

УДК 519.6, 532.5

DOI: 10.22363/2413-3639-2025-71-2-221-232

EDN: МОСМОН

## ЧИСЛЕННОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СТЕКЛОПАКЕТАХ

Е. И. Гурина, П. А. Сомова

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

**Аннотация.** В настоящем исследовании осуществляется анализ теплопередачи однокамерного и двухкамерного стеклопакетов, устанавливаемых в наружной и внутренней створках составной конструкции оконного блока с наполнением межстекольного пространства осушенным воздухом и инертными газами. Математическая модель строится на основе решения уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами в двумерной постановке, учитывающей слоистую структуру конструкции с использованием граничных условий III и IV рода. Численная реализация поставленной задачи осуществляется с помощью метода конечных разностей на равномерной сетке с использованием языка программирования C++. Для учета конвективного теплообмена через стеклопакеты проведена серия численных расчетов в ПО ANSYS Fluent. Показано, что снижение конвективных тепловых потерь в стеклопакетах возможно за счёт увеличения толщины дистанционной рамки и применения инертных газов с низкой теплопроводностью. Выявлена оптимальная толщина газонаполненной камеры однокамерного стеклопакета (при наполнении воздухом, осушенным воздухом, аргоном, криптоном, ксеноном), обеспечивающая максимальное термическое сопротивление.

**Ключевые слова:** теплопередача, стеклопакет, уравнение теплопроводности, численное решение, метод конечных разностей.

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности и финансирование.** Авторы заявляют об отсутствии финансовой поддержки.

**Для цитирования:** Е. И. Гурина, П. А. Сомова. Численное и компьютерное моделирование для оценки теплопередачи в стеклопакетах // Соврем. мат. Фундам. направл. 2025. Т. 71, № 2. С. 221–232. <http://doi.org/10.22363/2413-3639-2025-71-2-221-232>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение — это рациональное использование ресурсов через технически и экономически обоснованные решения. В России цель энергополитики — эффективное использование ресурсов для устойчивого развития экономики и улучшения жизни населения (энергетическая стратегия РФ до 2035 года). Основную роль играют энергосберегающие технологии, минимизирующие тепловые потери. Особое значение имеет строительство энергоэффективных зданий. К главным задачам строителей можно отнести улучшение теплотехнических характеристик материалов, модернизацию оконных конструкций и повышение общей энергоэффективности зданий [2].

Обзор существующих научных работ, посвященных оконным блокам, показывает неоднозначность и неполноту имеющихся данных. Несмотря на значительный интерес к этой теме, отсутствует единый стандарт оценки эффективности и методологии исследований. Это создает определенные трудности при сравнении результатов различных исследований и формулировании общих выводов. В работе [1] авторами показано, что инертные газы (аргон, криптон) в сочетании с теплоотражающими покрытиями значительно снижают теплопотери в стеклопакетах за счёт уменьшения конвективных и лучистых тепловых потоков. Исследования [5, 6] демонстрируют, что окна с электроподогревом могут сократить теплопотери до 50%, но только при поддержании температуры стекла близкой к комнатной. Повышение температуры стекла вызывает обратный эффект вследствие интенсификации конвективного теплообмена, обусловленной существенным температурным градиентом. Исследование [7] показало, что электрический обогрев окон может снижать теплопотери и улучшать комфорт, но его эффективность сильно зависит от конструкции окна, наружной температуры и ветра. В оптимальных условиях (например, при  $-10^{\circ}\text{C}$ ) система может работать с высоким КПД ( $\sim 70\%$ ), но в реальности её энергоэффективность может быть ниже из-за потерь. Авторы отмечают, что в некоторых случаях улучшение теплоизоляции окна экономичнее, чем его обогрев.

Для оценки теплоизоляционных свойств оконных профилей применяют различные методы от упрощенных расчетов (ISO 2003, ISO 15099:2003(E)) до сложного численного моделирования. Оптимизация оконных конструкций требует комплексного подхода, сочетающего натурные эксперименты и численное моделирование.

## 2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе проводится подробный анализ процесса теплопередачи в составной конструкции теплоизоляционного окна, состоящего из однокамерного стеклопакета, установленного во внешней створке (4M1-16-4M1), и двухкамерного стеклопакета, который размещен во внутренней створке (4M1-14-4M1-14-4M1). Между этими стеклопакетами предусмотрен воздушный зазор 200 мм. Формула остекления, используемая в данном исследовании, представляется в следующем виде: 4M1-16-4M1-200-4M1-14-4M1-14-4M1.

Главным элементом любого современного окна, изготовлено оно из дерева, пластика или алюминия, является стеклопакет. Его характеристики оказывают решающее влияние на свойства всего оконного блока, так как стеклопакет составляет от 68% до 85% площади окна. Стеклопакет представляет собой светопрозрачную конструкцию, состоящую из двух или более стеклянных полотен, разделённых дистанционными рамками, оснащёнными абсорбентом для поглощения избыточной влаги [4]. Стекла герметично соединены между собой, образуя замкнутые камеры, которые могут быть заполнены либо осушенным воздухом, либо инертными газами, такими как аргон, ксенон или криптон. Наполнение инертными газами пространства между стеклами используется для повышения теплоизоляционных свойств стеклопакета. Сравнительно небольшой коэффициент теплопроводности таких сред способствует более высокому термическому сопротивлению всего окна.

На первом этапе исследования была смоделирована теплопередача внутри однокамерного стеклопакета, где межстекольное пространство заполнялось осушенным воздухом и инертными газами (рис. 1).

Однокамерные стеклопакеты, заполненные обычным воздухом или осушенным воздухом и не имеющие энергосберегающего покрытия (например, низкоэмиссионного), обладают низкими теплоизоляционными свойствами. Такие конструкции пропускают значительное количество тепла, что делает их менее эффективными по сравнению с двухкамерными стеклопакетами или стеклопакетами с энергосберегающими покрытиями.

