

УДК 692.8, 697.1, 699,86

**Григорий Иванович Парфенов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-89, e-mail: parfenovgip@gmail.com

**Николай Николаевич Смирнов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-89, e-mail: nsmirnov@bk.ru

**Анатолий Константинович Соколов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-45, e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

**Владимир Валентинович Тютиков**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Россия, Иваново, телефон (4932) 41-50-24, e-mail: tvv@ispu.ru

**Сергей Николаевич Ярунин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-24, e-mail: yarunin-sn@yandex.ru

**Наталья Николаевна Ярунина**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32

## **Разработка и верификация имитационной модели процесса теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими экранами**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** На оконные блоки приходятся самые большие удельные трансмиссионные тепловые потери в зданиях. Среди существующих технологий по повышению тепловой защиты окон особый интерес представляет применение перемещаемых теплоотражающих экранов и фотоэлектрических солнечных батарей. Несмотря на большое количество научных публикаций, рассматривающих экспериментальные лабораторные исследования и численное моделирование процессов теплопередачи через оконные блоки, отсутствуют данные о влиянии краевых зон стеклопакета, а также областей сопряжения оконного профиля и светового проема на тепловые процессы, протекающие в данных энергосберегающих конструкциях с экранами. Изменение по высоте удельных тепловых потоков и температуры на внутренней поверхности оконного блока значительно влияет на корректность определения значения минимально-допустимой температуры внутреннего воздуха. Таким образом, разработка и верификация моделей процесса теплопередачи через оконный блок с экранами является актуальной задачей при формировании микроклимата внутри помещений различного назначения.

**Материалы и методы.** Имитационное численное моделирование выполнено с помощью метода конечных элементов на основании фундаментальных законов теплообмена. Используются результаты экспериментальных исследований окон с теплоотражающими экранами, проведенных в сертифицированной климатической камере.

**Результаты.** Разработана двухмерная имитационная модель теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими экранами, расположенный в разделительной перегородке климатической камеры. Исследовано распределение температур, скоростей воздушных потоков и приведенного сопротивления теплопередаче по высоте светопрозрачной ограждающей конструкции. Адекватность предложенной имитационной модели подтверждена сравнением с результатами эксперимента в сертифицированной лаборатории, а также данными других авторов и нормативной документацией.

**Выводы.** Применение теплоотражающих экранов в оконном блоке позволило увеличить приведенное сопротивление теплопередаче в 1,6–3,7 раза в зависимости от их количества. Выявлено значительное снижение температуры в краевых зонах стеклопакета. Использование разработанной имитационной модели 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 эксплуатации помещений промышленных предприятий.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, оконный блок с теплоотражающими экранами, микроклимат, приведенное сопротивление теплопередаче, теплообмен, воздушная прослойка

### **Grigory Ivanovich Parfenov**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-89, e-mail: parfenovgip@gmail.com

### **Nikolay Nikolaevich Smirnov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-89, e-mail: nsmirnov@bk.ru

### **Anatoly Konstantinovich Sokolov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Life Safety Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-45, e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

### **Vladimir Valentinovich Tyutikov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of Automation of Technological Processes Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 41-50-24, e-mail: tvv@ispu.ru

### **Sergey Nikolaevich Yarunin**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-24, e-mail: yarunin-sn@yandex.ru

### **Natalya Nikolaevna Yarunina**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies Department, Russia, Ivanovo, phone (4932) 26-99-32

## **Development and verification of simulation model of heat transfer process through window unit with heat-reflecting screens**

### **Abstract**

**Background.** Window units account for the largest specific heat losses. The use of movable heat-reflecting screens and photovoltaic solar panels is of particular interest among the existing technologies to improve the thermal protection of windows. Despite the large number of scientific papers on this issue, which consider experimental laboratory studies and numerical simulation of heat transfer processes through window units, there is no data on the influence of the edge zones of a double-glazed window, as well as the areas of interface of the window profile and the light opening on the thermal processes that occur in these energy-saving units with screens. Vertical replacing of specific heat fluxes and temperature on the inner surface of the window unit strongly influences the correctness of determining the value of the minimum allowable temperature of the indoor air. Thus, the development and verification of models of the heat transfer process through a window unit with screens is an urgent task in the context of an indoor microclimate creation.

**Materials and methods.** Simulation numerical modeling is performed using the finite element method based on the fundamental laws of heat transfer. The authors have used the results of experimental studies of windows with heat-reflecting screens carried out in a certified climatic chamber.

**Results.** The authors have developed a two-dimensional simulation model of heat transfer through a window unit with heat-reflecting screens located in the partition wall of the climate chamber. The distribution of temperatures, air flow velocities, and reduced total thermal resistance along the height of a translucent structures has been studied. The adequacy of the proposed simulation model is confirmed by comparison with the results of the experiment in a certified laboratory, as well as data obtained by other authors and regulatory documentation.

**Conclusions.** The use of heat-reflecting screens in the window unit increases the resistance to heat transfer by 1,6–3,7 times depending on their number. A significant decrease in temperature in the edge zones of the double-glazed window is revealed. The use of the developed simulation model makes it possible to determine the application of heat-reflecting screens in windows for intermittent heating systems including the case of using pre-drying air technology for humid, wet, or normal operation modes of industrial premises.

**Key words:** simulation, window unit with heat-reflecting screens, microclimate, reduced total thermal resistance, heat transfer, air gap

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.5.028-039

**Введение.** Согласно оценкам экспертов Московского энергетического института [1], по состоянию на 2016 год в РФ затраты на отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха и горячее водоснабжение (ГВС) составляют примерно 160 млн т у. т. (20 % топливно-энергетического баланса страны). На отопление расходуется 80 % из вышеуказанных затрат. В.В. Бухмиров,

М.В. Пророкова в своих исследованиях [2] определили усредненные показатели по потреблению тепловой энергии для зданий непромышленного назначения и установили, что наибольший потенциал в области энергосбережения приходится на окна и его значение составляет 17,5 %. Тепловые потери через окна составляют 35 %, что является весомой величиной.

Светопрозрачной называется ограждающая конструкция, предназначенная для освещения естественным светом помещений зданий. К светопрозрачным ограждающим конструкциям (СПК) зданий относятся: оконные блоки, стеклянные двери (в том числе, балконные) и входные группы; светопрозрачные фасады; фонари и светопрозрачные кровли и др. [3].

В настоящее время существует целый спектр технологий [4, 5] по снижению тепловых потерь через СПК, среди которых следует выделить: увеличение количества слоев остекления (многокамерные стеклопакеты) и толщины воздушной прослойки; заполнение прослоек малотеплопроводными газами (аргон, криптон); нанесение низко-эмиссионного покрытия из оксидов металлов на стекла; вакуумирование стеклопакетов; использование многослойных конструкций; повышение сопротивления рам и откосов световых проемов; применение фото- и электрохромных технологий с использованием оксидов металлов, позволяющих изменять светопропускание остекления за счет использования специальных покрытий под воздействием электрического тока; использование мобильных (перемещаемых) теплоотражающих экранов и др.

Отдельно следует обратить внимание на технологию применения теплоотражающих экранов в СПК. Данному направлению повышения тепловой защиты оконных блоков посвящено несколько исследований, как российских [6–8], так и зарубежных [9–10]. Отечественные ученые развивали исследования по снижению теплопотерь из помещения через СПК с экранами в холодный период года, зарубежные – по уменьшению инсоляции через данные ограждающие конструкции. Было выявлено, что тепловые потери через оконные блоки с теплоотражающими экранами снижаются в 1,5–3,8 раза. Теплоотражающие непрозрачные экраны, выполненные из полированных металлов, для снижения теплопотерь целесообразно использовать в СПК в темное время суток или во время отсутствия людей в помещении.

