

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

---

---

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: parfenovgir@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

### **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

### **Евгений Николаевич Бушуев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-78, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

### **Елена Александровна Шуина**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-74, e-mail: HM\_ISPU@mail.ru

## **Влияние заполнения прослоек малотеплопроводными газами на тепловую защиту оконных блоков с экранами**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Учеными ИГЭУ были разработаны энергосберегающие конструкции оконных блоков с теплоотражающими экранами, осуществлены их испытания в климатической камере, а также выполнено имитационное моделирование процесса теплопередачи через данные конструкции. Несмотря на большое количество научных публикаций, рассматривающих экспериментальные лабораторные исследования и численное моделирование процессов теплопередачи через светопрозрачные конструкции, отсутствуют данные о влиянии использования в прослойках, образованных стеклами и металлическими элементами, малотеплопроводных газов на повышение тепловой защиты оконных блоков с экранами. Правильность определения приведенного сопротивления теплопередаче оконных блоков, в которых используются экраны и малотеплопроводные газы, влияет на корректность составления теплового баланса для помещений различного назначения и, следовательно, на качество проектирования энергетических систем по обеспечению микроклимата внутри помещений. Таким образом, разработка моделей процесса теплопередачи через вышеуказанные строительные конструкции является актуальной задачей при формировании микроклимата внутри помещений.

**Материалы и методы.** Имитационное численное моделирование выполнено с помощью метода конечных элементов на основании фундаментальных законов теплообмена.

**Результаты.** Разработана двухмерная имитационная модель теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими экранами, в котором прослойки между стеклами и алюминиевой фольгой заполнены аргоном и криптоном. Исследовано распределение приведенного сопротивления теплопередаче по высоте светопрозрачной ограждающей конструкции. Адекватность предложенной имитационной модели подтверждена ее сравнением с данными других авторов и нормативной документацией.

**Выводы.** Заполнение прослоек, образованных стеклами и металлической фольгой, аргоном позволило увеличить зональное приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока с экранами по отношению к базовому варианту (воздух) на 6–23 %, криптоном – на 8–58 % (в зависимости от места замера и количества экранов). Использование разработанной имитационной модели позволит более точно определить потенциал применения теплоотражающих экранов в окнах для систем прерывистого отопления зданий.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, оконный блок с теплоотражающими экранами, приведенное сопротивление теплопередаче, теплообмен, малотеплопроводные газы

#### **Grigoriy 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

#### **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

#### **Evgeniy Nikolayevich Bushuev**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Associate Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-78, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

#### **Elena Alexandrovna Shuina**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-74, e-mail: HM\_ISPU@mail.ru

## **Influence of filling gaps with low thermal conductivity gases on thermal protection of window units with screens**

### **Abstract**

**Background.** ISPU scientists have developed energy-saving constructions of window units with heat-reflecting screens, have tested them in a climate chamber, and have carried out simulation modeling of the heat transfer process through these constructions. Despite a large number of scientific papers that consider experimental laboratory studies and numerical simulation of heat transfer processes through translucent constructions, there is no data on the effect of the application of low thermal conductivity gases in the gaps formed by glass and metal elements on increasing the thermal protection of window units with screens. The correct calculation of the reduced heat transfer resistance of window units with screens and low-thermal conductivity gases affects the correctness of the heat balance for premises and, consequently, the quality of the design of energy systems to ensure the indoor microclimate. Thus, the development of models of heat transfer process through a window unit with screens is an urgent task to ensure the indoor microclimate.

**Materials and methods.** Simulation numerical modeling is carried out using the finite element method based on the fundamental laws of heat transfer.

**Results.** The authors have developed a two-dimensional simulation model of heat transfer through a window unit with heat-reflecting screens, in which the gaps between the glass and aluminum foil are filled with argon and krypton. The distribution of resistance to heat transfer along the height of a translucent enclosing structure has been studied. The adequacy of the proposed simulation model is confirmed by comparison with data of other scientists and regulatory documentation.

**Conclusions.** Filling the gaps between glass and metal foil with argon makes it possible to increase the zonal heat transfer resistance of a window unit with screens in relation to the base-case scenario (air) by 6–23 %, krypton by 8–58 % (depending on the measurement location and the number of screens). The application of the developed simulation model will make it possible to more accurately determine the potential to use heat-reflecting screens in windows for intermittent heating systems of buildings.