На втором этапе исследования проводилось численное исследование процесса передачи тепла в конструкции двухкамерного стеклопакета с дальнейшим анализом распределения температуры по толщине однокамерного и двухкамерного стеклопакетов. Двухкамерный стеклопакет с формулой остекления 4M1-14-4M1-14-4M1, состоит из трех стеклянных панелей толщиной 4 мм, между которыми находятся две воздушные камеры шириной 14 мм, заполненные осушенным воздухом или инертными газами.

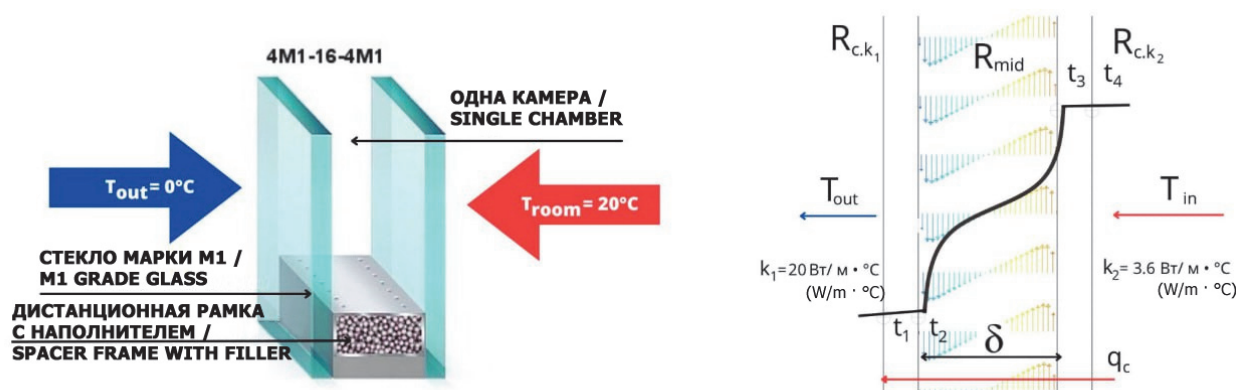


РИС. 1. Геометрия и модель конвективного теплообмена в однокамерном стеклопакете.

FIG. 1. Geometry and model of convective heat exchange in a single-chamber glass unit.



РИС. 2. Теплозвукоизоляционное окно с воздухообменным клапаном: (а) — общий вид; (б) — 2D-сечение;  $L = 0,264$  м;  $H = 1,470$  м.

FIG. 2. Heat and sound insulating window with air exchange valve: (a) — general view; (b) — 2D section;  $L = 0.264$  m;  $H = 1.470$  m.

На третьем этапе с помощью численного и компьютерного моделирования исследовался процесс теплопередачи в теплозвукоизоляционном окне в отдельных переплетах, состоящем из многослойной конструкции, основанной на формуле остекления 4M1-16-4M1-200-4M1-14-4M1-14-4M1. Такие конструкции способствуют значительному снижению теплопотерь, обеспечивают высокий уровень звукоизоляции. Использование тепло- и звукоизоляционных окон позволяет достигать высоких показателей энергоэффективности зданий [3]. Геометрия расчетного 2D-домена составной конструкции окна и габаритные параметры представлены на рис. 2.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим слоистую структуру конструкции двухкамерного стеклопакета (4M1-14-4M1-14-4M1): 1-й слой (стекло марки М1) —  $l_1 = 0,004$  м; 2-й слой (осушенный воздух) —  $l_2 = 0,016$  м; 3-й слой (стекло марки М1) —  $l_3 = 0,004$  м; 4-й слой (осушенный воздух) —  $l_4 = 0,016$  м; 5-й слой (стекло марки М1) —  $l_5 = 0,004$  м.

Система дифференциальных уравнений в частных производных, совместно с начально-краевыми условиями для описания физического процесса (передача тепла теплопроводностью), протекающего в двухкамерном стеклопакете, представляется в виде:

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), \quad L_{i-1} < x < L_i, \quad 0 < y < H; \quad i \in \overline{1, 5},$$

где  $L_0 = 0, L_5 = L = 0,264$  м,  $H = 1,470$  м,  $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_5 = 1,15$  (Вт/м · °С);  $\rho_1 = \rho_3 = \rho_5 = 2560$  (кг/м<sup>3</sup>);  $C_{\rho_1} = C_{\rho_3} = C_{\rho_5} = 670$  (Дж/кг · °С) — параметры стекла марки М1;  $\lambda_2 = \lambda_4$ ,  $\rho_2 = \rho_4$ ,  $C_{\rho_2} = C_{\rho_4}$  — параметры воздуха или инертных газов, теплофизические характеристики которых представлены в таблице ниже.

ТАБ. 1. Теплофизические свойства газов

ТАБ. 1. Thermophysical properties of gases

| Наполнение / Filler                    | $\lambda$ , Вт/м · °С<br>$\lambda$ , W/m · °С | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup><br>$\rho$ , kg/m <sup>3</sup> | $C_\rho$ , Дж/кг · °С<br>$C_\rho$ , J/kg · °С | Молярный вес, кг/моль<br>Molar weight, kg/mol |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Воздух / Air                           | 0,0257                                        | 1,204                                                    | 1005                                          | 28,80                                         |
| Осушенный воздух /<br>Dehumidified air | 0,0251                                        | 1,184                                                    | 1012                                          | 28,97                                         |
| Аргон / Argon                          | 0,0177                                        | 1,636                                                    | 523                                           | 39,94                                         |
| Криптон / Krypton                      | 0,0093                                        | 3,430                                                    | 251                                           | 83,79                                         |
| Ксенон / Xenon                         | 0,0057                                        | 5,8                                                      | 159                                           | 131,29                                        |