Учеными ИГЭУ был разработан [7, 8] энергоэффективный ставень, состоящий из теплоотражающих экранов и фотоэлектрической батареи, установленной со стороны окружающей среды. Применение данного ставня в СПК позволяет не только значительно уменьшить трансмиссионные тепловые потери через ограждающую конструкцию, но и преобразовать солнечную энергию в электрическую.

В диссертационном исследовании [7] предложена методика определения значения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций, отличающаяся учетом термовлажностных режимов эксплуатации здания и эффекта от предварительной осушки воздуха. Для

сбережения энергетических ресурсов в нерабочее время применяют режим «дежурного» отопления, при котором температуру воздуха понижают до температуры не ниже 5°C, выполняя условие невыпадения конденсата на твердых поверхностях, что особенно актуально для ряда производств с высокой влажностью воздуха. Для выполнения этих условий предложена формула для определения минимально допустимой температуры воздуха внутри помещения промышленного предприятия:

$$t_{\text{д}}^{\text{в}} = \frac{\tau_{\text{р}} \alpha_{\text{в}} R_0 - t_{\text{н}}}{\alpha_{\text{в}} R_0 - 1} + \Delta t_{\text{зап}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{р}}$  – температура точки росы, определенная при параметрах воздуха в рабочее время по формуле Магнуса-Теттенса, °C;  $\Delta t_{\text{зап}}$  – температурный запас по недопущению конденсации, °C;  $t_{\text{н}}$  – температура наружного воздуха, °C;  $R_0$  – приведенное сопротивление теплопередаче, равное минимальному значению из двух сопротивлений светопрозрачной и непрозрачной зон, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;  $\alpha_{\text{в}}$  – расчетный коэффициент теплоотдачи от воздуха к внутренней поверхности светопрозрачной конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Уменьшение температуры внутреннего воздуха в нерабочее время и снижение тепловых потерь при использовании экранов в СПК позволяют значительно сократить расходы тепловой энергии на поддержание требуемых параметров микроклимата в помещении.

При определении минимальной температуры воздуха в помещении актуальной задачей является расчет не только приведенного сопротивления теплопередаче СПК с экранами, но и значения температурного запаса, который в большей степени зависит от разности температур на внутренней поверхности между центральной и краевой зонами светопрозрачной части конструкции. Следовательно, для решения данной задачи необходимо разработать достоверную имитационную модель процесса теплопередачи через СПК с экранами.

Моделирование процесса теплопередачи через оконные блоки осуществляется по двум направлениям: с помощью критериальных уравнений [3, 7, 11,12], выведенных на основании экспериментальных исследований, а также с помощью метода конечных элементов [7, 13–17], реализованного в программно-вычислительных комплексах COMSOL Multiphysics, ANSYS FLUENT, Phoenix и т.д. В одном из исследований [7] при математическом моделировании процесса теплопередачи через окно с экранами было принято допущение об адиабатности в зоне контакта стеклопакета с дистанционной рамкой, а также не учитывались процессы, происходящие в оконном профиле и световом проеме.

Следовательно, несмотря на большое количество научных публикаций, рассматриваю-

щих экспериментальные лабораторные исследования и численное моделирование процессов теплопередачи через оконные блоки, отсутствуют данные о влиянии краевых зон стеклопакета, а также областей сопряжения оконного профиля и светового проема на тепловые процессы, протекающие в энергосберегающих конструкциях с экранами. Изменение по высоте удельных тепловых потоков и температуры на внутренней поверхности оконного блока значительно влияет на корректность определения значения минимально допустимой температуры внутреннего воздуха. Таким образом, разработка и верификация моделей процесса теплопередачи через оконный блок с экранами является актуальной задачей при формировании микроклимата внутри помещений различного назначения.

Объектом исследования являются тепло-массообменные процессы, происходящие в оконном блоке с теплоотражающими экранами.

Целью исследования является определение теплотехнических характеристик оконного блока с экранами на основе анализа результатов имитационного моделирования процесса теплопередачи через данную ограждающую конструкцию.

**Методы исследования.** Имитационное численное моделирование было выполнено с помощью метода конечных элементов на основании фундаментальных законов теплообмена. Для учета процессов, происходящих в оконном блоке, была разработана геометрическая модель климатической камеры.

Климатическая камера (рис. 1) состоит из теплого и холодного отделений, разделенных между собой перегородкой, выполненной в виде стены из кирпичной кладки. В перегородке предусмотрен проем, в котором размещен испытуемый оконный блок. Оконный блок включает в себя двухкамерный стеклопакет формулой СПД 4М<sub>1</sub>-10-4М<sub>1</sub>-10-4М<sub>1</sub>, а также деревянную раму. В данном случае стеклопакет состоит из трех стекол толщиной 4 мм и образованных ими воздушных прослоек толщиной 10 мм. Со стороны холодного отделения в световом проеме установлены алюминиевые экраны, обладающие высокой теплоотражающей способностью. Расстояние между экранами составляет 10 мм. Для повышения прочностных характеристик данной теплоотражающей конструкции по периметру и в центре экранов размещены разделительные пластиковые планки.

Степень черноты на поверхности стекол  $\varepsilon_{ст}$ , деревянной рамы  $\varepsilon_{д}$ , оконного проема  $\varepsilon_{пр}$  была принята равной 0,92, на поверхности экранов, выполненных из полированной алюминиевой фольги,  $\varepsilon_{э} = 0,05$ .

Температуру на поверхности стены в теплом отделении камеры (рис. 1, поз. 16)  $t_{in}$  в процессе моделирования принимали таким образом, чтобы температура воздуха на расстоянии

150 мм от внутренней поверхности оконного блока была равна 21 °С. Температура воздуха в холодном отделении  $t_{ext}$  задавалась равной минус 15 °С, скорость поступающего (поз. 17) и уходящего (поз. 18) воздушных потоков  $v_{ext} = 5$  м/с.

