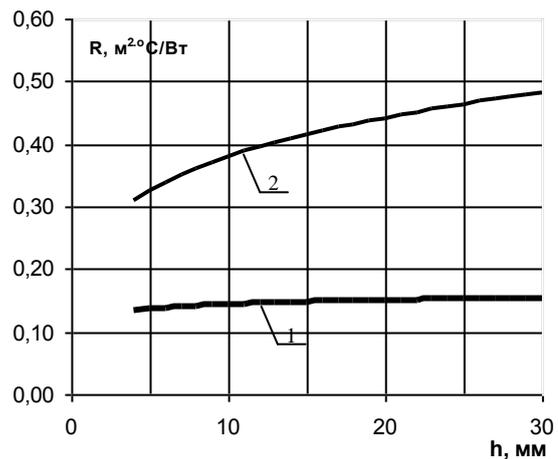


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления от толщины воздушной прослойки, ограниченной: 1 – стёклами; 2 – экранами

В воздушной прослойке в стеклопакете градиент увеличения уровня теплозащиты в диапазоне изменения h от 16 до 30 мм незначительный. Следовательно, оптимальной толщиной прослойки будет значение 16 мм. При изго-

товлении двухкамерных стеклопакетов [8] следует выбирать толщину прослойки 10–12 мм.

В воздушной прослойке между экранами градиент увеличения уровня теплозащиты в диапазоне изменения h от 25 до 50 мм незначительный. Следовательно, оптимальной толщиной прослойки будет значение 25 мм. Но целесообразнее было бы разбивать данную прослойку на несколько. Так, если мы разобьем воздушную прослойку толщиной 25 мм на 2 прослойки по 12 мм, то термическое сопротивление данной конструкции увеличится с 0,46 до 0,80 $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Дополнительное разбиение воздушной прослойки на несколько даст уменьшение разницы температур на поверхностях слоя, и тем самым еще более увеличится его сопротивление.

Следовательно, чем больше слоев в панели из металлических экранов, тем выше прирост сопротивления оконной конструкции.

Также было произведено моделирование теплообмена для окон с теплоотражающими экранами в случае окисления и запыления внешних сторон панели из металлических листов. Моделирование было произведено при расчетной скорости наружного воздуха $v_n = 5$ м/с и разности температур Δt между внутренним и наружным воздухом, равной 35 $^{\circ}\text{C}$ ($t_b = 20$ $^{\circ}\text{C}$, $t_n = -15$ $^{\circ}\text{C}$).

Так, в случае окисления внешних металлических листов теплоотражающей панели, состоящей из трех алюминиевых экранов с воздушной прослойкой 10 мм, приведенное сопротивление теплопередаче окна 4М1х10х4М1х10х4М1х10хМЭх10хМЭх10хМЭ снизилось с 1,68 (в контроле) до 1,57 $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ (или на 6 %). При высоком запылении теплоотражающих экранов и их сильном окислении сопротивление теплопередаче снизится до значения 1,40 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) (или на 17 %).

Было смоделировано и заполнение панели из трех теплоотражающих экранов малотеплопроводными газами, такими как аргон и криптон. В случае заполнения прослоек между экранами аргоном приведенное сопротивление оконной конструкции при вышеуказанных условиях возрастало до 1,90 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) (или на 13 %), в случае с криптоном сопротивление увеличивалось до 2,25 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) (или на 34 %).

Моделирование процесса теплопередачи в программно-вычислительного комплекса Phoenix. Второй вариант численного моделирования процесса теплопередачи через светопрозрачную часть стеклопакета с использованием металлических экранов был осуществлен методом конечных элементов с помощью программно-вычислительного комплекса Phoenix. Моделирование производилось для однокамерного стеклопакета 4М1х10х4М1 с размещенным на расстоянии 10 мм металлическим теплоотражающим экраном со степенью черноты $\varepsilon = 0,05$. Размеры