**Key words:** simulation, window block with heat-reflecting screens, resistance to heat transfer, heat transfer, low-heat-conductivity gases

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.6.005-012

**Введение.** 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 и светопрозрачные кровли; фонари и т.д. [1].

Через светопрозрачные ограждающие конструкции в окружающую среду теряется весомое количество тепловой энергии, что связано с низким значением приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0$  данных элементов здания. Согласно известным данным [2], для достаточно распространенных 5-этажных жилых зданий (серии 1-335 А и 1-447) тепловые потери через окна составляют от 27 до 33 %, а для 9-этажных (серия 1-мг-600) – до 34 % потерь через наружные ограждающие конструкции.

В настоящее время существует целый спектр технологий [3] по снижению тепловых потерь через СПК. Следует особо отметить технологию заполнения прослоек между стеклами малотеплопроводными газами [4–7], а именно аргоном, криптоном, ксеноном и элегазом. Наиболее

доступным с точки зрения стоимости является аргон. Инертные газы сохраняют оптические свойства стеклопакета при любых температурах, а также хуже пропускают звуковые колебания по сравнению с воздухом, что повышает шумозащиту оконных блоков [5]. Теплопроводность аргона, равная 0,016 Вт/(м·°С) при температуре 21 °С, в 1,5 раза меньше теплопроводности воздуха, в 3,0 раза (0,008 Вт/(м·°С)) – криптона [7]. Заполнение прослоек указанными инертными газами значительно снижает конвективную составляющую теплообмена в стеклопакете, причем дополнительное увеличение толщины прослойки и изготовление дистанционных рамок из малотеплопроводных материалов (ПВХ, TPS, Swiggle Strip) значительно повышает температуру на внутренней поверхности остекления, особенно в краевых зонах стеклопакета, где велика вероятность выпадения конденсата [7].

Наибольший эффект от применения малотеплопроводных газов в качестве заполнения прослоек в стеклопакетах получается при дополнительном нанесении на стекла теплоотражающих покрытий (рис. 1).