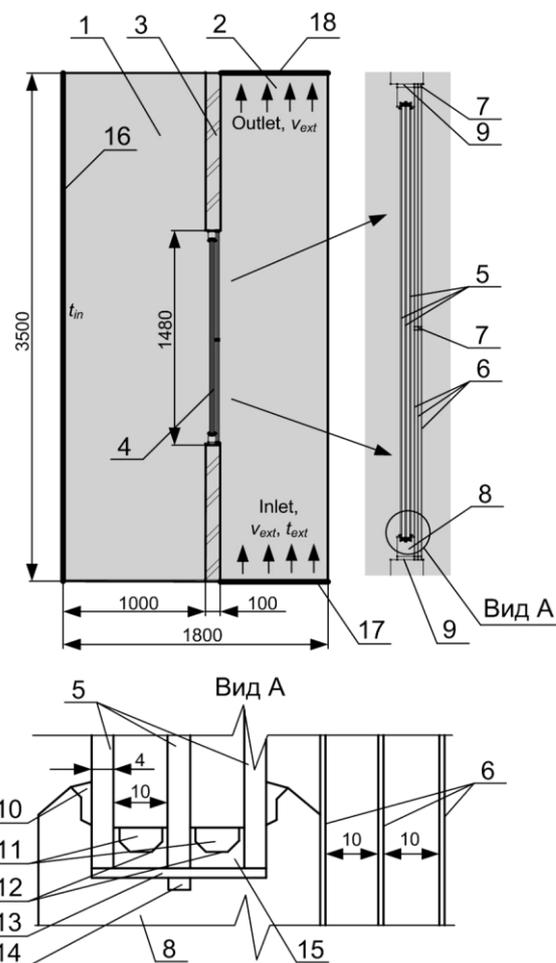


Рис. 1. Расчетная схема модели: 1, 2 – теплое и холодное отделения климатической камеры; 3 – кирпичная перегородка; 4 – испытуемый оконный блок; 5 – стекло; 6 – металлические экраны; 7 – разделительная пластиковая планка; 8 – деревянная рама; 9 – теплоизоляция из пенополиуретана; 10 – силиконовый герметик; 11 – осушитель; 12 – дистанционная рамка; 13 – пластиковая проставка; 14 – паз для вентиляции; 15 – герметик; 16 – «теплая» стена; 17, 18 – подача, отвод воздуха в отделение

При описании математической модели использовались уравнения неизотермического движения несжимаемого вязкого газа, сохранения энергии в прямоугольных декартовых координатах, неразрывности, переноса лучистой энергии [7]. При реализации математической модели теплопередачи через оконный блок с экранами в качестве метода расчета радиационного теплопереноса был принят метод дискретных ординат (Discrete Ordinats (DO)) [15, 16]. В имитационной модели не учитывались солнечная инсоляция, инерционные свойства конструкций,

воздухопроницаемость. Задача решалась в двухмерной постановке как стационарная.

Исследовались базовый вариант окна без экранов и случаи с одним, двумя и тремя теплоотражающими экранами.

Для верификации имитационной модели теплопередачи через оконный блок с экранами была проведена серия экспериментов в сертифицированной климатической камере испытательной лаборатории ООО «Ивановстройиспытания», схема которой представлена на рис. 2.

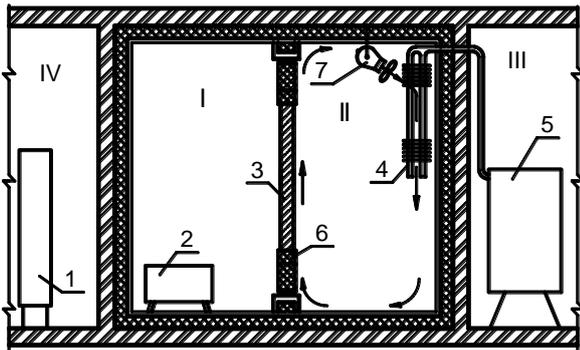


Рис. 2. Схема климатической камеры для проведения испытаний: I – «теплое» отделение камеры; II – «холодное» отделение камеры; III – промежуточная камера двухступенчатой холодильной установки; IV – помещение с ЭВМ; 1 – система автоматического сбора данных; 2 – нагревательные приборы; 3 – испытуемый образец; 4 – испаритель; 5 – компрессорно-конденсаторный блок 1 ступени холодильной установки; 6 – теплоизоляционный слой по периметру проема; 7 – вентилятор

Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче»<sup>2</sup>, а также на основании разработанной методики [7], учитывающей особенности определения теплотехнических величин СПК при использовании в них теплоотражающих экранов. Для определения теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций в испытательной лаборатории была смонтирована автоматизированная Система измерений сопротивления теплопередаче (сопротивления теплового) ограждающих конструкций IV поколения (СИСТОК-IV) (рис. 3), разработанная сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева).

В качестве датчиков использовались преобразователи термоэлектрические (термопары) и преобразователи тепловых потоков. Термопары выполнены из хромель-копелевой

проволоки. Тепловые потоки измерялись преобразователями тепловых потоков (тепломеры) на основе термопары PE-128-10-08-S-GL с размерами 35×35 мм. Толщина тепломера составляет 2,1 мм. Преобразователи тепловых потоков, как и термопары, были изготовлены ВНИИМ им. Менделеева. Данные тепломеры обладают высокой чувствительностью в пределах от 3,5 до 3,7 Вт/(мВ·м<sup>2</sup>). Поверочные аттестационные испытания показали, что отклонения измеренных значений приведенного сопротивления теплопередаче и теплопроводности от эталонного были не более 4 % (для диапазона температур от –40 до +50 °С).

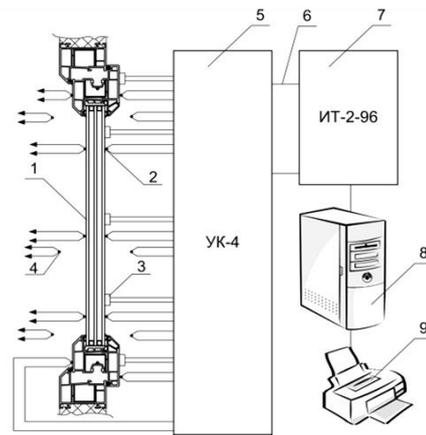


Рис. 3. Схема СИСТОК-IV на базе ИТ-2-96: 1 – оконный блок; 2 – спай термопары на поверхности материала; 3 – тепломер; 4 – спай термопары для измерения температуры воздуха в отделениях; 5 – устройство компенсации УК-4; 6 – соединительный кабель; 7 – ИТ-2-96; 8 – ЭВМ; 9 – принтер; 10 – планки крепления окна; 11 – передвижная планка для размещения термопар

Для качественного и количественного анализа распределения температур на поверхности оконного блока проводилась тепловизионная съемка с помощью тепловизора TESTO-882. Предел допускаемой погрешности в диапазоне температур от –20 до + 100 °С составлял  $\pm 2$  °С.

<sup>2</sup> ГОСТ 26602.1-99. Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче. Введ. 2000-01-01. – М.: Изд-во ГУП ЦПП, 1999. – 32 с.

**Результаты.** При создании имитационной модели была сгенерирована сетка, включающая в себя более 67000 конечных элементов. Сетка представлена на рис. 4. Уплотнение сетки осуществляли в местах изменения геометрии модели, а также в зонах нахождения пограничных слоев. Наибольший размер элементов были отмечены в зонах воздушных прослоек, образованных стеклами и теплоотражающими экранами. Диапазон времени, затраченного на расчет моделей на компьютере, составлял от 50 до 140 минут.

В результате проведения многовариантного имитационного двухмерного моделирования были определены локальные значения таких параметров, как температура, скорость воздуха, удельный тепловой поток и сопротивление теплопередаче конструкции, построены параметрические поля.

Температурное поле климатической камеры для случая применения в оконном блоке трех теплоотражающих экранов представлено на рис. 5. Необходимо отметить образование «застойных» зон в верхней и нижней частях воздушных прослоек.