В начальный момент времени в каждой точке расчетного домена принимается постоянное значение температуры  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . На левой и правой границах используются ГУ III рода с целью учета в математической постановке задачи конвективного теплообмена между стеклом и атмосферной средой, а также стеклом и комнатным воздухом соответственно:

$$x = 0 : \quad \lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = k_1 (T_1 - T_{out}), \quad t > 0,$$

$$x = L : \quad \lambda_5 \left( \frac{\partial T_5}{\partial x} \right) = k_2 (T_5 - T_{room}), \quad t > 0,$$

где  $k_1 = 20$  (Вт/м · °С) — коэффициент теплообмена между стеклом и воздухом из атмосферы,  $T_1$  — температура поверхности левого стекла двухкамерного стеклопакета,  $T_{out} = 0^\circ\text{C}$  — температура воздуха атмосферы,  $k_2 = 3,6$  (Вт/м · °С) — коэффициент теплообмена между стеклом и комнатным воздухом,  $T_5$  — температура поверхности правого стекла двухкамерного стеклопакета,  $T_{room} = 20^\circ\text{C}$  — температура комнатного воздуха. Две горизонтальные границы являются адиабатическими (ГУ II рода):

$$y = 0 : \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad t > 0,$$

$$y = H : \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad t > 0.$$

Граничные условия IV рода действуют в зоне контакта стекла и межстекольного пространства, заполненного воздухом или инертными газами:

$$\begin{cases} \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=L_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=L_i}, \\ T_i(t, L_i) = T_{i+1}(t, L_i), \end{cases} \quad i \in \overline{1, 4}.$$

Для однокамерного стеклопакета математическая постановка задачи для слоистой структуры конструкции при  $i \in \overline{1, 3}$  выглядит аналогичным образом. Численное моделирование распространения тепла теплопроводностью в пятислойной конструкции двухкамерного стеклопакета проводится с помощью метода конечных разностей (МКР) на равномерной сетке ( $h_x = h_y = \text{const} = 0,0001$  м) с использованием явной разностной схемы, который реализован на языке программирования C++.

Для учета свободно-конвективного течения в газонаполненных камерах стеклопакета построено 2D-сечение расчетного домена в ПО Gambit (препроцессор для построения геометрии домена и конечно-элементной сетки), а также проведены численные эксперименты с помощью пакета вычислительной гидрогазодинамики ANSYS Fluent [9]. В случае конвективного теплопереноса в двухкамерном стеклопакете тепловой поток представляется в виде:

$$q_c = \frac{T_{room} - T_{out}}{R_c},$$

где известно  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  и требуется рассчитать составляющие общего термического сопротивления конвективного теплообмена  $R_c$  для формулы 4M1-14-4M1-14-4M1:

$$R_c = \frac{1}{k_1} + \frac{\delta_{4M1}}{\lambda_1} + \frac{1}{k_{12}} + \frac{\delta_{4M1}}{\lambda_3} + \frac{1}{k_{34}} + \frac{\delta_{4M1}}{\lambda_5} + \frac{1}{k_2},$$

где термическое сопротивление слоев стекла марки M1 известно и является постоянным:

$$\frac{\delta_{4M1}}{\lambda_1} = \frac{\delta_{4M1}}{\lambda_3} = \frac{\delta_{4M1}}{\lambda_5} = \frac{0,004}{1,15} = 0,0035 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт)}$$

Сопротивления теплопередачи пристеночных слоев воздуха (со стороны жилой комнаты и окружающей среды) также являются постоянными:  $R_{c.k_1} = \frac{1}{k_1} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт)}$ ,  $R_{c.k_2} = \frac{1}{k_2} = \frac{1}{3,6} = 0,278 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт)}$ . Выражения для неизвестных членов  $R_{c.k_{12}}$ ,  $R_{c.k_{34}}$  конвективного тепло-

обмена через две газонаполненные камеры можно записать:  $R_{k_{12}} = \frac{1}{Nu_{12}} \cdot \frac{\delta_{12}}{\lambda_2}$ ,  $R_{k_{34}} = \frac{1}{Nu_{34}} \cdot \frac{\delta_{34}}{\lambda_4}$ ,

где величины числа Нуссельта  $Nu_{12} = \frac{k_{12}\delta_{12}}{\lambda_2}$ ,  $Nu_{34} = \frac{k_{34}\delta_{34}}{\lambda_4}$  зависят от нескольких ключевых факторов: толщины газовой прослойки  $\delta_{12}$  и  $\delta_{34}$ , температурного перепада между стеклянными поверхностями  $\Delta T_{12}$  и  $\Delta T_{34}$ , физических характеристик используемого газового наполнителя. Рассмотрим воздействие некоторых из этих параметров на общее термическое сопротивление  $R_c$  в отдельности.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами проведена серия расчетов для однокамерного и двухкамерного стеклопакетов, наполненных воздухом и инертными газами. Учтено влияние теплофизических свойств газов и толщин газовых прослоек на общее термическое сопротивление конструкций стеклопакетов.

**4.1. Особенности свободно-конвективного теплообмена через газонаполненные камеры однокамерного и двухкамерного стеклопакетов.** В таб. 2 приведены численные результаты, полученные с помощью реализованного на C++ МКР и результаты, полученные с помощью ПО ANSYS Fluent для 2D-случая, показывающие, что в однокамерных стеклопакетах с толщиной дистанционной рамки до  $\delta = 10$  мм ввиду вязкости используемых газов практически отсутствует конвективный поток в газонаполненных камерах. Передача тепла осуществляется в большей степени за счет теплопроводности ( $R_{c.t}$  — передача тепла теплопроводностью, МКР;  $R_{c.tc}$  — передача тепла теплопроводностью и конвекцией, ANSYS Fluent) при использовании воздуха, осушенного воздуха, аргона, криптона и ксенона.