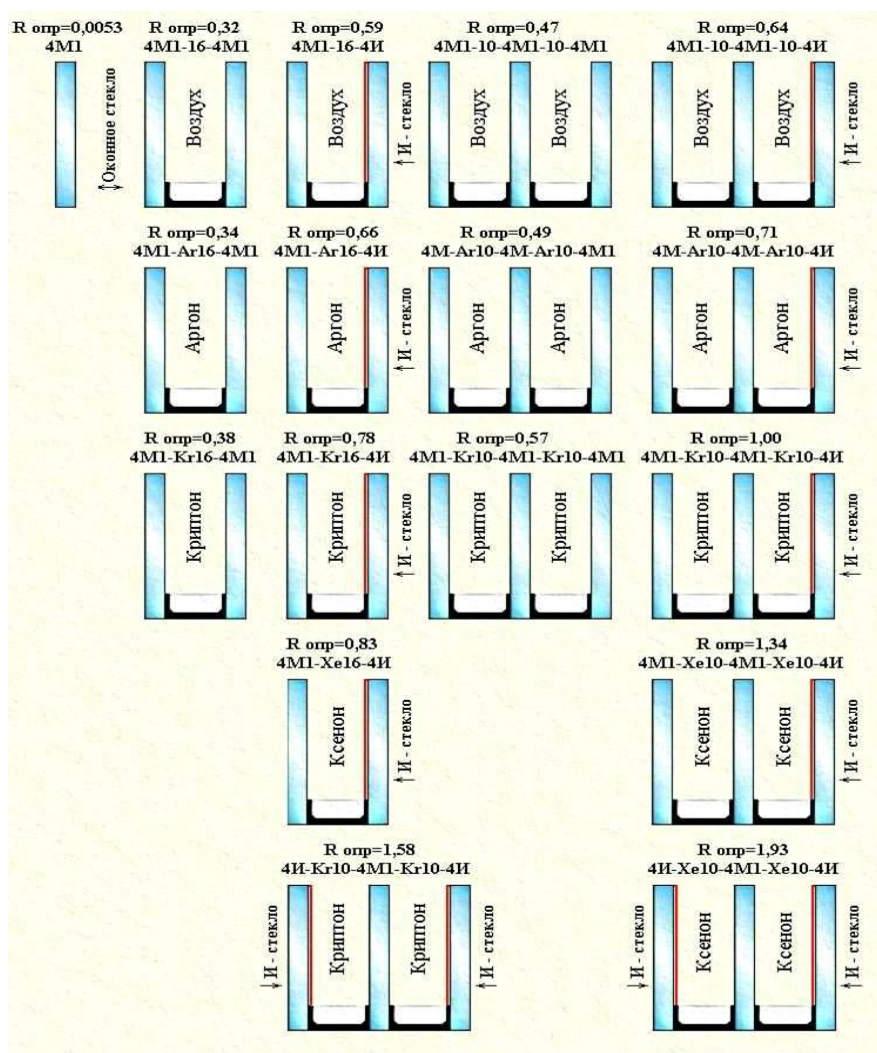


Рис. 1. Приведенное сопротивление теплопередаче  $R_{0пр}$ , (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, газонаполненных стеклопакетов [8]

Анализ теплотехнических характеристик стеклопакетов, приведенных в виде справочной информации к ГОСТ 24866-99, а также в научных публикациях [4, 6, 8], позволяет сделать вывод, что использование в СПК инертных газов целесообразно только при совместном нанесении теплоотражающих покрытий на стекла в каждой прослойке (рис. 1). Так, применение криптона в двухкамерном стеклопакете с обычными стеклами (формула  $4M_1-Kr10-4M_1-Kr10-4M_1$ ) увеличивает приведенное сопротивление теплопередаче с 0,47 (заполнение воздухом) до 0,57 ( $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ) (или в 1,2 раза), а дополнительное нанесение «мягкого» селективного теплоотражающего покрытия на одно из стекол повышает  $R_0$  до значения 1,00 ( $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ) (или в 2,1 раза), на два стекла (формула  $4И-Kr10-4M_1-Kr10-4И$ ) – до 1,58 ( $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ) (или в 3,4 раза).

Учеными ИГЭУ были разработаны энергосберегающие конструкции оконных блоков с теплоотражающими экранами. Использование непрозрачных металлических экранов предусматривается в темное время суток или во время отсутствия людей в помещении. Были осуществлены испытания энергосберегающих конструкций окон в климатической камере, а также разработаны и верифицированы имитационные модели процесса теплопередачи через данные объекты [9, 10]. Было выявлено, что использование экранов позволяет в 1,5–3,8 раза увеличить приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной ограждающей конструкции. Однако влияние заполнения прослоек малотеплопроводными газами на тепловую защиту СПК с экранами не было исследовано.

Правильность определения приведенного сопротивления теплопередаче оконных блоков, в которых используются экраны и малотеплопроводные газы, влияет на корректность составления теплового баланса для помещений различного назначения и, следовательно, на качество проектирования энергетических систем по обеспечению микроклимата. Таким образом, разработка моделей процесса теплопередачи через вышеуказанные строительные конструкции является актуальной задачей при формировании микроклимата внутри помещений.

Объектом исследования являются тепло-массообменные процессы, происходящие в оконном блоке с теплоотражающими экранами и малотеплопроводными газами (в прослойках).

Целью исследования является определение с помощью имитационного моделирования влияния использования теплоотражающих экранов и заполнения прослоек малотеплопроводными газами на приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока.

**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 [10].

Климатическая камера (рис. 2) состоит из теплого и холодного отделений, разделенных между собой перегородкой, выполненной в виде стены из кирпичной кладки.