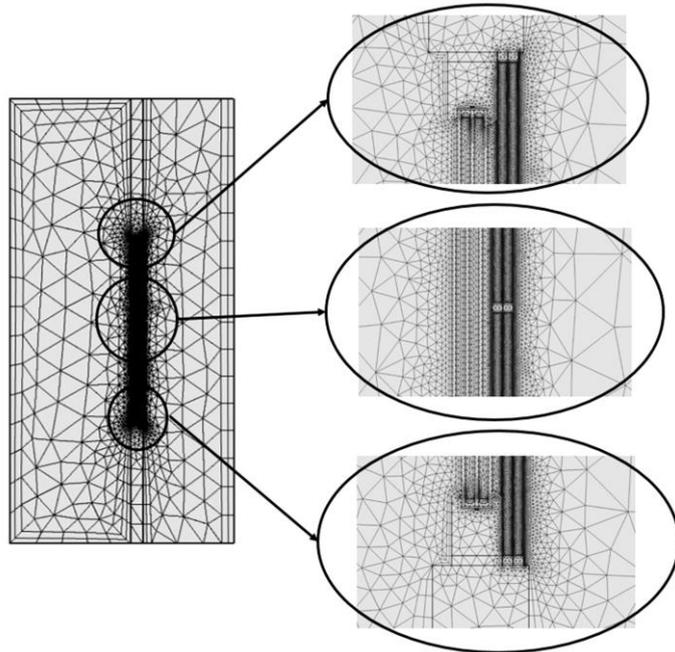


Рис. 4. Сетка конечных элементов имитационной модели

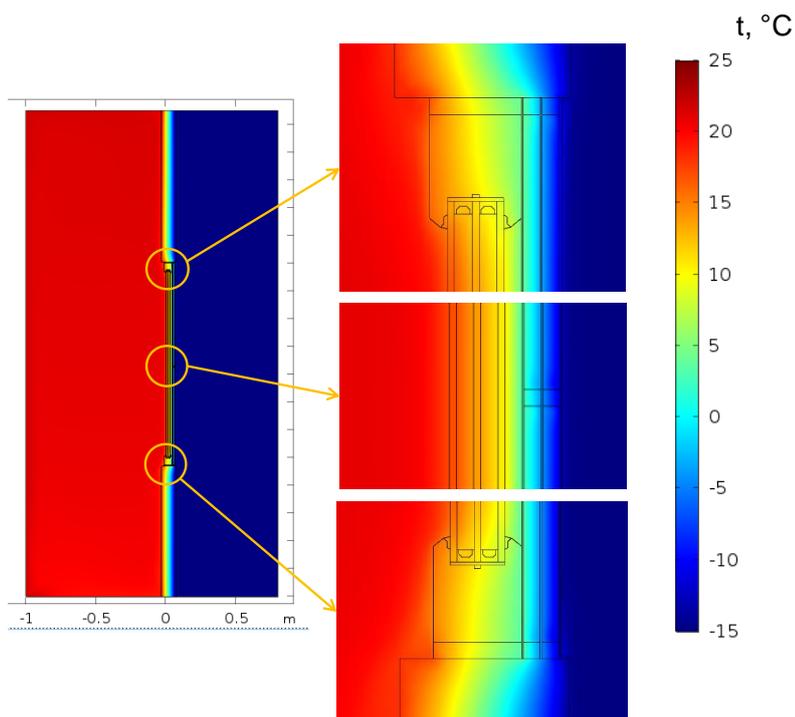


Рис. 5. Температурное поле климатической камеры

Особо необходимо отметить распределение температур в центральной части оконного блока по горизонтальной секущей линии. Графики изменения температур в центральной части окна представлены на рис. 6. Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что применение со стороны окружающей среды металлических экранов увеличивает температуру на внутренней поверхности стеклопакета с 11 до 17 °С и понижает на поверхности, обращенной в окружающую среду, с –12 до –14 °С. Повышение температуры на внутренней поверхности окна при использовании с наружной стороны экранов позволит обеспечить больший потенциал снижения минимально допустимой температуры внутреннего воздуха в помещении при применении дежурного режима отопления (при выполнении условия недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности ограждающих конструкций), что приведет к снижению затрат топливно-энергетических ресурсов на поддержание параметров микроклимата. В случае использования экранов наибольшие значения градиента температуры можно отметить в воздушных прослойках, образованных экранами, что связано с их высоким термическим сопротивлением теплопередаче вследствие минимальных значений лучистого теплового потока.

На рис. 7 представлены поле скоростей и линии тока воздуха для климатической камеры. Необходимо отметить, что в верхней и нижней зонах «теплого» отделения климатической камеры наблюдаются крупные завихрения воздушных потоков. Воздух поднимается вверх у теплых поверхностей, опускается вниз – у холодных (рис. 8,б и рис. 8,в). В воздушных прослойках, образованных стеклами и экранами, в центральной части также наблюдаются микровихри.

Анализ профилей скоростей воздуха, взятых по модулю (рис. 9), а также температурных графиков (рис. 6) показывает, что максимальные значения скоростей в воздушных прослойках значительно зависят от перепада температур на поверхностях, их ограничивающих. Максимальная скорость воздушных потоков при данных условиях будет наблюдаться в прослойке, образованной стеклом и наружным экраном, в случае использования только одного экрана, причем ее значение составит 25 мм/с. Можно также отметить, что использование экранов уменьшает как скорость воздушных потоков, так и температурный перепад внутри прослоек двухкамерного стеклопакета. Так, при отсутствии экранов скорость потоков в стеклопакете составляет 16–17 мм/с; при использовании 3 экранов скорость снижается до значений 5 мм/с.

Для верификации разработанной имитационной модели было выполнено сопоставление полученных результатов с результатами исследований ученых из Московского государственного строительного университета (МГСУ) [13, 14] и Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) [15]. На рис. 10 среди представленных результатов исследований прослеживается общая тенденция по образованию микровихрей в центральной части прослойки при увеличении скорости воздушных потоков. Анализ данных (рис. 8,в, рис. 9 (ИГЭУ) и рис. 11 (ASHRAE)) показывает, что при увеличении скорости восходящих и нисходящих потоков в воздушной прослойке центр этих потоков смещается к наружным вертикальным границам прослойки.