В рамках сопряженной задачи (передача тепла теплопроводностью в стеклянных полотнах и свободно-конвективный теплообмен в газонаполненной камере) для однокамерного стеклопакета было проведено численное моделирование с использованием различных наполнителей при переменной толщине газонаполненной камеры. В качестве данных для верификации были использованы результаты авторов, представленные в работе [8] для воздуха, аргона и криптона в качестве наполнителей. Отметим хорошую согласованность полученных результатов (см. [8, Tab. 1-2]).

Анализ зависимости  $R_{c.mid}$ , члена термического сопротивления конвективного теплообмена в газонаполненной камере однокамерного стеклопакета (рис. 1), от ширины дистанционной рамки  $\delta$  при различном межстекольном наполнении показал, что увеличение  $\delta$  до 14–16 мм (воздух, осушенный воздух, аргон), до 10–12 мм (криптон, ксенон) приводит к заметному росту термического

ТАБ. 2. Зависимость теплового сопротивления однокамерного стеклопакета от толщины газовой камеры при постоянном температурном перепаде  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ .ТАБ. 2. Dependence of thermal resistance of a single-chamber glass unit on the thickness of the gas chamber at a constant temperature difference  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ .

| Наполнение / Filler                    | $\delta$ , мм<br>$\delta$ , mm | $R_{c,t}$ , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$<br>$R_{c,t}$ , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ | $R_{c,tc}$ , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$<br>$R_{c,tc}$ , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ | $\Delta$ , %<br>$\Delta$ , % |
|----------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Воздух / Air                           | 6                              | 0,233                                                                                                             | 0,232                                                                                                               | 0,43                         |
| Воздух / Air                           | 8                              | 0,311                                                                                                             | 0,311                                                                                                               | 0                            |
| Воздух / Air                           | 10                             | 0,388                                                                                                             | 0,386                                                                                                               | 0,52                         |
| Осушенный воздух /<br>Dehumidified air | 6                              | 0,238                                                                                                             | 0,237                                                                                                               | 0,42                         |
| Осушенный воздух /<br>Dehumidified air | 8                              | 0,319                                                                                                             | 0,318                                                                                                               | 0,31                         |
| Осушенный воздух /<br>Dehumidified air | 10                             | 0,398                                                                                                             | 0,395                                                                                                               | 0,75                         |
| Аргон / Argon                          | 6                              | 0,338                                                                                                             | 0,338                                                                                                               | 0                            |
| Аргон / Argon                          | 8                              | 0,452                                                                                                             | 0,451                                                                                                               | 0,22                         |
| Аргон / Argon                          | 10                             | 0,564                                                                                                             | 0,559                                                                                                               | 0,87                         |
| Криптон / Krypton                      | 6                              | 0,645                                                                                                             | 0,641                                                                                                               | 0,62                         |
| Криптон / Krypton                      | 8                              | 0,861                                                                                                             | 0,842                                                                                                               | 2,2                          |
| Криптон / Krypton                      | 10                             | 1,075                                                                                                             | 1,013                                                                                                               | 5,77                         |
| Ксенон / Xenon                         | 6                              | 1,052                                                                                                             | 1,033                                                                                                               | 1,81                         |
| Ксенон / Xenon                         | 8                              | 1,4                                                                                                               | 1,317                                                                                                               | 5,93                         |
| Ксенон / Xenon                         | 10                             | 1,754                                                                                                             | 1,498                                                                                                               | 14,6                         |

ТАБ. 3. Основные характеристики сопряженного теплообмена через однокамерный стеклопакет с расстоянием между стеклами  $\delta = 16$  мм (см. рис. 1).ТАБ. 3. Main characteristics of conjugate heat exchange through a single-chamber glass unit with a distance between the glasses  $\delta = 16$  mm (see Fig. 1).

| Наполнение /<br>Filler                       | $ \Delta T $ , $^\circ\text{C}$<br>$ \Delta T $ , $^\circ\text{C}$ | $t_1$ , $^\circ\text{C}$<br>$t_1$ , $^\circ\text{C}$ | $t_2$ , $^\circ\text{C}$<br>$t_2$ , $^\circ\text{C}$ | $t_3$ , $^\circ\text{C}$<br>$t_3$ , $^\circ\text{C}$ | $t_4$ , $^\circ\text{C}$<br>$t_4$ , $^\circ\text{C}$ | $R_c$ , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$<br>$R_c$ , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ | $q_c$ , $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$<br>$q_c$ , $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ | $R_{c,mid}$<br>$R_{c,mid}$ |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Воздух / Air                                 | 20                                                                 | 1,044                                                | 1,113                                                | 14,071                                               | 14,183                                               | 0,911                                                                                                     | 21,942                                                                                                | 0,576                      |
| Осушенный<br>воздух /<br>Dehumidified<br>air | 20                                                                 | 1,051                                                | 1,121                                                | 14,054                                               | 14,165                                               | 0,945                                                                                                     | 21,146                                                                                                | 0,610                      |
| Аргон / Argon                                | 20                                                                 | 0,804                                                | 0,857                                                | 15,369                                               | 15,47                                                | 1,139                                                                                                     | 17,552                                                                                                | 0,804                      |
| Криптон /<br>Krypton                         | 20                                                                 | 0,574                                                | 0,611                                                | 16,509                                               | 16,605                                               | 1,401                                                                                                     | 14,270                                                                                                | 1,066                      |
| Ксенон /<br>Xenon                            | 20                                                                 | 0,623                                                | 0,666                                                | 17,074                                               | 17,175                                               | 1,691                                                                                                     | 11,823                                                                                                | 1,356                      |

сопротивления, после чего дальнейшее увеличение толщины уже не приводит к значительному улучшению теплоизоляционных свойств стеклопакета (рис. 3).