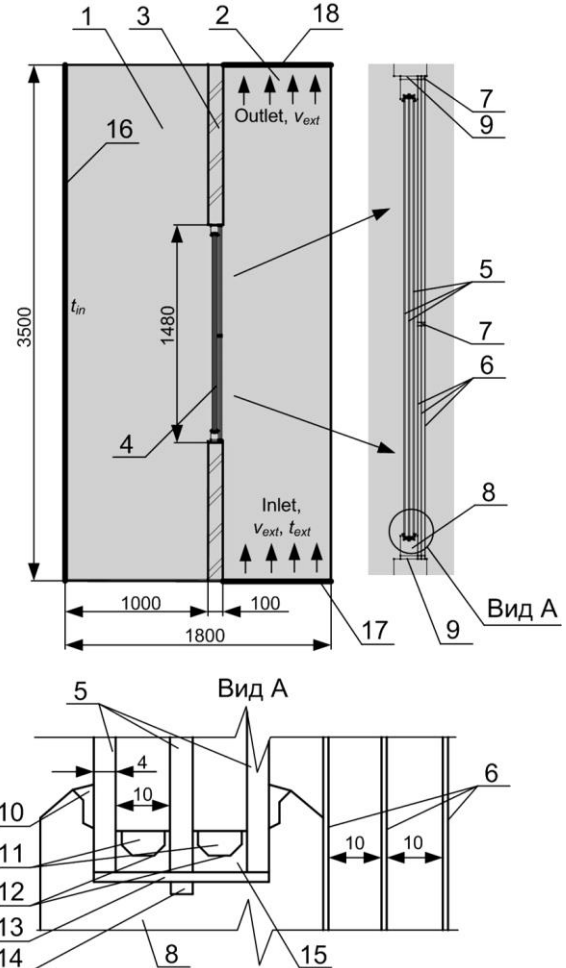


Рис. 2. Расчетная схема модели: 1, 2 – теплое и холодное отделения климатической камеры; 3 – кирпичная перегородка; 4 – испытуемый оконный блок; 5 – стекла; 6 – металлические экраны; 7 – разделительная пластиковая планка; 8 – деревянная рама; 9 – теплоизоляция из пенополиуретана; 10 – силиконовый герметик;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

В перегородке предусмотрен проем, в котором размещен испытуемый оконный блок. Базовый оконный блок включает в себя двухкамерный стеклопакет СПД  $4M_1-10-4M_1-10-4M_1$ , а также деревянную раму. Со стороны холодного отделения в световом проеме установлены алюминиевые экраны.

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  $t_{in}$  (рис. 2, поз. 16) в процессе моделирования принимали таким образом, чтобы температура воздуха на расстоянии 150 мм от внутренней поверхности оконного блока составляла 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.

При описании математической модели использовались уравнения неизоэтермического движения несжимаемого вязкого газа, сохранения энергии в прямоугольных декартовых координатах, неразрывности, переноса лучистой энергии [9]. При реализации математической модели теплопередачи через оконный блок с экранами в качестве метода расчета радиационного теплопереноса был принят метод дискретных ординат (Discrete Ordinats (DO)) [11]. В имитационной модели не учитывались солнечная инсоляция, инерционные свойства конструкций, воздухопроницаемость. Задача решалась в двумерной постановке как стационарная.

Исследовались базовый вариант окна без экранов и случаи с одним, двумя и тремя теплоотражающими экранами при заполнении прослоек воздухом, аргоном и криптоном.

**Результаты.** В результате проведения многовариантного имитационного двумерного 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. 3. Необходимо отметить образование «застойных» зон в верхней и нижней частях воздушных прослоек.

Для анализа теплозащитных характеристик оконного блока особый интерес представляют графики изменения значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока  $R_0$  в нижней, центральной и верхней точках замера для стеклопакета с различным количеством экранов в случае заполнения прослоек воздухом, а также аргоном и криптоном (рис. 4). Теплоотражающие экраны были установлены со стороны холодного отделения камеры. На рис. 4 приведены данные физического лабораторного эксперимента, осуществленного в климатической камере АНО «Ивановостройиспытания» [10] (штриховые линии), а также результаты имитационного моделирования (сплошные линии).

Относительная погрешность приведенного сопротивления  $R_0$  между результатами имитационного моделирования и экспериментально полученными данными (табл. 1) 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.