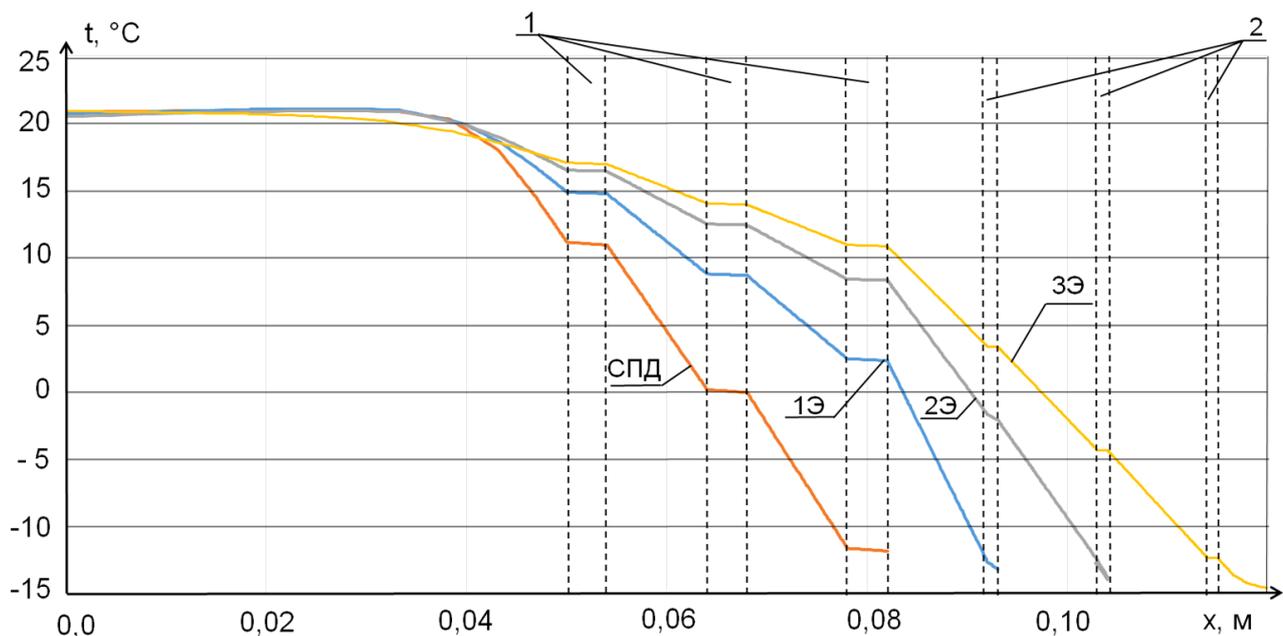


Рис. 6. Графики изменения температур в центральной части двухкамерного стеклопакета (СПД), стеклопакета с одним (1Э), двумя (2Э) и тремя (3Э) экранами: 1 – стекло 4М<sub>1</sub>; 2 – металлический экран

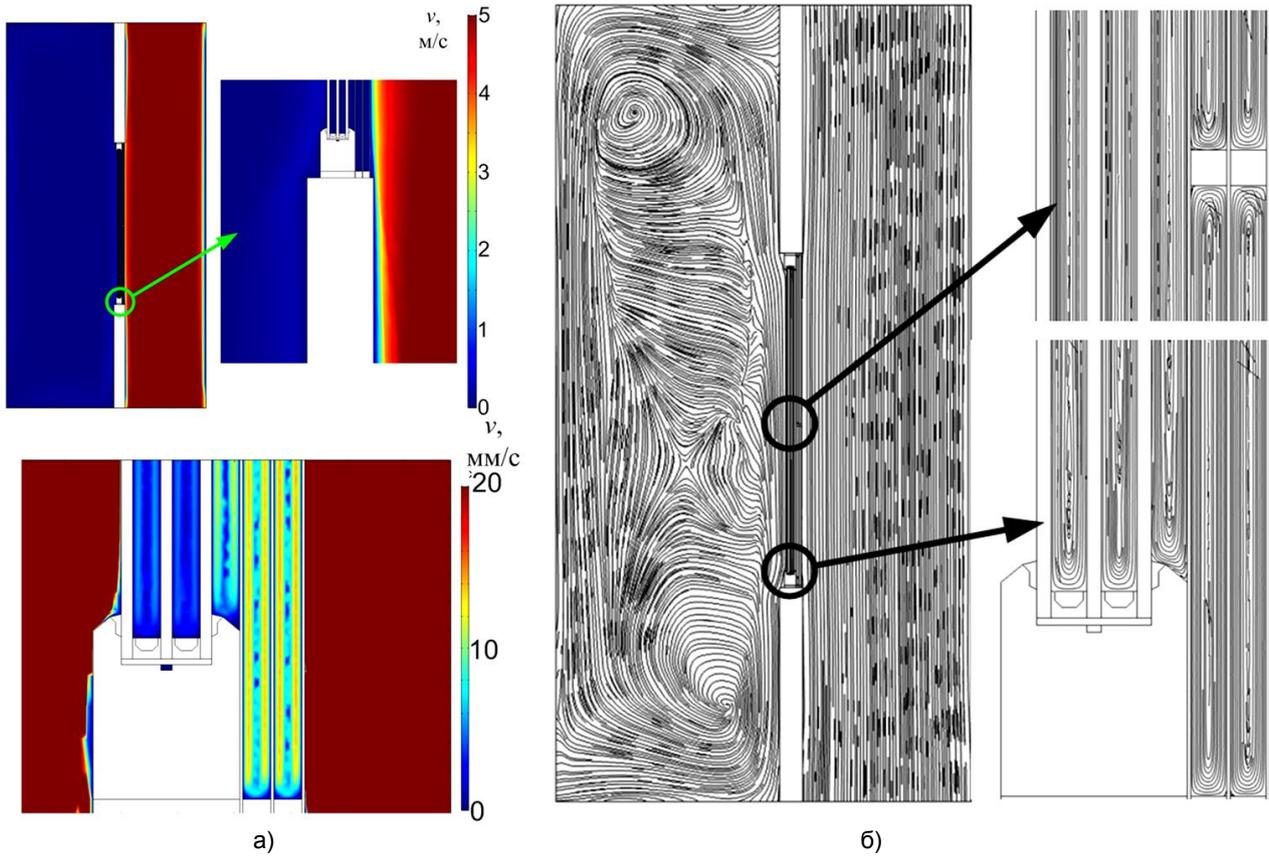


Рис. 7. Поле скоростей (а) и линий тока (б) воздуха

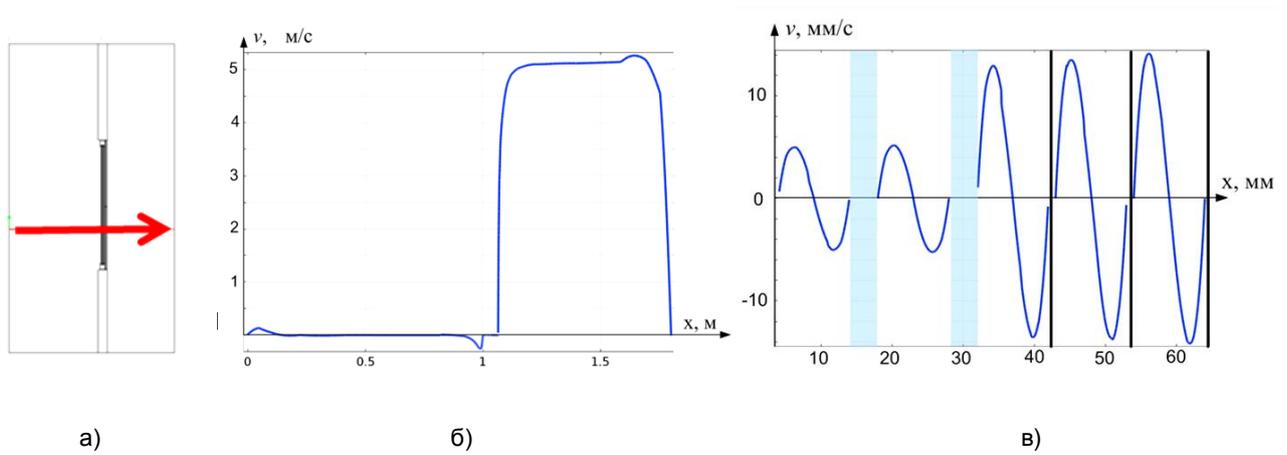


Рис. 8. Место расположения секущей линии (а) для построения профилей скоростей в климатической камере (б) и в оконном блоке (в)