стекла (экрана) составляли 0,8×0,4 м. Решение осуществлялось на адаптивной сетке с ее сгущением в зонах наибольших градиентов температур. Количество узлов сетки составило $61 \times 48 \times 6 = 17568$. Температура внутреннего воздуха t_b задавалась равной 20 $^{\circ}\text{C}$, наружного – $t_n = -20$ $^{\circ}\text{C}$. Скорость наружного воздуха у поверхности экрана поддерживалась в пределах 4,8–5,2 м/с. Задача решалась как стационарная. Средняя относительная погрешность расчета температур на поверхностях стекол и экрана, в сравнении с данными математического моделирования в программе «Стеклопакет+Экраны», составила 6 %, в сравнении с экспериментальными данными – 4 %. В ходе моделирования процесса теплопередачи в программе Phoenix приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета составило 0,69 $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, в программе «Стеклопакет+Экраны» данная величина получилась равной 0,67 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$). Относительная погрешность расчета приведенного сопротивления теплопередаче в программе Phoenix составила 4,0 %.

На рис. 7, 8 показан вариант двумерного температурного поля, полученного с использованием программного пакета Phoenix. Значение температуры в каждой точке отображается цветовым оттенком в соответствии с приведенной шкалой.

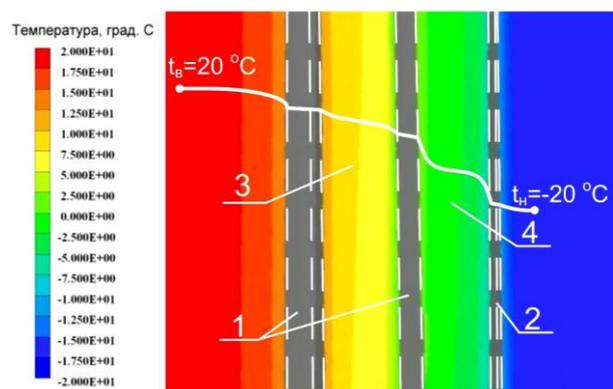


Рис. 7. Температурное поле воздушной среды в центральной части стеклопакета: 1 – стёкла; 2 – металлический экран; 3 – воздушная прослойка между стёклами; 4 – прослойка между стеклом и экраном

Анализ полученных результатов (рис. 7) показывает, что изменение температуры вдоль ширины прослойки отклоняется от линейного закона (рис. 7, температурный график), причем в прослойке, образованной стеклом и металлическим экраном, данное отклонение более выражено. Как показали исследования Е.В. Петрова, В.И. Терехова, А.Д. Кривошеина, Д.А. Харламова [15, 17], в прослойке образуются два пограничных слоя. Около стенки с большей температурой воздух движется вверх, а с меньшей – вниз, и профили скоростей у стенок имеют вид параболы. Дело в том, что ширина прослойки больше критического значения $L_{кр}$ (при данном перепаде температур),

поэтому и происходит конвективное движение воздуха, в противном случае передача тепла осуществлялась бы только теплопроводностью и излучением.

На рис. 8 наглядно видно изменение температур на поверхностях стекла и экрана. Мы можем наблюдать, что перепад температур на поверхностях наружного стекла ($\tau_1 = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$) и экрана ($\tau_{\text{нар}} = -17 \text{ }^\circ\text{C}$), равный $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$, значительно больше разницы температур на поверхностях стеклопакета, равной $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Это объясняется тем, что сопротивление воздушной прослойки стеклопакета составляет $0,14 \text{ (м}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C)/Вт}$, а прослойки, образованной стеклом и экраном, – в 2,2 раза больше и равно $0,61 \text{ (м}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C)/Вт}$. В верхней и нижней краевых зонах стеклопакета (рис. 8) мы можем наблюдать достаточное снижение температуры, так как в этих местах стекло примыкает к поверхности оконного проема, в данных зонах весомую роль играет сток теплоты через «мостики холода». Внутри межстекольного пространства, вследствие разности температур остекления, образуются восходящие и нисходящие потоки, перемещение которых и обуславливает более интенсивное охлаждение нижней части стеклопакета.