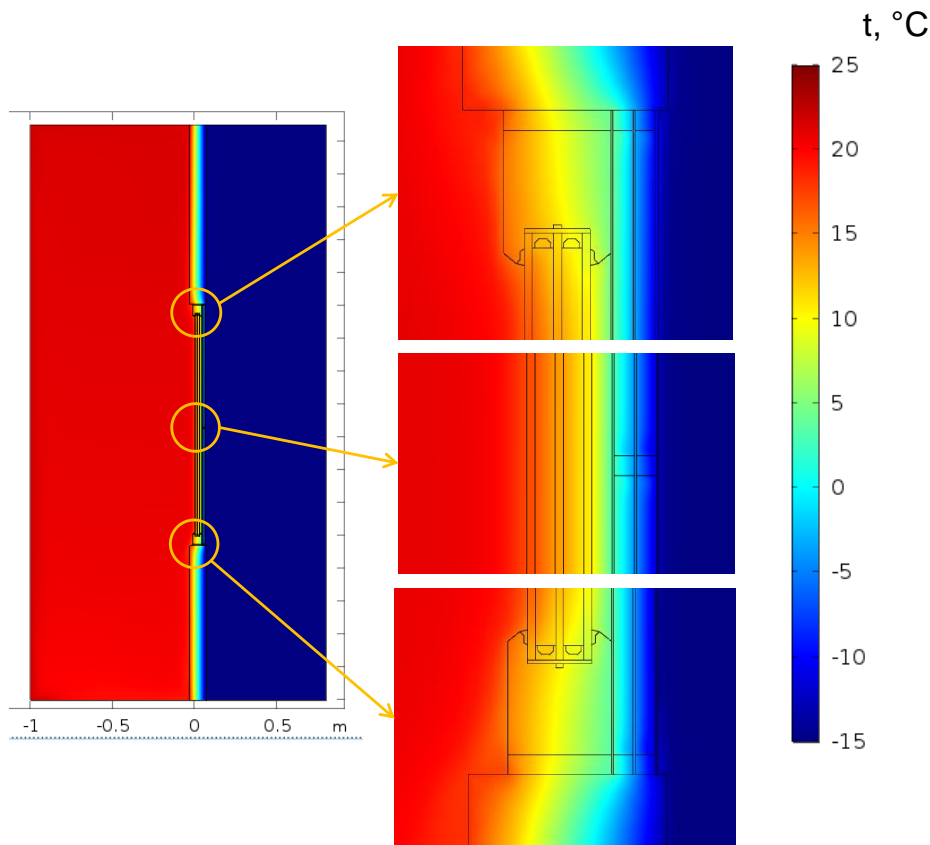


Рис. 3. Температурное поле климатической камеры

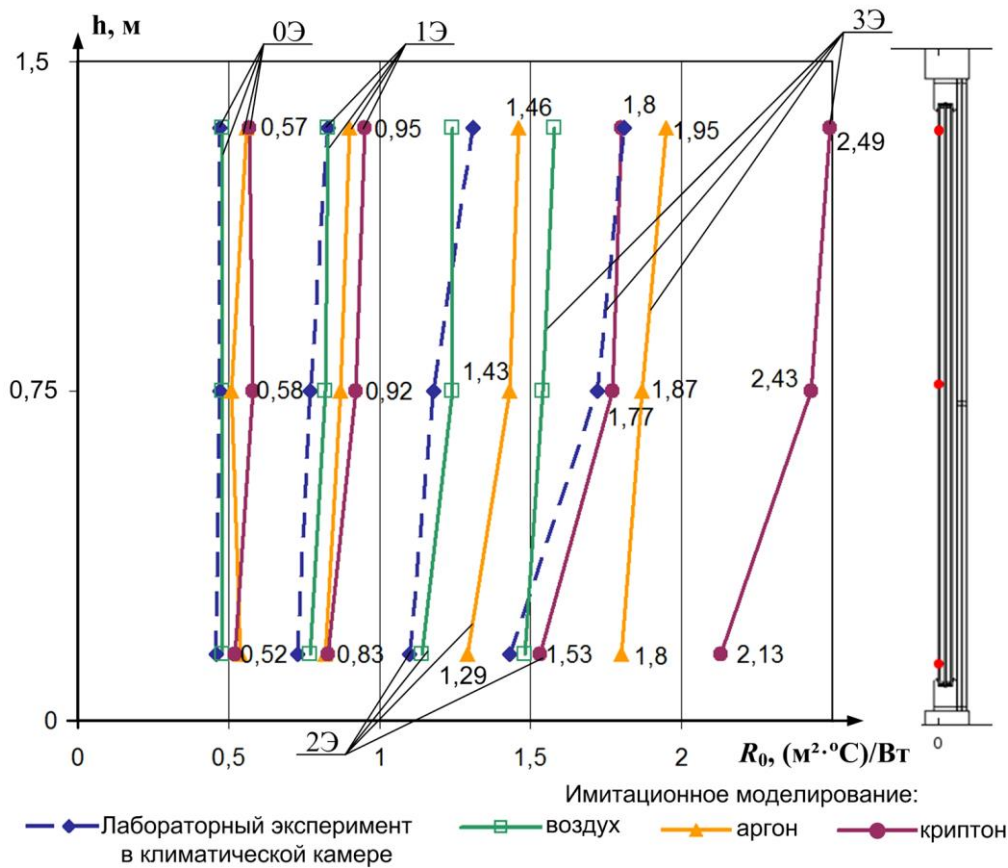


Рис. 4. Графики изменения значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока  $R_0$  в нижней, центральной и верхней точках замера для стеклопакета с одним (1Э), двумя (2Э) и тремя (3Э) экранами (0Э – без экранов), полученных в ходе имитационного моделирования и физического эксперимента в камере при заполнении прослоек различными газами

Таблица 1. Значения приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0$  в нижней, центральной и верхней точках замера для стеклопакета с различным количеством экранов, полученные в ходе имитационного моделирования и физического эксперимента в камере при заполнении прослоек различными газами

Количество экранов (Э)	Заполнение прослоек газами в физическом эксперименте (ФЭ) или имитационном моделировании (ИМ) (формула конструкции)	Приведенное сопротивление теплопередаче $R_0$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, в точках замера		
		нижняя	центральная	верхняя
Без экранов	ФЭ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1$ )	0,46	0,47	0,47
	ИМ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1$ )	0,48	0,48	0,48
	ИМ: аргон ( $4M_1-\text{Ar}10-4M_1-\text{Ar}10-4M_1$ )	0,54	0,51	0,56
	ИМ: криптон ( $4M_1-\text{Kr}10-4M_1-\text{Kr}10-4M_1$ )	0,52	0,58	0,57
1 экран	ФЭ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1 + \text{Э}$ )	0,73	0,77	0,83
	ИМ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1 + \text{Э}$ )	0,77	0,82	0,83