Использование ксенона и криптона в качестве наполнителей для стеклопакетов демонстрирует более высокую энергоэффективность по сравнению с аргонном. Однако их применение ограничено из-за значительной стоимости и сложности технологических процессов, связанных с заполнением камер. Благодаря оптимальному сочетанию энергоэффективности и доступности, аргон является наиболее распространённым газовым наполнителем среди инертных газов.

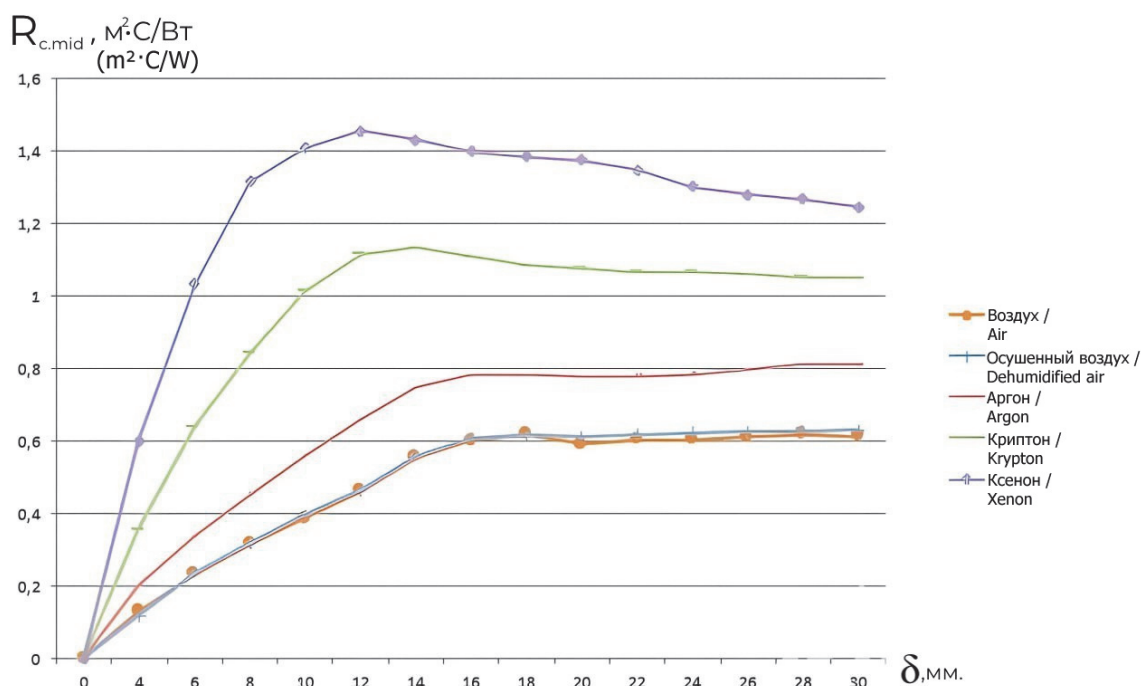


Рис. 3. Влияние физических свойств газа на зависимость термического сопротивления газонаполненной камеры  $R_{c,mid}$  от межстекольного расстояния  $\delta$ .

FIG. 3. The influence of physical properties of a gas on the dependence of thermal resistance of a gas-filled chamber  $R_{c,mid}$  on the inter-glass distance  $\delta$ .

Аналогичным образом проводится численный анализ для двухкамерных стеклопакетов с различными газовыми наполнителями (воздух и инертные газы). При моделировании приняты следующие допущения: равная толщина всех газовых камер, идентичный состав газового наполнителя в камерах, температура внутренней среды  $T_{room} = +20^\circ\text{C}$ , температура наружного воздуха  $T_{out} = 0^\circ\text{C}$ . Модель движения среды внутри газонаполненных камер двухкамерного стеклопакета, а также точки контроля температуры изображены на рис. 4.

В таб. 4 приведены основные характеристики конвективного теплообмена через двухкамерный стеклопакет с расстоянием между стеклами  $\delta = 16$  мм. Отметим также хорошую согласованность полученных результатов с результатами авторов, представленными в [8, Tab. 3].

Как видно из полученных данных, двухкамерные стеклопакеты демонстрируют на 39–50% более высокое термическое сопротивление  $R_c$  по сравнению с однокамерными при одинаковом газовом наполнении. Замена воздуха на инертные газы значительно улучшает теплоизоляцию. Например, аргон снижает тепловой поток  $q_c$  на 20% для однокамерного и на 25% для двухкамерного стеклопакета. Температура точек контроля ( $t_1, t_2$ ) на поверхности левого стекла у двухкамерных конструкций на  $0,3\text{--}0,45^\circ\text{C}$  ниже, чем у однокамерных, что свидетельствует о лучшей изоляции. Температура в точках контроля ( $t_3, t_4$ ) на поверхности крайнего правого стекла при использовании инертных газов выше на  $1,5\text{--}2,5^\circ\text{C}$ , что снижает риск образования конденсата. Наименьшие потери тепла зафиксированы у двухкамерного стеклопакета с ксеноном: 5,861 против 21,942 у однокамерного с воздухом (разница в 3,7 раза). Можно дать следующие практические рекомендации: для климата с холодными зимами оптимальны двухкамерные конструкции с криптоном или ксеноном, но в большинстве случаев достаточно аргонового заполнения, которое улучшает показатели на 20–25% относительно воздуха. Выбор стеклопакета с инертными газами и увеличенным числом камер существенно повышает энергоэффективность оконных конструкций.

