

УДК 536.24 : 536.33 : 697.133

Басок Б.И., Давыденко Б.В., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Недбайло А.Н.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ГАЗОВОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОДНОКАМЕРНОГО СТЕКЛОПАКЕТА

Методом чисельного моделювання досліджено теплоперенос через однокамерний склопакет, що наповнений повітрям. Одержано залежність термічного опору склопакета від відстані між стеклами. Знайдено значення товщини газового прошарку, за якого термічний опір буде максимальним.

Методом численного моделирования исследован теплоперенос через однокамерный стеклопакет, заполненный воздухом. Получена зависимость термического сопротивления стеклопакета от расстояния между стеклами. Найдено значение толщины газовой прослойки, при котором термическое сопротивление максимально.

The numerical method is used to investigate the heat transfer through an air-filled single-chamber windows. The dependence of the thermal resistance on the distance between the glass panes is investigated. The thickness of the gas layer when the thermal resistance has maximum value was found.

B – толщина стеклопакета, м;
 b_1 – толщина стекол, м;
 b_2 – толщина газовой прослойки, м;
 C – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
 c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²К⁴);
 $dx; dy$ – шаги разностной сетки по координатам x и y соответственно, м;
 F_{i,i_1} – средняя взаимная поверхность облучения элементов поверхностей, м²;
 g – ускорение силы тяжести, м/с²;
 H – высота стеклопакета, м;
 i, j – номера шагов разностной сетки;
 L – ширина стеклопакета, м;
 m – количество шагов разностной сетки по вертикальной координате;
 p – давление, Па;
 R – термическое сопротивление, м² К/Вт;
 Q – тепловой поток, Вт;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 T – абсолютная температура, К;

t – температура, °С;
 u, v – проекции вектора скорости на оси Ox и Oy прямоугольной системы координат, м/с;
 x, z – горизонтальные прямоугольные координаты, м;
 y – вертикальная координата, м;
 β – температурный коэффициент объемного расширения газовой среды, 1/К;
 ε – степень черноты поверхности;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³.

Нижние индексы:

0 – левое (холодное) стекло;
 1 – правое (нагретое) стекло;
 $г$ – газ;
 $к$ – конвективный;
 $л$ – лучистый;
 $н$ – наружный;
 $с$ – стекло;
 w – поверхность.

Среди мероприятий по повышению энергоэффективности существующих сооружений важная роль отводится увеличению теплоизоляционной способности оконных конструкций, поскольку именно на окна приходится до 40 % (а иногда и более) общих теплопотерь. Основными механизмами теплопереноса через оконные конструкции являются: теплопроводность

через стекла, конвекция в газовой среде, заполняющей пространство между стеклами, и лучистый теплоперенос между внутренними поверхностями стекол. Поэтому уменьшение теплопередачи через оконные конструкции может быть достигнуто путем повышения термического сопротивления стекол и газовой прослойки между стеклами, а также путем сни-

жения уровня лучистого теплопереноса. Снижение конвективной составляющей теплового потока может быть достигнуто как за счет изменения расстояния между стеклами, так и путем замены воздушного содержимого прослойки между стеклами инертным газом (например, аргоном). Уменьшение радиационной составляющей осуществляется нанесением специальных селективных покрытий на внутренние поверхности стекол. Для определения степени влияния перечисленных факторов на изменение термического сопротивления оконных конструкций проводится численное моделирование теплопереноса через однокамерный стеклопакет при заданных на его поверхностях значениях температур.

Задача теплопереноса через стеклопакет высотой H , шириной L и толщиной B считается стационарной и решается в двумерной постановке. Толщина стекол – b_1 , расстояние между ними – b_2 . Движение газовой среды внутри стеклопакета и теплоперенос в газовой среде описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v_r \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0); \quad (3)$$

$$C_r \rho_r \left(\frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} \right) = \lambda_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

Теплоперенос в оконных стеклах описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (5)$$

Граничные условия для задачи теплопереноса записываются в виде:

$$x = 0: T = T_0; \quad x = B: T = T_1; \quad (T_1 > T_0); \quad (6)$$

$$y = 0; \quad H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

На поверхностях стекол, а также при $y = 0$ и $y = H$ составляющие скорости v и u принимаются равными нулю. На внутренних поверхностях стекол задаются условия четвертого рода, учитывающие наличие лучистых тепловых потоков

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_1} = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_1} - q_{л,0}; \quad (8)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_1+b_2} - q_{л,1} = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_1+b_2}, \quad (9)$$

где $q_{л,0}$ – плотность лучистого теплового потока, падающего на внутреннюю поверхность левого (холодного) стекла; $q_{л,1}$ – плотность лучистого теплового потока на внутренней поверхности правого (нагретого) стекла.