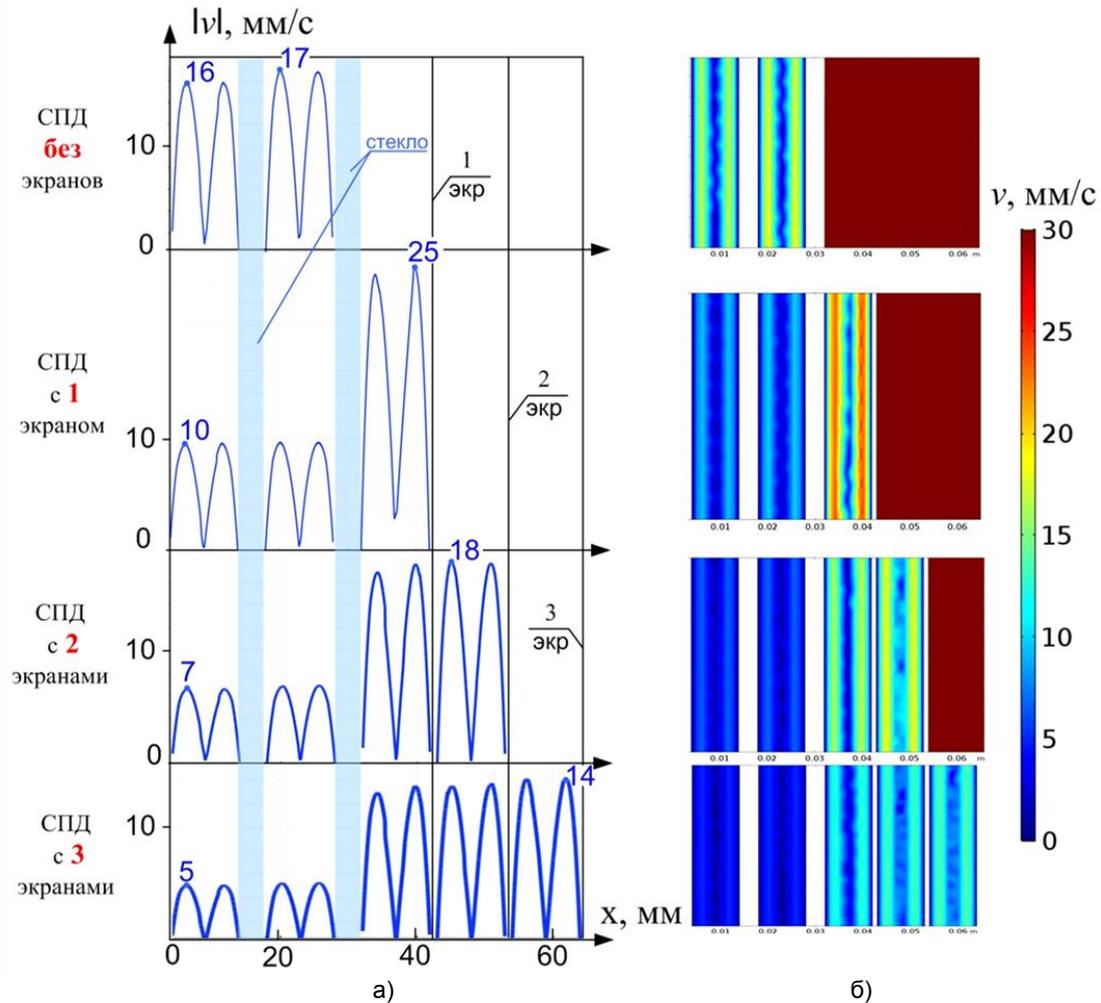


Рис. 9. Профиль (а) и поля (б) скоростей воздуха в воздушных прослойках, взятых по модулю, при использовании различного количества экранов в центральной части двухкамерного стеклопакета

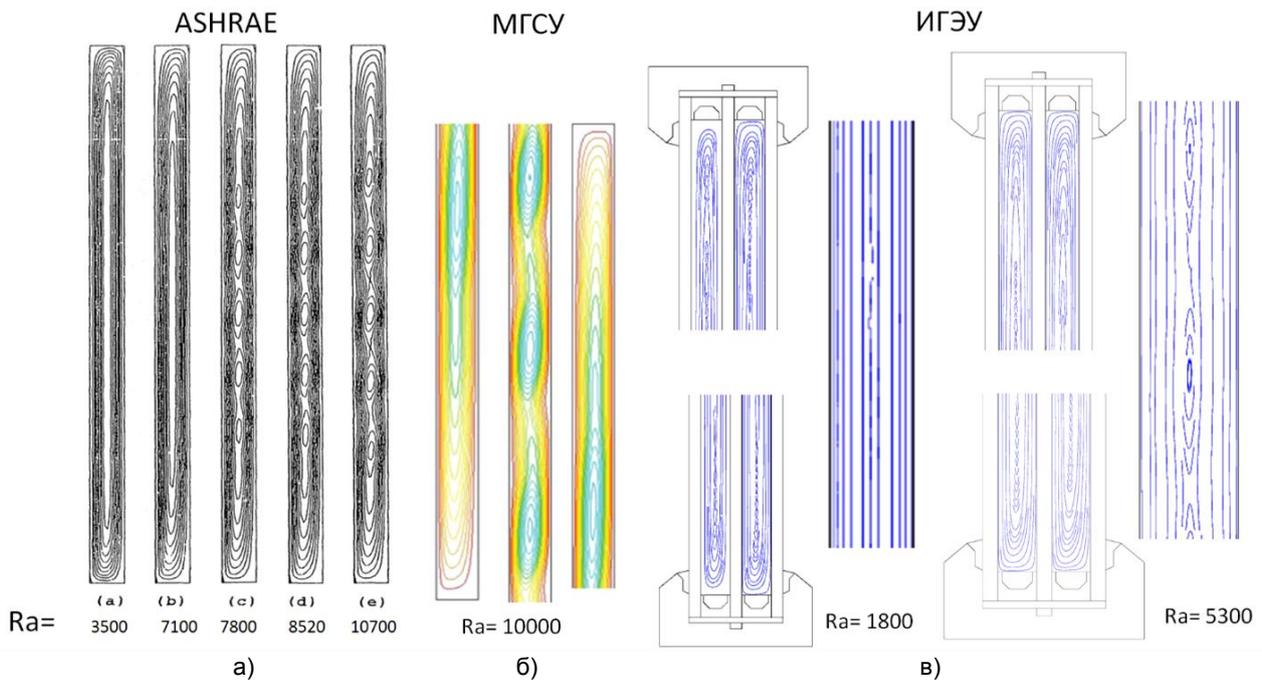


Рис. 10. Линии воздушных потоков в прослойке между стеклами при различных значениях Релея (Ra), полученные в результате моделирования: а – учеными из ASHRAE; б – МГСУ; в – ИГЭУ

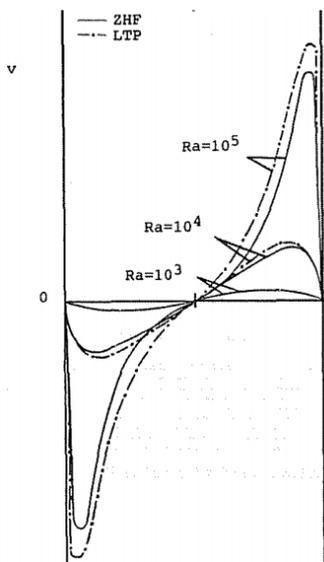


Рис. 11. Профили скоростей воздушных потоков в прослойке, полученные учеными из ASHRAE [15]

Особый интерес представляет сопоставление результатов физического эксперимента, проведенного в климатической камере, и численного моделирования процесса теплопередачи через двухкамерный стеклопакет при использовании металлических теплоотражающих экранов, изготовленных из алюминиевой фольги и установленных со стороны холодного отделения камеры (рис. 12).