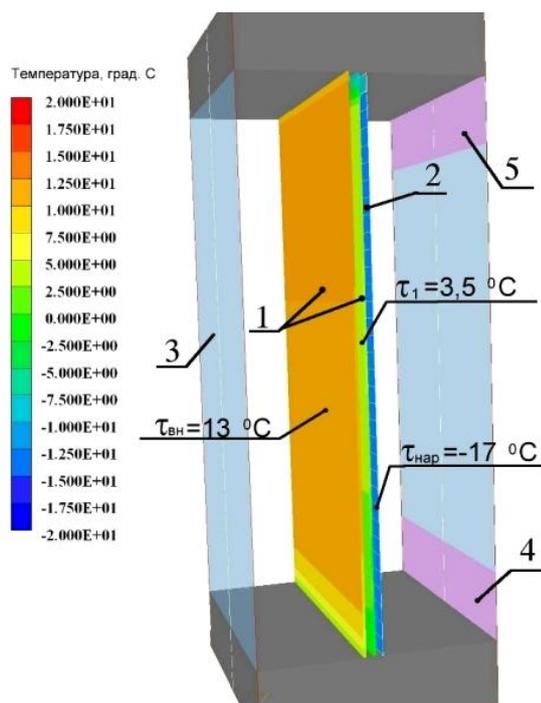


Рис. 8. Температурное поле на поверхностях стеклопакета и экрана: 1 – стекла; 2 – экран; 3 – моделируемая стена помещения; 4 – место подачи холодного наружного воздуха; 5 – место отвода холодного наружного воздуха

Разработка методики для выведения эмпирических формул по нахождению приведенного сопротивления светопрозрачной части окон с теплоотражающими экранами. Для учета влияния изменяющегося сопротивления теплопередаче окон с теплоотражаю-

щими экранами при определении минимальной температуры внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления (см. формулы (1)) при работе автоматики энергетических систем формирования внутреннего микроклимата необходимо получить эмпирические зависимости R от внешних факторов. Как было определено ранее, сопротивление теплопередаче конкретной конструкции окна (с заданными физико-геометрическими параметрами) с теплоотражающими экранами не является постоянной величиной, а зависит в большей степени от разности температур, скоростей внутреннего и наружного воздуха.

Для решения данной задачи необходимо:

1. В программе «Стеклопакет + экраны» задать конструкцию стеклопакета с теплоотражающими экранами с указанием конкретных геометрических размеров и физических свойств стекол, металлических экранов и прослоек.

2. В программе «Стеклопакет + экраны» провести математическое моделирование процесса теплопередачи через светопрозрачную часть заданного вида оконной конструкции при варьировании значений разности температур внутреннего и наружного воздуха, скоростей среды в помещении и со стороны окружающей среды.

3. Получить массив значений R от Δt , $v_{\text{в}}$, $v_{\text{н}}$.

4. Для случая естественной конвекции у внутренней поверхности окна ($R(\Delta t, v_{\text{н}})$) с помощью регрессионного анализа [16] найти значения коэффициентов для аппроксимирующей функции следующего вида (например, с использованием математического аппарата программного комплекса Matlab):

$$R(\Delta t, v_{\text{н}}) = c_1 + \frac{a_1}{\Delta t + b_1} + \frac{1}{\frac{a_2}{\Delta t + b_1} + c_2 + 7,34 \cdot v_{\text{н}}^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_{\text{н}}}}, \quad (28)$$

где a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 – параметры функции.

5. Для получения эмпирической формулы по определению приведенного сопротивления теплопередаче с учетом вынужденной внутренней конвекции выделить в формуле (28) условно постоянное значение сопротивления теплообмену на внутренней поверхности $R_{\text{в}}$, а также коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{\text{в}}^{\text{к}}$, $\alpha_{\text{в}}^{\text{п}}$ (данное допущение об условном постоянстве $R_{\text{в}}$ при использовании теплоотражающих экранов в окнах сделано на основе исследований авторов [6]; данное допущение вносит дополнительную погрешность в определение R при вынужденной внутренней конвекции в пределах 0,5–1 %). Так, при установке экранов снаружи $\alpha_{\text{в}}^{\text{п}}$ для значений перепада температур на внутренней поверхности стеклопакета

$\Delta t_b = t_b - t_{в}$ в диапазоне от 2 до 8 °С изменяется в пределах от 4,0 до 3,9 Вт/(м²·°С), α_b^k – от 2,09 до 3,32 Вт/(м²·°С).