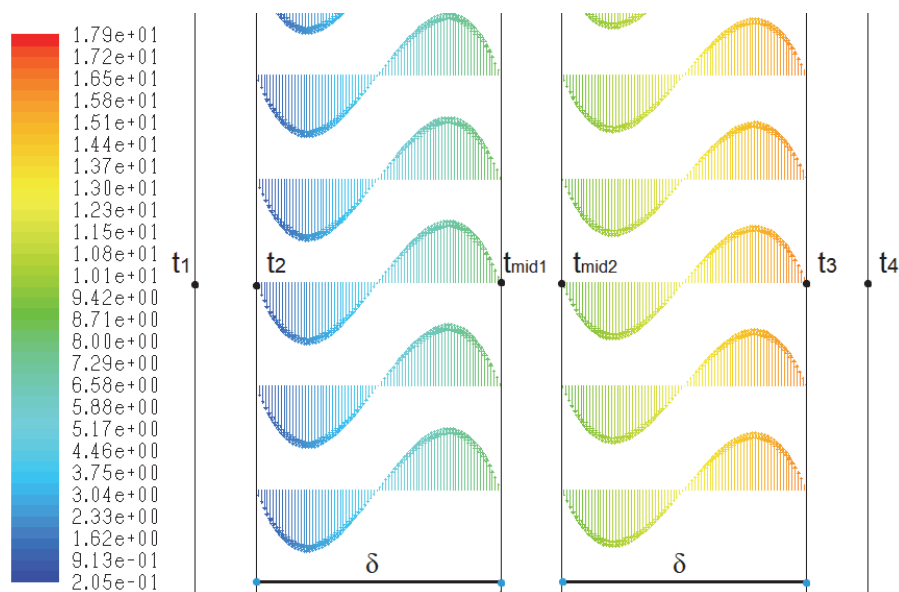


Рис. 4. Модель движения воздуха внутри газонаполненных камер двухкамерного стеклопакета.

FIG. 4. Model of air movement inside gas-filled chambers of a double-chamber glass unit.

ТАБ. 4. Основные характеристики сопряженного теплообмена через двухкамерный стеклопакет с расстоянием между стеклами  $\delta = 16$  мм.

ТАБ. 4. Main characteristics of conjugate heat exchange through a double-chamber glass unit with a distance between the glasses  $\delta = 16$  mm.

| Наполнение<br>/ Filler                         | $t_1, ^\circ\text{C}$<br>$t_1, ^\circ\text{C}$ | $t_2, ^\circ\text{C}$<br>$t_2, ^\circ\text{C}$ | $t_{mid1}, ^\circ\text{C}$<br>$t_{mid1}, ^\circ\text{C}$ | $t_{mid2}, ^\circ\text{C}$<br>$t_{mid2}, ^\circ\text{C}$ | $t_3, ^\circ\text{C}$<br>$t_3, ^\circ\text{C}$ | $t_4, ^\circ\text{C}$<br>$t_4, ^\circ\text{C}$ | $R_c, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$<br>$R_c, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ | $q_c, \text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$<br>$q_c, \text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Воздух/Air                                     | 0,632                                          | 0,673                                          | 8,509                                                    | 8,602                                                    | 16,42                                          | 16,487                                         | 1,5                                                                                                 | 13,329                                                                                          |
| Осушенный<br>воздух /<br>Dehumidi-<br>fied air | 0,620                                          | 0,661                                          | 8,535                                                    | 8,627                                                    | 16,485                                         | 16,551                                         | 1,524                                                                                               | 13,123                                                                                          |
| Аргон/<br>Argon                                | 0,465                                          | 0,496                                          | 8,887                                                    | 8,972                                                    | 17,35                                          | 17,407                                         | 2,001                                                                                               | 9,991                                                                                           |
| Криптон/<br>Krypton                            | 0,295                                          | 0,314                                          | 8,948                                                    | 9,055                                                    | 18,087                                         | 18,156                                         | 2,686                                                                                               | 7,444                                                                                           |
| Ксенон/<br>Xenon                               | 0,202                                          | 0,215                                          | 9,361                                                    | 9,443                                                    | 18,626                                         | 18,698                                         | 3,412                                                                                               | 5,861                                                                                           |

**4.2. Свободно-конвективный теплообмен в составной конструкции тепловозвукоизоляционного окна.** На третьей стадии исследования был изучен процесс теплопередачи в конструкции тепловозвукоизоляционного окна с установленными в нем однокамерным и двухкамерным стеклопакетами, имеющего сложную слоистую структуру по схеме 4M1-16-4M1-200-4M1-14-4M1-14-4M1. Распределение температуры в 2D сечении расчетного домена представлено на рис. 5.

Составная конструкция тепловозвукоизоляционного окна демонстрирует на 32–43% более высокое общее термическое сопротивление  $R_c$  по сравнению с обычным двухкамерным стеклопакетом при всех типах газового наполнения. Это делает конструкцию с воздушным зазором 200 мм более предпочтительным выбором для энергоэффективного строительства, особенно в условиях северных регионов.



