

Б.И. Басок, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8935-4248  
 Б.В. Давыденко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-8738-7612  
 А.В. Тимошенко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6840-5491  
 С.М. Гончарук, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-5609-7337  
 Институт технической теплофизики НАН Украины

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ, ОБОГРЕВАЕМОГО ДВУМЯ ДВУХПАНЕЛЬНЫМИ РАДИАТОРАМИ

Представлены результаты расчетных исследований воздушно-температурного режима помещения, обогреваемого двухпанельными радиаторами в зимний период года. Исследуются особенности формирования воздушных потоков и температурных полей в помещении в зависимости от температуры радиаторов. Рассматривается помещение с двумя окнами и двумя радиаторами, установленными под окнами. Результаты получены путем численного решения системы уравнений турбулентного переноса импульса и энергии в воздушном потоке. На внутренних поверхностях помещения задаются граничные условия четвертого рода, учитывающие радиационно-конвективный теплообмен данных поверхностей с воздушной средой и радиаторами. По полученным данным построены распределения скорости и температуры в объеме помещения, а также распределения плотностей тепловых потоков по поверхности наружной стены. Из представленных результатов следует, что около наружной стены течение воздуха – опускное, а над радиатором – подъемное. В результате взаимодействия этих потоков в объеме помещения, обогреваемого двухпанельными радиаторами, образуются области циркуляционные течения воздушной среды. Вследствие этого формируется также распределение температуры в объеме помещения. Температура внутри помещения повышается в направлении от пола к потолку.

**Ключевые слова:** температурный режим, радиатор, численное моделирование, тепловой поток, радиационно-конвективный теплообмен.

### Введение

Формирование микроклимата в помещении в зимний период года происходит в результате взаимодействия аэродинамических и теплообменных процессов, которые сопровождают перенос теплоты от нагревательных приборов в окружающее пространство через ограждающие конструкции здания. Температурный режим в помещении зависит как от эффективности нагревательных приборов, так и от теплоизолирующих характеристик ограждающих конструкций [1]. В настоящее время в качестве нагревательных устройств часто используются однопанельные или двухпанельные радиаторы. От данных устройств теплота в помещение поступает естественной конвекцией и излучением. Лучистый тепловой поток поступает от радиатора на стены, пол и потолок. Теплота конвекцией передается непосредственно воздушной среде помещения [2]. Температура радиатора влияет не только на значение средней температуры, но и на распределение скорости конвективных потоков в помещении.

**Цель и задача** работы состоит в численном исследовании особенностей воздушно-температурного режима помещения, обогреваемого двумя двухпанельными радиаторами, и влияния температуры радиаторов на данный режим.

### Постановка задачи и результаты исследований

Особенности воздушно-температурного режима помещения, обогреваемого двухпанельными радиаторами, рассматриваются на примере комнаты с двумя окнами и двумя радиаторами, установленными под окнами. Высота помещения  $H=3$  м; длина  $L=5,6$  м; ширина  $B=6,3$  м. Толщина внешней бетонной стены  $0,24$  м. Внутренние стены, пол и потолок также выполнены из бетона. Толщина внутренних стен —  $0,12$  м. Окна в комнате - однокамерные. Толщина стекол  $3$  мм. Расстояние между стеклами  $60$  мм. Площади панелей радиаторов  $0,5$  м<sup>2</sup>. Ширина каждой панели  $10$  мм. Расстояние между панелями  $100$  мм. Температура панелей радиаторов  $t_p=50$  °С. Температура наружного воздуха  $t_{н}=-10$  °С. Со стороны внешней воздушной среды задается значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{н}=23$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Температурный режим помещения с одним окном и одним отопительным прибором рассматривался в [3].

Конвективное движение воздушной среды в помещении, возникающее за счет неравномерного распределения температуры, описывается системой уравнений динамики турбулентного течения совместно с уравнением энергии. Данная система дополняется уравнениями  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Температурное поле в ограждающих конструкциях описывается уравнением теплопроводности. На внутренних поверхностях помещения задаются граничные условия четвертого рода в виде.

$$-\lambda_w \left. \frac{\partial T}{\partial n_w} \right|_{w=0} = -\lambda_{air} \left. \frac{\partial T}{\partial n_w} \right|_{w=0} - \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_\delta} - 1} \int \left[ \left( \frac{T_\delta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos(\psi_{w-n_w}) \cdot \cos(\psi_{p-n_\delta})}{\pi r^2} dF_\delta$$

где  $r$  - расстояние между точкой на поверхности стены и точкой на поверхности радиатора,  $n_w$  - нормаль к поверхности стены,  $n_p$  - нормаль к поверхности радиатора;  $\psi_{w-n_w}$  - угол между радиусом-вектором, проведенным из точки на поверхности стены к точке на поверхности радиатора, и нормалью к поверхности стены;  $\psi_{p-n_p}$  - угол между радиусом-вектором, проведенным из точки на поверхности радиатора к точке на поверхности стены, и нормалью к поверхности радиатора;  $\varepsilon_w$ ;  $\varepsilon_p$  - степени черноты поверхностей стен и радиаторов, значения которых принимаются равными 0,8.