Задача (1) – (5) с граничными условиями (6) – (9) решается методом контрольного объема [1]. Конечно-разностная аппроксимация уравнений (1) – (4), описывающих движение газовой среды и конвективный теплоперенос в расчетной области $b_1 \leq x \leq b_1 + b_2$; $0 \leq y \leq H$, выполняется на разнесенной разностной сетке [2] и имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{dx_j} + \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{dy_i} = 0; \\ & \frac{u_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2} - u_{i,j-1/2} u_{i,j-1/2}}{dx_{j+1/2}} + \\ & + \frac{v_{i,j+1/2} u_{i+1/2,j} - v_{i-1,j+1/2} u_{i-1/2,j}}{dy_i} = \\ & = -\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\rho dx_{j+1/2}} + \\ & + v \frac{(u_{i,j+1} - u_{i,j}) / dx_{j+1} - (u_{i,j} - u_{i,j-1}) / dx_j}{dx_{j+1/2}} + \\ & + v \frac{(u_{i+1,j} - u_{i,j}) / dy_{i+1/2} - (u_{i,j} - u_{i-1,j}) / dy_{i-1/2}}{dy_i}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{u_{i+1/2,j} v_{i,j+1/2} - u_{i+1/2,j-1} v_{i,j-1/2}}{dx_j} + \\
 & + \frac{v_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j} - v_{i-1/2,j} v_{i-1/2,j}}{dy_{i+1/2}} = \\
 & = -\frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\rho dy_{i+1/2}} + \\
 & + v \frac{(v_{i,j+1} - v_{i,j}) / dx_{j+1/2} - (v_{i,j} - v_{i,j-1}) / dx_{j-1/2}}{dx_j} + \\
 & + v \frac{(v_{i+1,j} - v_{i,j}) / dy_{i+1} - (v_{i,j} - v_{i-1,j}) / dy_i}{dy_{i+1/2}} + \\
 & + g\beta(T_{i+1/2,j} - T_0); \\
 & C_r \rho_r \left(\frac{u_{i,j} T_{i,j+1/2} - u_{i,j-1} T_{i,j-1/2}}{dx_j} + \frac{v_{i,j} T_{i+1/2,j} - v_{i-1,j} T_{i-1/2,j}}{dy_i} \right) = \\
 & = \lambda_r \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) / dx_{j+1/2} - (T_{i,j} - T_{i,j-1}) / dx_{j-1/2}}{dx_j} + \\
 & + \lambda_r \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) / dy_{i+1/2} - (T_{i,j} - T_{i-1,j}) / dy_{i-1/2}}{dy_i}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Уравнение теплопроводности (5) в конечных разностях имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) / dx_{j+1/2} - (T_{i,j} - T_{i,j-1}) / dx_{j-1/2}}{dx_j} + \\
 & + \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) / dy_{i+1/2} - (T_{i,j} - T_{i-1,j}) / dy_{i-1/2}}{dy_i} = 0. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Особенность разнесенной разностной сетки состоит в том, что узлы, в которых задаются составляющие вектора скорости, располагаются на противоположных гранях контрольного объема, а узлы, относящиеся к сеточным функциям давления и температуры – в центре контрольного объема. Вследствие этого в представленных разностных уравнениях присутствуют сеточные функции с дробными ин-

дексами, которые означают, что рассматриваемая величина относится к точке пространства, расположенной между узлами, в которых задаются соответствующие сеточные функции. Шаги сетки с дробными индексами рассчитываются, как среднее арифметическое длин двух соседних шагов.