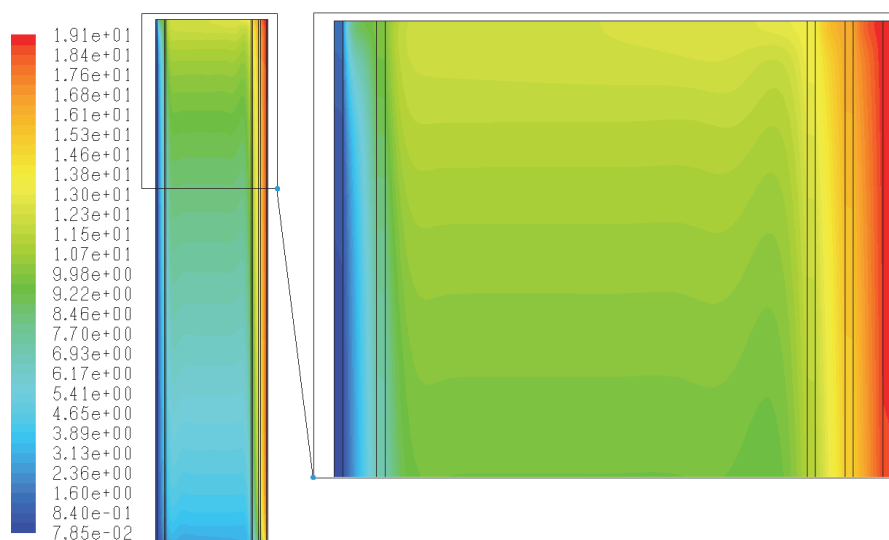


Рис. 5. Распределение температуры в 2D-сечении теплозвукоизоляционного окна с наполнением однокамерного и двухкамерного стеклопакетов аргоном.

FIG. 5. Temperature distribution in a 2D section of a heat and sound insulating window with single-chamber and double-chamber glass units filled with argon.

ТАБ. 5. Основные характеристики теплообмена через составную конструкцию теплозвукоизоляционного окна по формуле остекления 4M1-16-4M1-200-4M1-14-4M1-14-4M1;  $(t_1, t_2)$  — точки контроля на поверхности крайнего правого стекла,  $(t_3, t_4)$  — точки контроля на поверхности крайнего правого стекла со стороны жилой комнаты.

ТАБ. 5. Main characteristics of heat exchange through the composite structure of heat and sound insulating window according to glazing formula 4M1-16-4M1-200-4M1-14-4M1-14-4M1;  $(t_1, t_2)$  are the control points on the surface of the extreme right glass,  $(t_3, t_4)$  are the control points on the surface of the extreme right glass from the living room side.

| Наполнение /<br>Filler                 | $t_1, ^\circ\text{C}$<br>$t_1, ^\circ\text{C}$ | $t_2, ^\circ\text{C}$<br>$t_2, ^\circ\text{C}$ | $t_3, ^\circ\text{C}$<br>$t_3, ^\circ\text{C}$ | $t_4, ^\circ\text{C}$<br>$t_4, ^\circ\text{C}$ | $R_c, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$<br>$R_c, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ | $q_c, \text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$<br>$q_c, \text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Воздух / Air                           | 0,518                                          | 0,553                                          | 17,254                                         | 17,311                                         | 2,22                                                                                                | 9,009                                                                                           |
| Осушенный воздух /<br>Dehumidified air | 0,487                                          | 0,52                                           | 17,383                                         | 17,425                                         | 2,218                                                                                               | 9,015                                                                                           |
| Аргон / Argon                          | 0,261                                          | 0,278                                          | 18,392                                         | 18,427                                         | 3,35                                                                                                | 5,969                                                                                           |
| Криптон / Krypton                      | 0,142                                          | 0,151                                          | 19,024                                         | 19,054                                         | 4,776                                                                                               | 4,188                                                                                           |
| Ксенон / Xenon                         | 0,126                                          | 0,134                                          | 19,205                                         | 19,234                                         | 5,753                                                                                               | 3,476                                                                                           |

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе исследование представляет собой комплексный анализ теплопередачи в современных стеклопакетах с использованием методов численного и компьютерного моделирования. Суть работы заключается в разработке математической модели, учитывающей слоистую структуру оконных конструкций, переменную толщину газонаполненных камер и различные типы газовых наполнителей. Авторам удалось установить критические значения толщины газовых прослоек: 14–16 мм для воздуха и аргона, и 10–12 мм для криптона и ксенона, при которых достигается максимальное термическое сопротивление. Особый интерес представляет обнаруженный эффект насыщения — дальнейшее увеличение толщины за этими пределами не дает существенного улучшения теплоизоляционных свойств стеклопакетов.

Выявлена зависимость температурного распределения от типа газового наполнителя в межстекольном пространстве. Использование инертных газов не только снижает теплопотери, но и изменяет температурный профиль стеклопакета: наружные поверхности становятся на 0,3–0,45°C холоднее (что свидетельствует о лучшей изоляции), а внутренние — на 1,5–2,5°C теплее, существенно уменьшая риск образования конденсата. Сформулированы рекомендации по выбору конструкции стеклопакета. Для умеренного климата оптимальны двухкамерные стеклопакеты с аргоном, обеспечивающие улучшение теплоизоляции на 20–25% по сравнению с воздушным заполнением. В северных регионах предпочтительны составные конструкции, демонстрирующие на 32–43% более высокое термическое сопротивление по сравнению с обычными двухкамерными решениями. Разработанная методика исследования, сочетающая математическое и CFD-моделирование, имеет важное значение для проектирования энергосберегающих зданий, и может служить инструментом для оценки энергоэффективности оконных конструкций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гныря А. И., Низовцев М. И., Петров Е. В., Терехов В. И. Термическое сопротивление заполнений оконных блоков// Изв. вузов. Строительство. — 1998. — № 11-12. — С. 90.
2. Иванова Е. А. Теплоперенос в теплонапряженных элементах многослойных ограждающих конструкций// Дисс. к.ф.-м.н. — Томск: ТГАСУ, 2023. — URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:001009126>.
3. Овсянников С. Н., Самохвалов А. С. Окна в раздельных переплетах с высокой теплозвукоизоляцией// Строит. матер. — 2012. — № 6. — С. 42-43.
4. ГОСТ 24866-2014. Стеклопакеты клееные. Технические условия// Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200120572> (дата обращения: 27.06.2025).
5. Basok B., Pavlenko A., Novikov V., Koshlak H., Ciosek A., Moroz M. Comprehensive investigation of the thermal performance of an electrically heated double-glazed window: a theoretical and experimental approach// Energies. — 2024. — 17. — С. 4491. — DOI: 10.3390/en17174491.
6. Kabore M., Michaux G., Le D. J., Salagnac P., Greffet R. Parametric study of the thermal performance of a single-family house equipped with an airflow window integrating a heated glazing// В сб.: «Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Rome, Italy, 2–4 September 2019». — Рим, 2019. — DOI: 10.26868/25222708.2019.211049
7. Kurnitski J., Jokisalo J., Palonen J., Jokiranta K., Seppnen O. Efficiency of electrically heated windows// Energy Build. — 2004. — 36. — С. 1003–1010. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.06.007.
8. Maiorov V. A. Heat transfer through a double-glazed window by convection// IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engrg. — 2020. — 939. — 012049. — DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012049.
9. ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide// ENEAGRID Projects Web Pages [электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm) (дата обращения: 27.06.2025).