6. Для учета вынужденной внутренней конвекции преобразовать формулу по определению $R(\Delta t, v_n)$ в следующую:

$$R(\Delta t, v_b, v_n) = c_1 + \frac{a_1}{\Delta t + b_1} + \frac{1}{\frac{a_2}{\Delta t + b_1} + c_2 + 7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} - R_b + \frac{1}{\alpha_b^n + 5,6 + 3,8 \cdot v_b} \quad (29)$$

7. Произвести проверку адекватности полученных эмпирических формул, сравнивая результаты вычислений при изменении Δt , v_b , v_n с данными моделирования в программе «Стеклопакет + экраны».

Погрешность расчета приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны окна по вышеуказанной методике в случае естественной конвекции с учетом принятых в математической модели допущений по значению коэффициента А в формулах (22)–(25) и данных табл. 2 составит $\pm 2,5$ % при заполнении прослоек воздухом, $\pm 3,5$ % при заполнении аргоном и криптоном.

В случае вынужденной конвекции на внутренней поверхности окна погрешность увеличивается до ± 4 % для конструкций с воздушными прослойками и до ± 5 % при использовании аргона и криптона.

Эмпирические формулы для определения приведенного сопротивления теплопередаче для стеклопакетов с теплоотражающими экранами. С помощью метода наименьших квадратов [16] после обработки данных компьютерной программы «Стеклопакет+экраны», основанной на разработанной математической модели описания процесса теплопередачи через стеклопакет, согласно разработанной методики были получены эмпирические формулы для расчета приведенного сопротивления теплопередаче средней (центральной) зоны окна с теплоотражающими экранами. Изменение разницы температур задавалось в диапазоне от 10 до 60 °С (при $t_b = 20$ °С), скорости v_n – от 1 до 5 м/с.

Так, для двухкамерного стеклопакета 4М1х10х4М1х10х4М1 и одного теплоотражающего экрана, установленного снаружи на расстоянии 10 мм, в случае естественной конвекции у внутренней поверхности приведенное сопротивление теплопередаче можно определить по формуле

$$R(\Delta t, v_n) = 0,627 + \frac{3,83}{\Delta t + 10,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} \quad (30)$$

где Δt – разность между температурами внутреннего и наружного воздуха.

Для СП с двумя теплоотражающими экранами (толщина прослойки между металлическими листами 10 мм)

$$R(\Delta t, v_n) = 0,889 + \frac{14,1}{\Delta t + 17,6} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} \quad (31)$$

Для СП и трех экранов снаружи, размещенных на расстоянии 10 мм друг от друга,

$$R(\Delta t, v_n) = 1,21 + \frac{22,3}{\Delta t + 17,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} \quad (32)$$

Если в помещении работает рециркуляционный вентиляционный аппарат или приток в помещение осуществляется механической вентиляцией, то есть присутствует вынужденная конвекция у внутренней поверхности окна, данные формулы будут выглядеть следующим образом:

• для СП и одного экрана

$$R(\Delta t, v_{вн}, v_n) = 0,487 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_b} + \frac{3,83}{\Delta t + 10,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} \quad (33)$$

• для СП и двух экранов

$$R(\Delta t, v_{вн}, v_n) = 0,749 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_b} + \frac{14,1}{\Delta t + 17,6} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} \quad (34)$$

• для СП и трех экранов

$$R(\Delta t, v_{вн}, v_n) = 1,06 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_b} + \frac{22,3}{\Delta t + 17,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}} \quad (35)$$

На основе выведенных эмпирических зависимостей для СП с теплоотражающими экранами в случае естественной конвекции внутри были построены графики зависимостей изменения R от Δt , v_n (рис. 9).

Анализ полученных зависимостей (рис. 9) показывает, что приведенное сопротивление теплопередаче в большей степени зависит от разницы температур между внутренним и наружным воздухом, причем чем больше количество установленных экранов, тем более явно проявляется эта зависимость. Наибольшее сопротивление получаем при минимальной разнице температур и минимальной скорости наружного воздуха. Таким образом, сопротивление теплопередаче для окон с теплоотражающими экранами является нелинейной зависимостью.