В формах (10) и (11) записываются разностные уравнения энергии для газа и теплопроводности для стекла в контрольных объемах, не граничащих с поверхностями раздела сред. В граничных же контрольных объемах указанные разностные уравнения видоизменяются. Так, например, для контрольного объема, относящегося к правому стеклу и примыкающему к границе раздела сред, разностное уравнение теплопроводности представляется в виде

$$\begin{aligned}
 & \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) / dx_{j+1/2} - 2(T_{i,j} - T_{i,w1}) / dx_j}{dx_j} + \\
 & + \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) / dy_{i+1/2} - (T_{i,j} - T_{i-1,j}) / dy_{i-1/2}}{dy_i} = 0, \quad (12)
 \end{aligned}$$

где $T_{i,w1}$ – температура внутренней поверхности правого стекла.

В соседнем же контрольном объеме, относящемся к газовой среде, разностное уравнение энергии представляется в виде:

$$\begin{aligned}
 & C_r \rho_r \left(\frac{u_{i,j} T_{i,j+1/2} - u_{i,j-1} T_{i,j-1/2}}{dx_j} + \frac{v_{i,j} T_{i+1/2,j} - v_{i-1,j} T_{i-1/2,j}}{dy_i} \right) = \\
 & = \lambda_r \frac{2(T_{i,w1} - T_{i,j}) / dx_j - (T_{i,j} - T_{i,j-1}) / dx_{j-1/2}}{dx_j} + \\
 & + \lambda_r \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) / dy_{i+1/2} - (T_{i,j} - T_{i-1,j}) / dy_{i-1/2}}{dy_i}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Аналогичными по форме будут разностные уравнения теплопроводности и энергии для контрольных объемов, примыкающих к внутренней поверхности левого стекла. Температура на границе раздела сред в этом случае обозначается, как $T_{i,w0}$.

Для определения значений температур $T_{i,w1}$

и $T_{i,w0}$ на внутренних поверхностях стекол используются условия сопряжения (8) и (9), составленные с учетом лучистого теплообмена на поверхностях. Указанные условия в разностной форме имеют вид:

$$-\lambda_c \frac{T_{i,w0} - T_{i,j}}{0,5dx_j} = -\lambda_r \frac{T_{i,j+1} - T_{i,w0}}{0,5dx_{j+1}} - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 c_0}{dy_i L} \sum_{i_1=1}^m F_{i,i_1} \left[\left(\frac{T_{i_1,w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,w0}}{100} \right)^4 \right]. \quad (14)$$

$$-\lambda_r \frac{T_{i,w1} - T_{i,j-1}}{0,5dx_{j-1}} - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 c_0}{dy_i L} \sum_{i_1=1}^m F_{i,i_1} \left[\left(\frac{T_{i_1,w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,w0}}{100} \right)^4 \right] = -\lambda_c \frac{T_{i,j} - T_{i,w1}}{0,5dx_j}. \quad (15)$$

где F_{i,i_1} – значения средних взаимных поверхностей облучения элементов с номерами i и i_1 , расположенных на противоположащих внутренних поверхностях стекол, вычисляемые по формуле:

$$F_{i,i_1} = \frac{dy_i dy_{i_1} b_2^2}{\pi} \int_0^L \int_0^L \frac{dz_1 dz_2}{\left[b_2^2 + \left(\sum_{k=1}^i dy_k - \sum_{k=1}^{i_1} dy_k \right)^2 + (z_2 - z_1)^2 \right]^{3/2}}.$$

В рассмотренной постановке задачи лучистый теплообмен на торцевых поверхностях ($y = 0; H; z = 0; L$) не учитывается.

Решение представленной системы разностных уравнений решается методом матричной прогонки [3].

Для исследования влияния расстояния между стеклами (b_2) в стеклопакете на его термическое сопротивление, решение задачи теплопереноса выполняется для различных значений b_2 от 0,016 м до 0,028 м. При этом толщина стекол ($b_1 = 0,004$ м), высота ($H = 0,95$ м) и ширина ($L = 0,6$ м) стеклопакета остаются неизменными. Степень черноты поверхностей обоих стекол одинакова ($\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = 0,92$). Температуры наружных поверхностей стекол составляют: $T_0 = 273$ К (левое стекло); $T_1 = 293$ К (правое стекло). Рассматривается случай воздушного наполнения стеклопакета.