Е. И. Гурина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
E-mail: [elena.gyrina@mail.tsu.ru](mailto:elena.gyrina@mail.tsu.ru)

П. А. Сомова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
E-mail: [polina.somova01@yandex.ru](mailto:polina.somova01@yandex.ru)

UDC 519.6, 532.5

DOI: 10.22363/2413-3639-2025-71-2-221-232

EDN: MOCMQH

## Numerical and computer modeling for assessing heat transfer in double-glazed windows

E. I. Gurina and P. A. Somova

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

**Abstract.** In this study, we analyze the heat transfer of single-chamber and double-chamber glass units installed in the outer and inner sashes of a composite window unit with the inter-glass space filled with dehumidified air and inert gases. We construct the mathematical model based on the solution of the heat conductivity equation with constant coefficients in a two-dimensional setting, taking into account the layered structure of the structure and using boundary conditions of the III and IV kind. Our numerical implementation of the problem uses the finite difference method on a uniform grid using the C++ programming language. To take into account convective heat exchange through glass units, we perform a series of numerical calculations in ANSYS Fluent software. We show that convective heat loss in glass units can be reduced by increasing the thickness of the spacer frame and using inert gases with low thermal conductivity. We identify the optimal thickness of the gas-filled chamber of a single-chamber glass unit (when filled with air, dry air, argon, krypton, xenon), ensuring maximum thermal resistance.

**Keywords:** heat transfer, double glazed window, heat conduction equation, numerical solution, finite difference method.

**Conflict-of-interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgments and funding.** The authors declare no financial support.

**For citation:** E. I. Gurina, P. A. Somova, “Numerical and computer modeling for assessing heat transfer in double-glazed windows,” *Sovrem. Mat. Fundam. Napravl.*, 2025, vol. **71**, No. 2, 221–232. <http://doi.org/10.22363/2413-3639-2025-71-2-221-232>

## REFERENCES

1. A. I. Gnyrya, M. I. Nizovtsev, E. V. Petrov, and V. I. Terekhov, “Termicheskoe soprotivlenie zapolneniy okonnykh blokov” [Thermal resistance of window block fillings], *Izv. vuzov. Stroitel'stvo* [Bull. Higher Edu. Inst. Ser. Constr.], 1998, No. 11-12, 90 (in Russian).
2. E. A. Ivanova, “Teploperenos v teplonapryazhennykh elementakh mnogosloynnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy” [Heat transfer in heat-stressed elements of multilayer enclosing structures], PhD Thesis, TGASU, Tomsk, 2023, URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:001009126>.
3. S. N. Ovsyannikov and A. S. Samokhvalov, “Okna v razdel'nykh perepletakh s vysokoy teplozvukoizolyatsiey” [Windows in separate frames with high heat and sound insulation], *Stroitel. mater.* [Constr. Mater.], 2012, No. 6, 42-43 (in Russian).
4. “GOST 24866-2014. Steklopakety kleenye. Tekhnicheskie usloviya” [GOST 24866-2014. Glued glass units. Technical conditions], *Electronic Fund of Legal and Regulatory Documents*. Available online: <https://docs.cntd.ru/document/1200120572>, accessed on June 27, 2025 (in Russian).



5. B. Basok, A. Pavlenko, V. Novikov, H. Koshlak, A. Ciosek, and M. Moroz, “Comprehensive investigation of the thermal performance of an electrically heated double-glazed window: a theoretical and experimental approach,” *Energies*, 2024, **17**, 4491, DOI: 10.3390/en17174491.
6. M. Kabore, G. Michaux, D. J. Le, P. Salagnac, and R. Greffet, “Parametric study of the thermal performance of a single-family house equipped with an airflow window integrating a heated glazing,” In: *Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Rome, Italy, 2–4 September 2019*, Rome, 2019, DOI: 10.26868/25222708.2019.211049
7. J. Kurnitski, J. Jokisalo, J. Palonen, K. Jokiranta, and O. Seppnen, “Efficiency of electrically heated windows,” *Energy Build.*, 2004, **36**, 1003–1010, DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.06.007.
8. V. A. Maiorov, “Heat transfer through a double-glazed window by convection,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engng.*, 2020, **939**, 012049, DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012049.
9. “ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide,” *ENEAGRID Projects Web Pages*. Available online: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm), accessed on June 27, 2025.

E. I. Gurina

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: [elena.gyrina@mail.tsu.ru](mailto:elena.gyrina@mail.tsu.ru)

P. A. Somova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: [polina.somova01@yandex.ru](mailto:polina.somova01@yandex.ru)