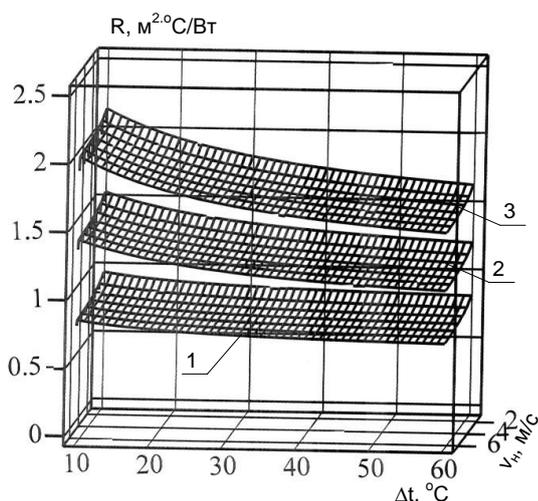


Рис. 9. Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны окна при использовании СП 4М1х10х4М1х10х4М1 и установленных снаружи экранов: 1 – одного металлического экрана; 2 – двух экранов; 3 – трех экранов

Верификация математической модели. Для качественной верификации модели теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами были использованы опытные данные натурного эксперимента, проведенного в сертифицированной климатической камере АНО «Ивановстройиспытания».

Исследование проводилось при различных вариантах расположения теплоотражающих экранов относительно стеклопакета. В качестве контрольного образца использовался стеклопакет 4М1х10х4М1х10х4М1 и алюминиевые экраны, установленные на различном друг от друга расстоянии. Система проводила по 20 измерений значений величин при каждом установленном режиме. Опытные данные обрабатывались методами математической статистики с использованием критерия Стьюдента.

Для подтверждения влияния на приведенное сопротивление стеклопакета разности температур Δt внутри теплого отделения климатической камеры поддерживалась температура в пределах 20–21 °С. Температура наружного воздуха изменялась с шагом в 9–10 °С. Тепловизионная съемка внутренних поверхностей окна осуществлялась с помощью тепловизора TESTO 882. Термограммы и температурные графики по секущей линии центральной части стеклопакета изображены на рис. 10, причем слева снаружи установлен алюминиевый экран на расстоянии 10 мм от наружного стекла стеклопакета, справа – только стеклопакет. «Всплески» температур на графиках обусловлены нахождением в исследуемой зоне окна шины для крепления термопар и соединительных проводов, которые располагаются на некотором удалении от внутреннего стекла.

Как и следовало ожидать, температуры на поверхности стеклопакета больше снижаются при изменении температуры наружного воздуха в контрольном варианте (только стеклопакет). В зоне, где установлен снаружи металлический экран, падение температуры на внутреннем стекле при изменении t_n меньше. Значения температур в зоне применения СП и металлического экрана значительно выше значения температур в контрольной зоне (без МЭ).

На термограммах отчетливо видны краевые зоны стеклопакета, где, вследствие образования «мостиков холода» за счет внутренних алюминиевых рамок, температура на поверхности падает на 2–4 °С в контрольном варианте и на 2–3 °С в варианте установки экрана. В нижней части стеклопакета на снижение температуры в краевой зоне дополнительное влияние оказывает повышенный конвективный теплообмен.