Полученная в результате решения картина течения газовой среды и распределение температуры в нижней части однокамерного стеклопакета представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что около левого (холодного) стекла имеет место опускное течение газа. В нижней части пространства между стеклами охлажденный поток разворачивается в сторону нагретого стекла. На этом участке, вследствие соприкосновения холодного газового потока с нагретой внутренней поверхностью

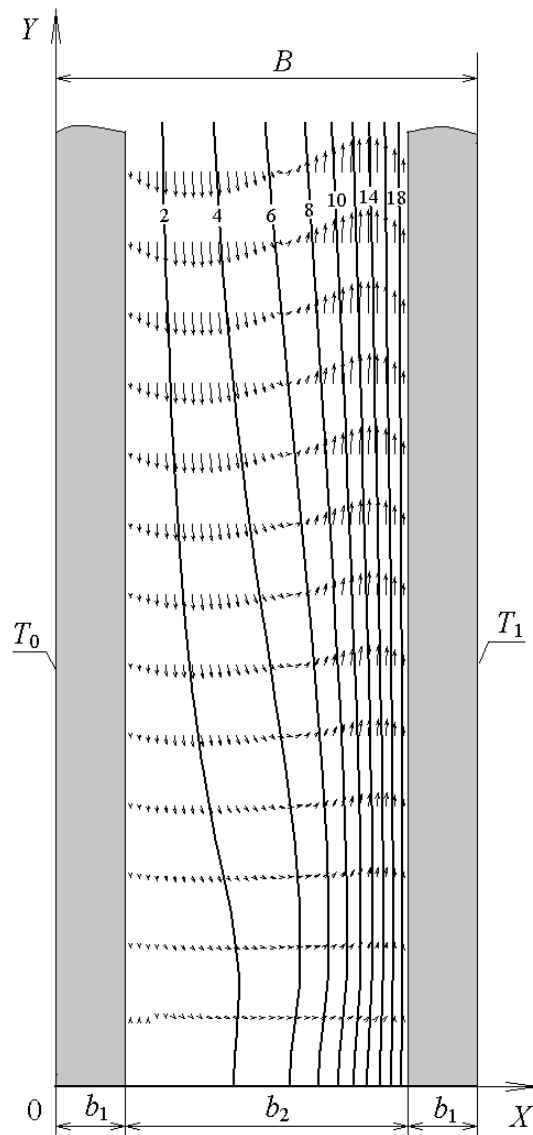


Рис. 1. Картина течения газовой среды и распределение температуры (°С) в газовой прослойке для $b_2 = 0,016$ м.

правого стекла, около указанной поверхности возникают максимально высокие градиенты температуры. У противоположной (холодной) поверхности левого стекла градиенты температуры – минимальны, так как холодный поток соприкасается с холодной поверхностью. Вследствие этого, в нижней части стеклопакета около нагретого стекла наблюдается максимальная плотность теплового потока, в то время, как около холодного стекла плотность теплового потока – минимальна (рис. 2).

Поднимаясь вверх и омывая поверхность правого стекла, газовый поток нагревается. В средней части стеклопакета градиенты температуры около поверхностей правого и левого стекол выравниваются. Распределение температуры по толщине газовой прослойки в средней части стеклопакета – практически линейно (рис. 3), а плотности теплового потока на поверхностях обоих стекол становятся одинаковыми (рис. 2). В верхней части стеклопакета разогретый около правого стекла газовый поток разворачивается в сторону левого (холодного) стекла, в результате чего градиенты температуры около левого стекла становятся максимальными, в то время как около нагретого правого – минимальными. Вследствие этого, в верхней части стеклопакета максимально высокая

плотность теплового потока наблюдается около левого холодного стекла, а минимальная – около правого нагретого (рис. 2). Таким образом, максимальное количество теплоты поступает в нижнюю часть правого стекла, а отводится из верхней части левого стекла. При этом, на верхнем и нижнем участках стеклопакета наблюдается наиболее высокая степень неравномерности распределения температуры по ширине газовой прослойки (рис. 3). Также из рис. 3 видно, что температура по толщине стекол изменяется незначительно, а распределение температуры по толщине стекла – практически линейно. Из этого следует, что в стеклах тепловой поток направлен преимущественно по нормали к поверхности (т.е. вдоль оси Ox), а тепловые потоки в вертикальном направлении достаточно малы.