Анализ полученных данных (рис. 12) показывает, что графики изменения температуры на внутренней поверхности остекления оконного блока, состоящего из двухкамерного стеклопакета и двух металлических экранов, установленных со стороны «холодного» отделения, в случае проведения имитационного компьютерного

моделирования и физического эксперимента идентичны. Наблюдается небольшое увеличение температуры по высоте окна с 16,9 до 17,3 °С при моделировании, с 16,8 до 17,5 °С при эксперименте. В то же время необходимо отметить значительный перепад температур в краевых зонах стеклопакета: в верхней области снижение происходит с 17,3 до 15,1 °С (на 2,2 °С) при моделировании, с 17,5 до 15,3 °С (на 2,2 °С) при физическом эксперименте.

Относительная погрешность для приведенного сопротивления  $R_0$  между результатами моделирования в COMSOL и экспериментально полученными данными (рис. 13) не превысила 4,3 % для стеклопакета (СПД), 6,5 % – для СПД и 1 экрана, 5,6 % – для СПД и 2 экранов, 14,6 % – для СПД и 3 экранов. Экспериментальные данные и результаты расчета показывают тенденцию увеличения приведенного сопротивления теплопередаче по высоте оконного блока в случае применения теплоотражающих экранов: при использовании 1 экрана экспериментальное значение сопротивления  $R_0$  увеличивается с 0,73 до 0,83 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 13,7 %), расчетное значение – с 0,77 до 0,83 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 7,8 %); при наличии 2 экранов экспериментальное  $R_0$  возрастает с 1,1 до 1,31 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 19,1 %), расчетное – с 1,14 до 1,24 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 8,8 %); при наличии 3 экранов экспериментальное  $R_0$  возрастает с 1,43 до 1,81 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 26,6 %), расчетное – с 1,48 до 1,58 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 6,8 %).

Экспериментальное сопротивление теплопередаче в центральной зоне увеличивается при использовании 3 экранов с 0,47 (без экранов) до 1,72 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или в 3,7 раза), расчетное – с 0,48 до 1,54 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или в 3,2 раза).

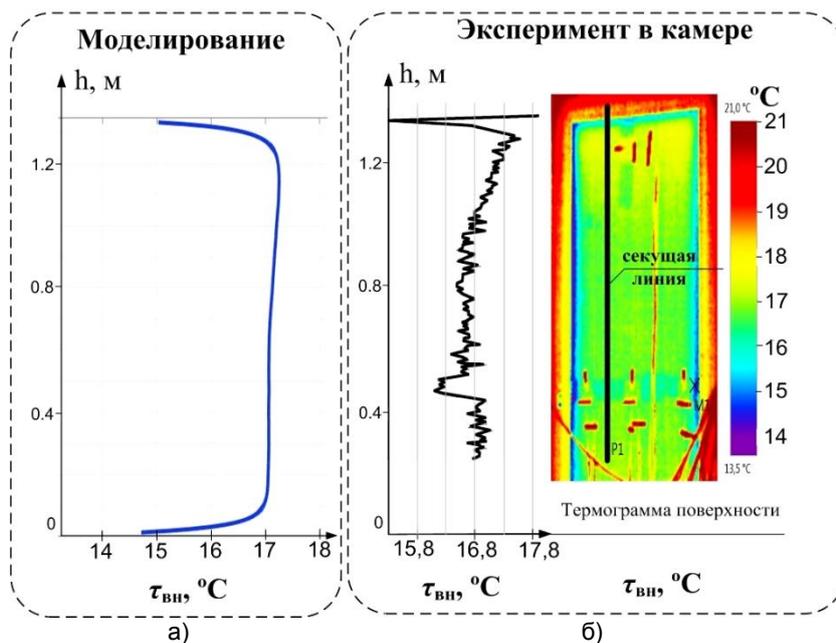


Рис. 12. Сопоставление графиков температур на поверхности остекления по высоте светопрозрачной части оконного блока, полученных в ходе имитационного моделирования (а) и эксперимента в камере (б)

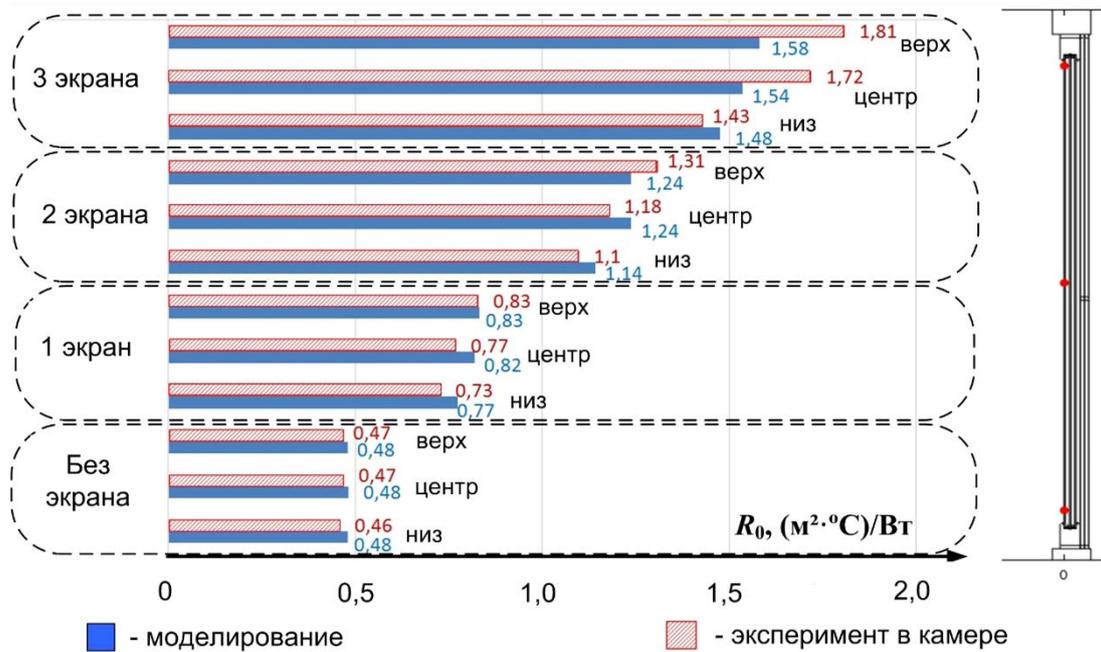


Рис. 13. Сравнение значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока  $R_0$  в нижней, центральной и верхней точках замера при различном количестве экранов со стороны «холодного» отделения, полученных в ходе имитационного моделирования и физического эксперимента в камере

Было произведено сравнение результатов моделирования с данными справочной литературы. Согласно Приложению К СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»<sup>3</sup>, приведенное сопротивление теплопередаче центральной зоны стеклопакета СПД 4М<sub>1</sub>-10-4М<sub>1</sub>-10-4М<sub>1</sub> составляет 0,46 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Следовательно, абсолютная погрешность моделирования для данного случая составляет 0,02 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, относительная – 4,3 %.

Анализ полученных данных (рис. 7–13) показывает удовлетворительное совпадение результатов имитационного моделирования процесса теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает возможность использования разработанной модели для определения теплотехнических характеристик данной ограждающей конструкции.