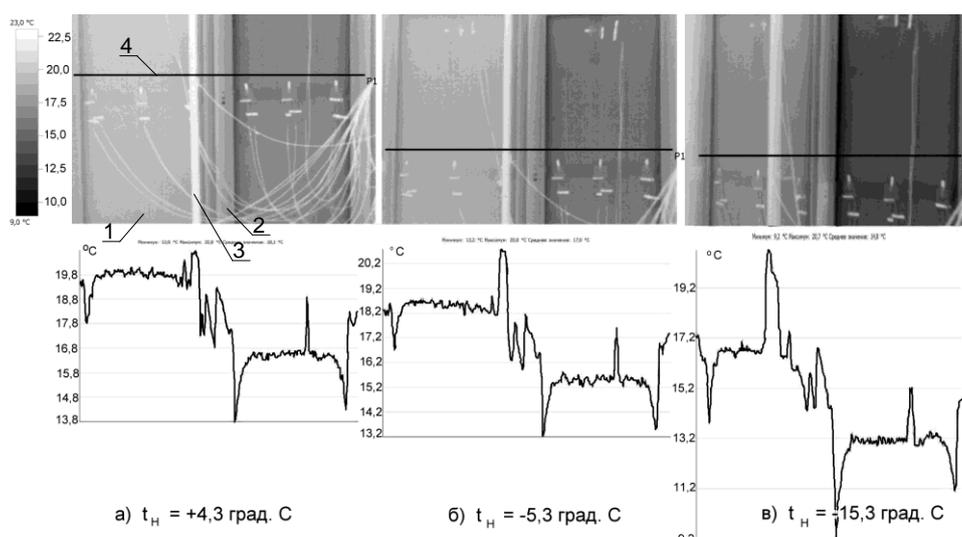


Рис. 10. Термограммы и температурные графики по секущей линии на внутренней поверхности центральной части стеклопакета при поддержании в холодном отделении климатической камеры температуры воздуха t_n : а – +4,3 °С; б – -5,3 °С; в – -15,3 °С; 1 – внутренняя поверхность стеклопакета, снаружи установлен один теплоотражающий экран; 2 – переплет из пластикового профиля; 3 – шина для крепления термопар, измеряющих t_n ; 4 – секущая линия, для построения температурных графиков на поверхности

Для улучшения температурного режима краевых зон производителями окон [17] предлагается смещать дистанционные рамки вместе с герметиками внутрь переплетов на 10–15 мм, а также в качестве материала дистанционной рамки использовать не металлы, а, например, высококачественный полипропилен, обеспечивающий повышенные теплоизоляционные свойства (технология «теплых краев»).

На термограмме (рис. 10) также видно, что приращение температуры поверхности стекла по вертикальной оси снизу-вверх больше в зоне установки снаружи металлического экрана.

На рис. 11 выполнено сопоставление данных расчета приведенного сопротивления теплопередаче СП и металлических экранов, установленных снаружи на расстоянии 10 мм друг от друга, для уравнений (30), (31) и (32) и экспериментальных значений в случае изменения разности температур между внутренним и наружным воздухом. Скорость воздуха в холодном отделении климатической камеры поддерживалась в пределах 3 м/с.

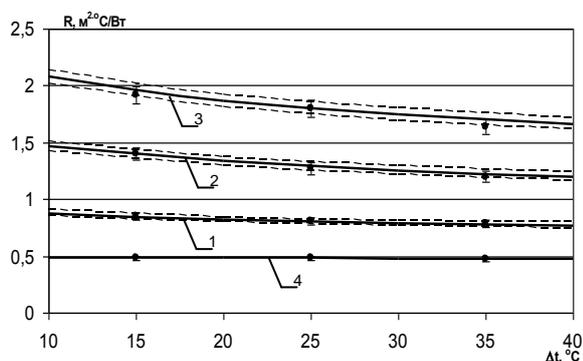


Рис. 11. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны оконной конструкции в зависимости от разности температур внутреннего и наружного воздуха: 1 – для СП и одного МЭ; 2 – СП и двух МЭ; 3 – СП и трех МЭ; 4 – СП (контроль); сплошная линия – результаты расчета по эмпирическим формулам; штриховые линии – границы доверительного интервала, обусловленного относительной погрешностью математической модели в $\pm 3\%$; точки – экспериментальные значения с указанием относительной погрешности измерений в 4%

Сравнительный анализ данных (рис. 11) показывает, что экспериментальные значения сопротивления теплопередаче входят в доверительный интервал данных математического моделирования, полученных из эмпирических формул (30)–(32).

Экспериментальные данные также подтверждают гипотезу о том, что приведенное сопротивление теплопередаче окна с теплоотражающими экранами не является постоянной величиной (без учета поправки на скорости), как в случае использования только стеклопакета, а зависит от разности температур внутреннего и наружного воздуха, причем чем выше число экранов, тем выше влияние Δt на сопротивление окна.