Влияние расстояния между стеклами на интенсивность теплопереноса через стеклопакет оценивается по величинам конвективных Q_k и лучистых Q_d тепловых потоков на внутренних поверхностях стекол, тепловых потоков на наружных поверхностях стекол ($Q_n = Q_k + Q_d$) и термического сопротивления пакета $R = (T_1 - T_0) \cdot H \cdot L / Q_n$.

При увеличении расстояния между стеклами увеличивается термическое сопротивление

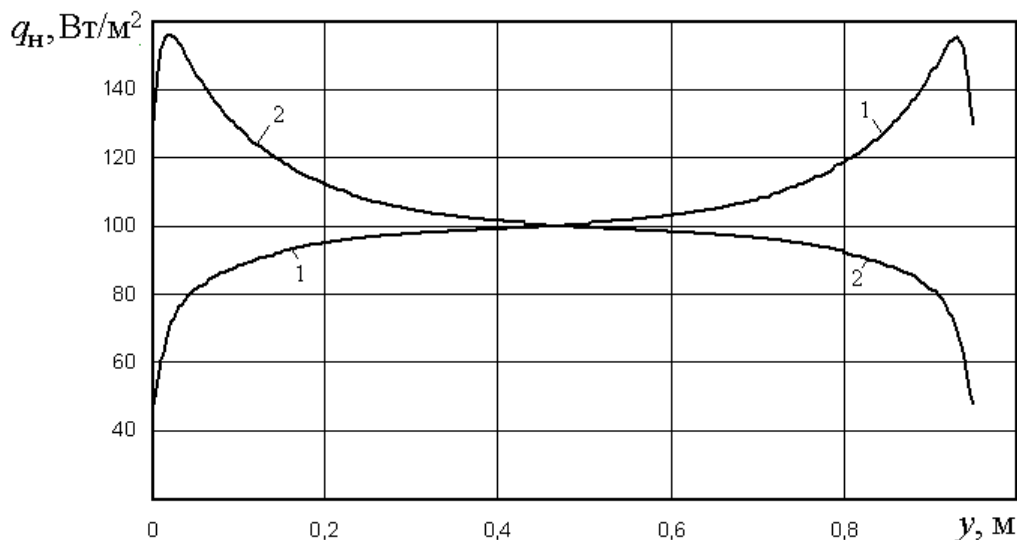


Рис. 2. Распределение по высоте стеклопакета ($b_2 = 0,02$ м) плотности теплового потока на наружных поверхностях стекол: 1 – левое холодное стекло; 2 – правое нагретое стекло.

теплопроводности газовой прослойки. Однако при этом, вследствие уменьшения гидродинамического сопротивления плоскопараллельного канала, представленного двумя вертикальными стеклами, интенсифицируется течение газовой среды и, как следствие, конвективный теплоперенос в газовой прослойке. В результате взаимодействия двух противоположно влияющих тенденций, суммарный конвективный тепловой поток на внутренних поверхностях стекол с увеличением расстояния между стеклами вначале уменьшается, а затем начинает

увеличиваться (рис. 4). При $b_2 \approx 0,021$ м конвективный поток достигает минимума ($Q_k \approx 17,78$ Вт).

Лучистый тепловой поток Q_l на внутренних поверхностях стекол при увеличении расстояния между ними монотонно уменьшается (от 44,93 Вт до 43,62 Вт), главным образом, за счет незначительного уменьшения угловых коэффициентов взаимного облучения, а также вследствие пренебрежения лучистым теплообменом на торцевых поверхностях.