	ИМ: аргон ( $4M_1-\text{Ar}10-4M_1-\text{Ar}10-4M_1 + \text{Э}$ )	0,82	0,87	0,9
	ИМ: криптон ( $4M_1-\text{Kr}10-4M_1-\text{Kr}10-4M_1 + \text{Э}$ )	0,83	0,92	0,95
2 экрана	ФЭ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1 + \text{Э}-10-\text{Э}$ )	1,1	1,18	1,31
	ИМ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1 + \text{Э}-10-\text{Э}$ )	1,14	1,24	1,24
	ИМ: аргон ( $4M_1-\text{Ar}10-4M_1-\text{Ar}10-4M_1 + \text{Э}-\text{Ar}10-\text{Э}$ )	1,29	1,43	1,46
	ИМ: криптон ( $4M_1-\text{Kr}10-4M_1-\text{Kr}10-4M_1 + \text{Э}-\text{Kr}10-\text{Э}$ )	1,53	1,77	1,8
3 экрана	ФЭ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1 + \text{Э}-10-\text{Э}-10-\text{Э}$ )	1,43	1,72	1,81
	ИМ: воздух ( $4M_1-10-4M_1-10-4M_1 + \text{Э}-10-\text{Э}-10-\text{Э}$ )	1,48	1,54	1,58
	ИМ: аргон ( $4M_1-\text{Ar}10-4M_1-\text{Ar}10-4M_1 + \text{Э}-\text{Ar}10-\text{Э}-\text{Ar}10-\text{Э}$ )	1,8	1,87	1,95
	ИМ: криптон ( $4M_1-\text{Kr}10-4M_1-\text{Kr}10-4M_1 + \text{Э}-\text{Kr}10-\text{Э}-\text{Kr}10-\text{Э}$ )	2,13	2,43	2,49

Было произведено сравнение результатов моделирования с известными литературными данными. Согласно Приложению А ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия», приведенное сопротивление теплопередаче центральной зоны стеклопакета СПД 4М<sub>1</sub>-Ar10-4М<sub>1</sub>-Ar10-4М<sub>1</sub> составляет 0,49 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (см. рис. 1). Следовательно, абсолютная погрешность моделирования для данного случая составляет 0,02 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, относительная – 4,1 %.