Заключение

Математическое описание теплообмена во всех слоях, составляющих расчетную схему стеклопакета с теплоотражающими экранами, предоставило возможность составить математическую модель разработанных энергосберегающих оконных конструкций с учетом влияния внешних и внутренних факторов, реализовав ее в компьютерной программе «Стеклопакет+экраны». С помощью разработанной методики были получены эмпирические зависимости для расчета приведенного сопротивления теплопередаче центральной части окон с экранами, причем было выяснено, что сопротивление данных ограждающих конструкций зависит от разности температур и значений скоростей внутреннего и наружного воздуха. Сопоставление с экспериментальными данными подтвердило адекватность математической модели. Результаты исследований могут использоваться для определения потенциала использования теплоотражающих экранов в окнах для систем прерывистого отопления зданий, в том числе, и в случае применения технологии предварительной осушки воздуха для влажного, мокрого или нормального режимов помещений промышленных предприятий.

Список литературы

1. Yang R., Liu L., Ren Y. Thermal environment in the cotton textile workshop // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 102. – P. 432–441. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.024.
2. The impact of carding micro-climate on cotton moisture content and fiber and yarn quality / D.D. McAlister, D.T.W. Chun, G.R. Gamble, L.C. Godbey, D.R. Cobb, E.E. Backe // Journal of cotton science. – 2005. – Vol. 9, issue 2. – P. 97–101.
3. Энергосберегающий потенциал от использования теплоотражающих экранов с солнечными батареями в окнах для систем энергоснабжения зданий / Н.Н. Смирнов, Б. Фламан, М. Барба и др. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 5–14. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.005-014.
4. Пыжов В.К. Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека. – Иваново, 2014. – 524 с.
5. Свидетельство на полезную модель РФ «Оконный блок» №16011 от 07.03.2000 г. / В.М. Захаров, В.М. Яблоков, Н.М. Ладаев. – М., 2000.
6. Эффективность совместного применения теплоотражающих экранов в окнах и технологии предварительной осушки воздуха для систем прерывистого отопления зданий в различных регионах России и Франции / Н.Н. Смирнов, В.М. Захаров, В.К. Пыжов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 16–25. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.016-025.
7. Малявина Е.Г. Теплотери здания. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
8. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. – М.: Лазурь, 2007. – 432 с.
9. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
10. Ito N., Kimura K. A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on the exterior surface of a building // ASHRAE Transactions. – 1972. – Vol. 78, issue 2. – 184 p.
11. Arasteh D.K., Reilly M.S., Rubin M.D. A versatile procedure for calculating heat transfer through windows / Lawrence Berkeley Laboratory. – Berkeley, California, 1989. – 24 p.

12. **Богословский В.Н.** Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с.

13. **Савин В.К.** Теоретические основы и инженерные методы теплотехнических расчетов светопрозрачных ограждений. – М.: НИИСФ, 1985. – 320 с.

14. **Русяк И.Г., Королев С.А.** Проектирование многослойных оконных систем с заданными тепловыми характеристиками // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2004. – № 4. – С. 71–73.

15. **Петров Е.В.** Влияние различных факторов на тепловые характеристики оконных заполнений. – Томск: ТГАСУ, 2000. – 172 с.

16. **Рыжков И.Б.** Основы научных исследований и изобретательства. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 224 с.

17. **Кривошеин А.Д., Харламов Д.А.** К вопросу об улучшении температурного режима современных окон в краевых зонах // Светопрозрачные конструкции. – 2005. – № 1. – С. 10–14.

References

1. Yang, R., Liu, L., Ren, Y. Thermal environment in the cotton textile workshop. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 102, pp. 432–441. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.024.

2. McAlister, D.D., Chun, D.T.W., Gamble, G.R., Godbey, L.C., Cobb, D.R., Backe, E.E. The impact of carding microclimate on cotton moisture content and fiber and yarn quality, *Journal of cotton science*, 2005, vol. 9, issue 2, pp. 97–101.