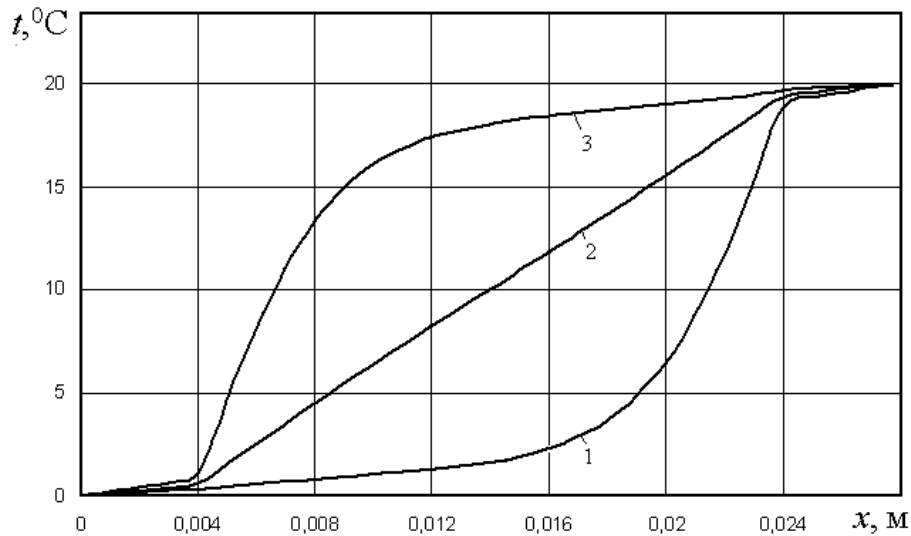


Рис. 3. Изменение температуры по ширине стеклопакета ($b_2 = 0,02$ м) в нижней (1), средней (2) и верхней (3) части стеклопакета.

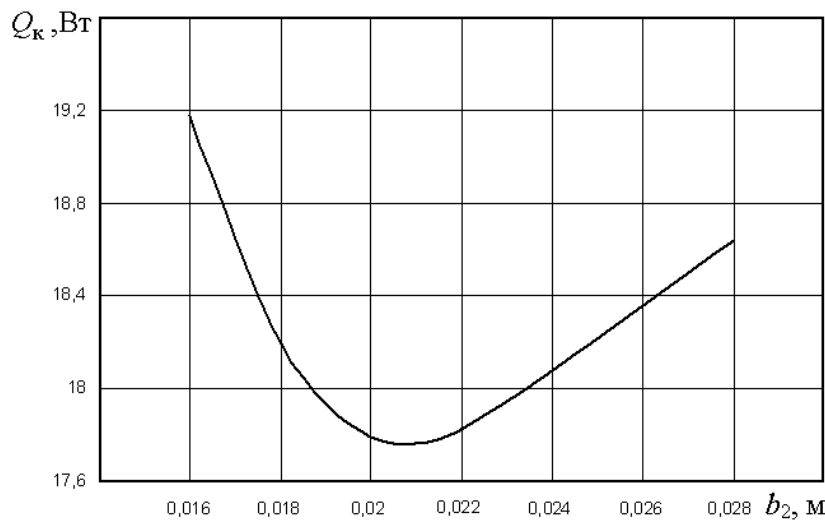


Рис. 4. Зависимость конвективного теплового потока в воздушной прослойке от ее ширины.

Зависимость теплового потока на наружных поверхностях стекол от расстояния между их внутренними поверхностями представлена на рис. 5.

Как видно из рисунка, в указанном диапазоне изменения расстояния между стеклами тепловой поток Q_n на их наружных поверхностях изменяется в пределах от 64,1 Вт до 62,15 Вт. При этом функция $Q_n(b_2)$ достигает минимума при $b_2 \approx 0,0225$ м.

Сравнивая величины Q_k , Q_l и Q_n , следует отметить, что конвективный тепловой поток

Q_k составляет не более 30 % от суммарного теплового потока Q_n . Вклад же лучистого потока составляет более 70 %.

Противоположным характеру изменения Q_n является характер изменения термического сопротивления R стеклопакета при увеличении расстояния между стеклами (рис. 6). Максимальное термическое сопротивление $R = 18,35$ м²К/Вт достигается при $b_2 \approx 0,0225$ м. В целом же, в исследуемом диапазоне изменения b_2 термическое сопротивление изменяется не более чем на 3 %.