Для двухкамерного стеклопакета СПД 4М<sub>1</sub>-Kr10-4М<sub>1</sub>-Kr10-4М<sub>1</sub>, в котором прослойки между стеклами заполнены криптоном, справочное значение  $R_0$  (см. рис. 1) составляет 0,57 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт [8], а полученное в результате моделирования – 0,58 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Относительная погрешность составляет 1,8 %.

Экспериментальные данные и результаты расчета показывают тенденцию увеличения приведенного сопротивления теплопередаче по высоте оконного блока в случае применения теплоотражающих экранов. С увеличением количества применяемых экранов возрастает и относительное приращение  $R_0$  по высоте. Так, в случае использования криптона в прослойках (см. рис. 4) при применении 1 экрана  $R_0$  возрастает по высоте с 0,83 до 0,95 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (или на 14 %), при трех экранах  $R_0$  увеличивается с 2,13 до 2,49 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (или на 17 %).

Максимальный эффект по увеличению тепловой защиты оконных блоков с экранами был получен при заполнении прослоек криптоном и использовании 3 теплоотражающих экранов (СПД 4М<sub>1</sub>-Kr10-4М<sub>1</sub>-Kr10-4М<sub>1</sub> + Э-Kr10-Э-Kr10-Э) (см. табл. 1). По сравнению с контрольным вариантом (стеклопакет СПД 4М<sub>1</sub>-10-4М<sub>1</sub>-10-4М<sub>1</sub>),  $R_0$  в этом случае в центральной зоне увеличивается с 0,48 до 2,43 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (или в 5 раз).

Особый интерес представляет определение эффекта от использования в качестве заполнения прослоек аргона и криптона (вместо воздуха) в идентичных конструкциях (табл. 2).

Необходимо отметить, что чем больше количество экранов, тем значительнее эффект от использования инертных газов. Так, при определении эффекта от заполнения прослоек аргоном можно констатировать, что без использования экранов относительное увеличение сопротивления  $\delta R_0$  находится в диапазоне от 6 до 17 %, при трех экранах – от 21 до 23 %. Эффект от применения криптона еще более значителен: без экранов относительное увеличение сопротивления  $\delta R_0$  находится в диапазоне от 8 до 19 %, при трех экранах – от 44 до 58 %.

Таким образом, наибольший эффект для тепловой защиты оконных блоков с экранами от использования малотеплопроводных газов в качестве заполнения прослоек получается при применении криптона.

**Выводы.** В ходе выполнения проверки адекватности двумерной имитационной модели процесса теплопередачи через оконный блок с заполнением прослоек малотеплопроводными газами путем сопоставления полученных данных с результатами исследований других ученых и нормативной документацией была подтверждена возможность использования разработанной модели для определения теплотехнических характеристик ограждающей конструкции. Для верификации моделей оконных блоков с экранами и малотеплопроводными газами необходимо проведение дополнительных экспериментов в климатической камере.

Заполнение прослоек, образованных стеклами и металлической фольгой, аргоном позволило увеличить зональное приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока с экранами по сравнению с базовым вариантом (воздух) – на 6–23%, криптоном – на 8–58 % (в зависимости от места замера и количества экранов). Использование разработанной имитационной модели позволит более точно определить потенциал применения теплоотражающих экранов в окнах для систем прерывистого отопления зданий.

Таблица 2. Относительное увеличение приведенного сопротивления теплопередаче  $\delta R_0$ , %, от использования в прослойках аргона или криптона (по сравнению с заполнением прослоек воздухом)

Количество экранов (Э)	Заполнение прослоек газами (формула конструкции)	$\delta R_0$ , %, в точках замера		
		нижняя	центральная	верхняя
Без экранов	Аргон (4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> )	13	6	17
	Криптон (4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> )	8	21	19
1 экран	Аргон (4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> + Э)	6	6	8
	Криптон (4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> + Э)	8	12	14
2 экрана	Аргон (4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> + Э-Ar10-Э)	13	15	18
	Криптон (4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> + Э-Kr10-Э)	34	43	45
3 экрана	Аргон (4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> -Ar10-4М <sub>1</sub> + Э-Ar10-Э-Ar10-Э)	22	21	23
	Криптон (4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> -Kr10-4М <sub>1</sub> + Э-Kr10-Э-Kr10-Э)	44	58	58

На основании выполненного моделирования было получено Свидетельство на программу для ЭВМ «Программа для двухмерного моделирования процесса теплопередачи через энергоэффективный оконный блок с заполненными аргоном внутренними камерами стеклопакета и с теплоотражающим экраном» [12].