3. Smimov, N.N., Flaman, B., Barba, M., Zakharov, V.M., Tyutikov, V.V., Lapateev, D.A. Energosberegayushchiy potencial ot ispol'zovaniya teplootrazhayushchikh ekranov s solnechnymi batareyami v oknakh dlya sistem energosnabzheniya zdaniy [Energy-saving potential of using heat-reflecting screens with solar batteries in windows for power supply systems of buildings]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 5–14. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.005-014.

4. Pyzhov, V.K. *Energeticheskie sistemy obespecheniya zhizni i deyatel'nosti cheloveka* [Power engineering systems of human life and activity support]. Ivanovo, 2014. 524 p.

5. Zakharov, V.M., Yablokov, V.M., Ladaev, N.M. *Okonnyy blok* [Window unit]. Svidetel'stvo na poleznuyu model' RF, no. 16011, 2000.

6. Smimov, N.N., Zakharov, V.M., Pyzhov, V.K., Lapateev, D.A., Flaman, B. Effektivnost' sovmestnogo primeneniya teplootrazhayushchikh ekranov v oknakh i tekhnologii predvaritel'noy osushki vozdukha dlya sistem preryvistogo otopeniya

zdaniy v razlichnykh regionakh Rossii i Frantsii [Efficiency of joint application of heat-reflecting screens in windows and air pre-drying technology in intermittent heating systems of buildings in various regions of Russia and France]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 16–25. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.016-025.

7. Malyavina, E.G. *Teplopoteri zdaniya* [Heat losses of the building]. Moscow, AVOK-PRESS, 2007. 144 p.

8. Savin, V.K. *Stroitel'naya fizika: energoperenos, energoeffektivnost', energosberezhenie* [Building physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow, Lazur', 2007. 432 p.

9. Fokin, K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy* [Thermal engineering of building walling]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 287 p.

10. Ito, N., Kimura, K. A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on the exterior surface of a building. *ASHRAE Transactions*, 1972, vol. 78, issue 2, 184 p.

11. Arasteh, D.K., Reilly, M.S., Rubin, M.D. A versatile procedure for calculating heat transfer through windows. Berkeley, California, Lawrence Berkeley Laboratory, 1989. 24 p.

12. Bogoslovskiy, V.N. *Stroitel'naya teplofizika (teplotfizicheskie osnovy otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha)* [Building thermal physics (thermophysical foundations of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow, Vysshaya shkola, 1982. 415 p.

13. Savin, V.K. *Teoreticheskie osnovy i inzhenernye metody teplotekhnicheskikh raschetov svetoprozrachnykh ogradzheniy* [Theoretical basis and methods of thermal engineering calculations of translucent enclosures]. Moscow, NIISF, 1985. 320 p.

14. Ruzhak, I.G., Korolev, S.A. Proektirovanie mnogosloynnykh okonnykh sistem s zadannymi teplovymi kharakteristikami [Designing multi-layer window systems with desired thermal characteristics]. *Energoeffektivnost': opyt, problemy, resheniya*, 2004, no. 4, pp. 71–73.

15. Petrov, E.V. *Vliyanie razlichnykh faktorov na teplovye kharakteristiki okonnykh zapolneniy* [Influence of various factors on thermal characteristics of window fillings]. Tomsk: T GASU, 2000. 172 p.

16. Ryzhkov, I.B. *Osnovy nauchnykh issledovaniy i izobretatel'stva* [Basic scientific research and innovation]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo «Lan'», 2012. 224 p.

17. Krivoshein, A.D., Kharlamov, D.A. K voprosu ob uluchshenii temperaturnogo rezhima sovremennykh okon v kraevykh zonakh [Improving of temperature conditions of modern windows in edge zones]. *Svetoprozrachnye konstruksii*, 2005, no. 1, pp. 10–14.

Захаров Вадим Михайлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-24,
e-mail: colia@rambler.ru

Авдюнин Евгений Геннадьевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
e-mail: avdunin@pte.ispu.ru

Смирнов Николай Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
телефон (4932) 26-97-89,
e-mail: nsmirnov@bk.ru

Яблоков Андрей Анатольевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер,
e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

Лапатеев Денис Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики,
e-mail: l.denis7789@yandex.ru