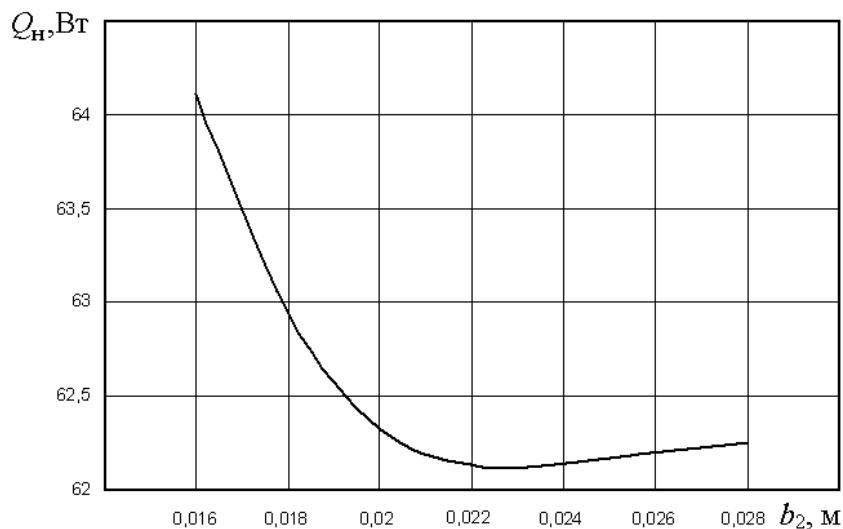


Рис. 5. Зависимость теплового потока на наружных поверхностях стекол от расстояния между их внутренними поверхностями.

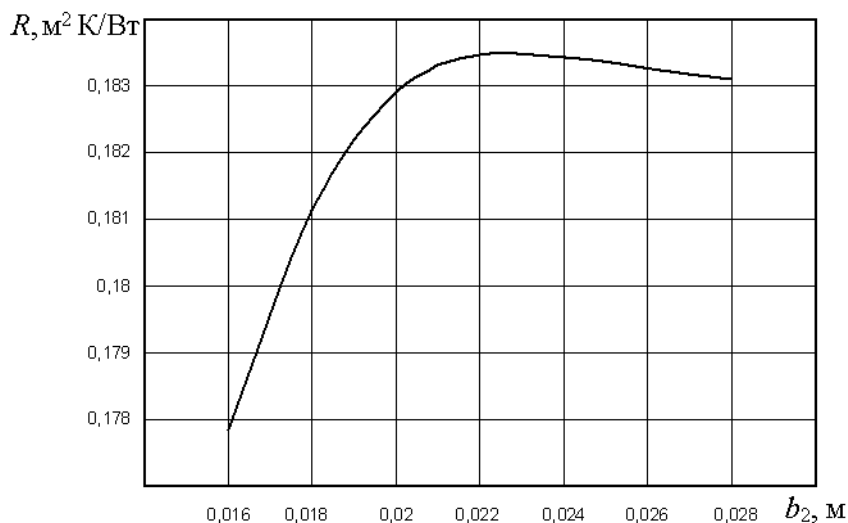


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления стеклопакета от ширины воздушной прослойки между стеклами.

Представленные результаты численных исследований качественно соответствуют результатам, рассмотренным в [4].

Выводы

1. В результате численного моделирования теплопереноса через однокамерный стеклопакет, наполненный воздухом, найдены зависимости характеристик данного процесса от расстояния между стеклами. Максимальное термическое сопротивление стеклопакета соответствует ширине воздушной прослойке, равной 0,0225 м.

2. Установлено, что при воздушном наполнении стеклопакета количество теплоты, переносимое конвекцией через воздушную прослойку, составляет не более 30 % от общего количества теплоты, переданной через стеклопакет. Основной же теплоперенос через стекло-

пакет происходит за счет лучистого теплообмена между внутренними поверхностями стекол.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

2. Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 352 с.

3. Давыденко Б.В. Метод матричной прогонки для решения сеточных уравнений гидродинамики // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 5/5(35). – С. 7-11.

4. Корепанов Е.В. Численное моделирование процесса теплопередачи через стеклопакеты с газовым наполнением // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2004, № 3. – С. 29-32.

Получено 16.12.2011 г.