### Список литературы

1. **Савин В.К.** Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. – М.: Лазурь, 2005. – 432 с.
2. **Грахов В.П., Мохначев С.А., Егорова В.Г.** Эффективность энергосберегающих мероприятий в жилищном строительстве // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 273–280.
3. **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.
4. **Шибeko А.С.** Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов // Наука и техника. – 2018. – № 2. – С. 157–164.
5. **Численная** оценка приведенного сопротивления теплопередаче оконных блоков различных конфигураций / М.В. Драница, П.С. Пахомов, Н.Е. Киреев, А.С. Орешонков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 10(766). – С. 76–81.
6. **Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review** / R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, S. Grynning // Energy and Buildings. – 2010. – Т. 42, № 11. – С. 1969–1975.
7. **Бушо А.В.** Факторы, определяющие температурный режим стеклопакетов в краевых зонах // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1-1. – С. 64–69.
8. **Данилин М.** Стеклопакет с аргоном и криптоном: что следует знать о современной оконной конструкции [Электронный ресурс компании Промтехгаз]. – Режим доступа: <http://промтехгаз.рф/steklopaket-s-argonom-i-kriptonom/> {дата обращения: 14.10.2023}.
9. **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.
10. **Разработка** и верификация имитационной модели процесса теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими экранами / Г.И. Парфенов, Н.Н. Смирнов, А.В. Соколов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 28–39.
11. **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.
12. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023662772 Российская

Федерация. Программа для двухмерного моделирования процесса теплопередачи через энергоэффективный оконный блок с заполненными аргоном внутренними камерами стеклопакета и с теплоотражающим экраном / Г.И. Парфенов, Н.Н. Смирнов, В.В. Тютиков и др.; зарег. 14.06.2023 г.

### References

1. Savin, V.K. *Stroitel'naya fizika: energopereenos, energoeffektivnost', energosberezhenie* [Building physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow: Lazur', 2005. 432 p.
2. Grakhov, V.P., Mokhnachev, S.A., Egorova, V.G. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 2-1, pp. 273–280.
3. Podkovyrina, K.A., Podkovyrin, V.S. *Arkhitektura i dizayn*, 2018, no. 1, pp. 46–51.
4. Shibeko, A.S. *Nauka i tekhnika*, 2018, no. 2, pp. 157–164.
5. Dranitsa, M.V., Pakhomov, P.S., Kireev, N.E., Oreshonkov, A.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2022, no. 10(766), pp. 76–81.
6. Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., Grynning, S. *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42, no. 11, pp. 1969–1975.
7. Busho, A.V. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 1-1, pp. 64–69.
8. Danilin, M. *Steklopaket s argonom i kriptonom: chto sleduet znat' o sovremennoy okonnoy konstruksii* [Double-glazed window with argon and krypton: what you should know about modern window construction]. Available at: <http://promtekhgaz.rf/steklopaket-s-argonom-i-kriptonom/>
9. 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.
10. Parfenov, G.I., Smirnov, N.N., Sokolov, A.V., Tyutikov, V.V., Yarinin, S.N., Yarinina, N.N. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 28–39.
11. 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.
12. Parfenov, G.I., Smirnov, N.N., Tyutikov, V.V., Trukhin, I.S., Rakutina, D.V., Abyshkin, M.O. *Programma dlya dvukhmernogo modelirovaniya protsessa teploperedachi cherez energoeffektivnyy okonnyy blok s zapolnennymi argonom vnutrennimi kamerami steklopaketa i s teplootrazhayushchim ekranom* [Program for two-dimensional modeling of the heat transfer process through an energy-efficient window unit with argon-filled gaps and a heat-reflecting screen]. Certificate no. 2023662772 RF, 2023.