**Выводы.** В ходе выполнения проверки адекватности двумерной имитационной модели процесса теплопередачи через оконный блок с экранами путем сопоставления полученных данных с результатами исследований других ученых и нормативной документацией, а также с результатами экспериментальных исследований в сертифицированной климатической камере была подтверждена возможность использования разработанной модели для определения теплотехнических характеристик ограждающей конструк-

ции. Было установлено, что применение теплоотражающих экранов в оконном блоке позволило увеличить приведенное сопротивление теплопередаче в 1,6–3,7 раза, в зависимости от их количества. Было выявлено значительное снижение температуры в краевых зонах стеклопакета. Использование разработанной имитационной модели 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 эксплуатации помещений промышленных предприятий.

На основании выполненного моделирования получено Свидетельство на программу для ЭВМ «Программа для двумерного моделирования процесса теплопередачи через оконный блок с экранами» [18].

#### Список литературы

1. Информационная база данных по оптическим и теплозащитным характеристикам строительных материалов / Л.В. Прима, М.В. Горелов, В.С. Глазов, Э.К. Фелькер // Энергосбережение – теория и практика: труды VIII Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – С. 165–170.
2. Бухмиров В.В., Пророкова М.В. Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 5–10.

<sup>3</sup> СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введен 2013-07-01. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.

3. **Савин В.К.** Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. – М.: Лазурь, 2005. – 432 с.

4. **Ахмяров Т.А., Спиридонов А.В., Шубин И.Л.** Новое поколение энергоэффективных вентилируемых светопрозрачных и фасадных конструкций с активной рекуперацией теплового потока // Жилищное строительство. – 2015. – № 1. – С. 18–23.

5. **Подковырина К.А., Подковырин В.С.** Светопрозрачные ограждающие конструкции (методы снижения тепловых потерь и мировой опыт применения) // Архитектура и дизайн. – 2018. – № 1. – С. 46–51.

6. **Низовцев М.И., Терехов В.И.** Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – № 1. – С. 60–76.

7. **Смирнов Н.Н.** Совершенствование систем по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – Иваново, 2022. – 333 с.

8. **Пат. 154163** Российская Федерация МПК Е 06 В 9/17. Многофункциональный энергоэффективный ставень / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, Д.А. Лапатеев и др.; опубл. 20.08.2015, бюл. № 23.

9. **Hashemi A., Gage S.** Technical issues that affect the use of retrofit panel thermal shutters in commercial buildings // Building Services Engineering Research and Technology. – 2014. – No. 35. – P. 6–22.

10. **Performance** of a window shutter with phase change material under summer Mediterranean climate conditions / T. Tiago Silva, R. Vicente, F. Rodrigues, et al. // Applied Thermal Engineering. – 2015. – No. 84. – P. 246–245.

11. **Корепанов Е.В.** Численное моделирование теплопередачи через окна с тройным остеклением // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 7. – С. 44–52.

12. **Корепанов Е.В.** Выбор критериальных уравнений для эквивалентной теплопроводности светопрозрачной части окна // СОК. – 2016. – № 12. – С. 1–12.

13. **Варапаев В.Н., Голубев С.С.** Численное моделирование сопряженной задачи теплообмена в стеклопакетах оконных ограждений // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 11. – С. 72–75.

14. **Голубев С.С.** Численное моделирование сложного теплообмена в стеклопакете с учетом его деформирования // Вестник МГСУ. – 2012. – № 12. – С. 47–52.

15. **Two-dimensional** conduction and CFD simulations of heat transfer in window frame cavities / A. Gustavsen, Ch. Kohler, D. Arasteh, D. Curcija // ASHRAE transactions. – 2005. – Vol. 111, No. 1. – P. 587–598.

16. **Gerlich V., Sulovská K., Zálešák M.** COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings: Building simulation software validation // Measurement. – 2013. – Vol. 46, No. 6. – P. 2003–2012.

17. **Experimental** and Numerical Simulations of Climatic Loads in Insulating Glass Units by Controlled Change of Pressure in the Gap / M. Kozłowski, Z. Respondek, M. Wiśniowski, et al. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – P. 1269–1278.

18. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022682827 Российская Федерация. Программа для двухмерного моделирования процесса теплопередачи через оконный блок с

экранами / Г.И. Парфенов, Н.Н. Смирнов, В.В. Тютиков, В.М. Захаров, И.С. Трухин, А.А. Яблоков; зарег. 28.11.2022 г.

## References

1. Prima, L.V., Gorelov, M.V., Glazov, V.S., Fel'ker, E.K. Informatsionnaya baza dannykh po opticheskim i teplozashchitnym kharakteristikam stroitel'nykh materialov [Information database on optical and heat-shielding characteristics of building materials]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov «Energoberezhnie – teoriya i praktika»* [Proceedings of VIII international workshop of young scientists and specialists "Energy saving – theory and practice"]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2016, pp. 165–170.

2. Bukhmirov, V.V., Prorokova, M.V. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 4, pp. 5–10.

3. Savin, V.K. *Stroitel'naya fizika: energoperenos, energoeffektivnost', energoberezhnie* [Building physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow: Lazur, 2005. 432 p.

4. Akhmyarov, T.A., Spiridonov, A.V., Shubin, I.L. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 1, pp. 18–23.

5. Podkovyrina, K.A., Podkovyrin, V.S. *Arkhitektura i dizayn*, 2018, no. 1, pp. 46–51.

6. Nizovtsev, M.I., Terekhov, V.I. *Problemy regional'noy energetiki*, 2011, no. 1, pp. 60–76.

7. Smirnov, N.N. *Sovershenstvovanie sistem po sozdaniyu dinamicheskogo mikroklimata dlya pomeshcheniy s energoeffektivnymi svetoprozrachnymi konstruksiyami*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving systems for creating a dynamic microclimate for rooms with energy-efficient translucent structures. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2022. 333 p.

8. Zakharov, V.M., Smirnov, N.N., Lapateev, D.A., Trukhin, D.S., Yablokov, A.A., Kolosova, Yu.S. *Mnogofunktsional'nyy energoeffektivnyy staven'* [Multifunctional energy efficient shutter]. Patent RF, no. 154163, 2015.

9. Hashemi, A., Gage, S. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2014, no. 35, pp. 6–22.

10. Silva, T., Vicente, R., Rodrigues, F., Samagaio, A., Cardoso, C. *Applied Thermal Engineering*, 2015, no. 84, pp. 246–245.

11. Korepanov, E.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2009, no. 7, pp. 44–52.

12. Korepanov, E.V. *SOK*, 2016, no. 12, pp. 1–12.

13. Varapaev, V.N., Golubev, S.S. *Proyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 11, pp. 72–75.

14. Golubev, S.S. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 12, pp. 47–52.

15. Gustavsen, A., Kohler, Ch., Arasteh, D., Curcija, D. Two-dimensional conduction and CFD simulations of heat transfer in window frame cavities. *ASHRAE transactions*, 2005, vol. 111, no. 1, pp. 587–598.

16. Gerlich, V., Sulovská, K., Zálešák, M., *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 6, pp. 2003–2012.

17. Kozłowski, M., Respondek, Z., Wiśniowski, M., Cornik, D., Zemła, K. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 1269–1278.

18. Parfenov, G.I., Smirnov, N.N., Tyutikov, V.V., Zakharov, V.M., Trukhin, I.S., Yablokov, A.A. *Programma dlya dvukhmernogo modelirovaniya protsessa teploperedachi cherez okonnyy blok s ekranami* [Program for two-dimensional simulation of the process of heat transfer through a window unit with screens]. Certificate RF, no. 2022682827, 2022.