Представленное условие учитывает радиационный теплообмен на поверхностях стен. Предполагается, что радиационный тепловой поток поступает на внутренние поверхности помещения только со стороны радиатора. Радиационный теплообмен между самими поверхностями не учитывается. На поверхностях стекол однокамерного стеклопакета условия четвертого рода записываются в аналогичной форме. В этом случае данное выражение вместо температуры радиатора  $T_p$  будет содержать температуру поверхности противоположного стекла. Предполагается, что теплоперенос из данного помещения в соседние помещения отсутствует.

Система уравнений динамики и теплопереноса совместно с граничными условиями решается методом контрольного объема [4]. Результаты расчета полей скорости и температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в трех взаимно перпендикулярных сечениях помещения представлены на рис.1 - рис.3. Горизонтальное сечение А-А, параллельное полу, расположено от него на расстоянии 1,5 м (рис. 1). Вертикальное сечение В-В, параллельное боковым стенам, пересекает панели одного из радиаторов посередине (рис. 2). Вертикальное сечение С-С, параллельное наружной стене помещения, расположено на расстоянии 1,6 м от внутренней поверхности наружной стены (рис. 3).

Как видно из рис.1, на высоте  $z=1,5$  м от пола распределение температуры близко к равномерному ( $t \sim 22^{\circ}\text{C}$ ). Над радиаторами температура увеличивается до  $24^{\circ}\text{C}$ , а возле наружной стены понижается до  $16^{\circ}\text{C}$ .

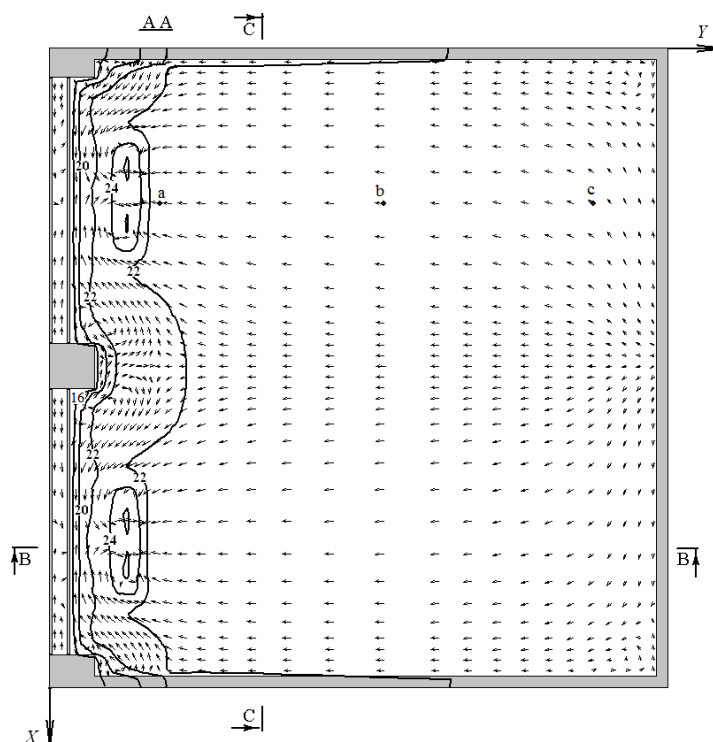


Рисунок 1 – Распределение скорости воздуха и температуры в горизонтальном сечении А-А

Из рис. 2 видно, что в верхней и нижней части помещения образуются два разнонаправленных циркуляционных течения. Около потолка циркуляция воздуха вызывается направленным вверх свободно конвективным потоком от радиатора. Около пола циркуляционное течение образуется за счет опускного течения воздуха около холодной наружной стены и окна. Указанный холодный поток распространяется на значительное расстояние от наружной стены вовнутрь помещения.

Направления воздушных потоков формируют распределение температуры по высоте помещения. Вследствие этого температура внутри помещения повышается в направлении от пола к потолку. Над полом температура изменяется от  $16^{\circ}\text{C}$  до  $20^{\circ}\text{C}$  и уменьшается по направлению к наружной стене. На высоте  $z=1,5$  м температура увеличивается до  $22^{\circ}\text{C}$ . В пространство под потолком поступает нагретый воздух от радиатора. Поэтому около потолка температура составляет  $24^{\circ}\text{C}$  (рисунки 2, 3). В горизонтальных сечениях помещения распределения температуры близки к равномерным (рис. 3).

В области воздушной прослойки между оконными стеклами также имеет место подъемно - опускное течение. Поскольку внутреннее стекло имеет более высокую температуру, чем наружное, у поверхности внутреннего стекла, обращенной вовнутрь камеры стеклопакета, течение воздуха - подъемное. У более холодной поверхности наружного стекла, обращенной вовнутрь камеры стеклопакета, течение воздуха - опускное (рис. 2).

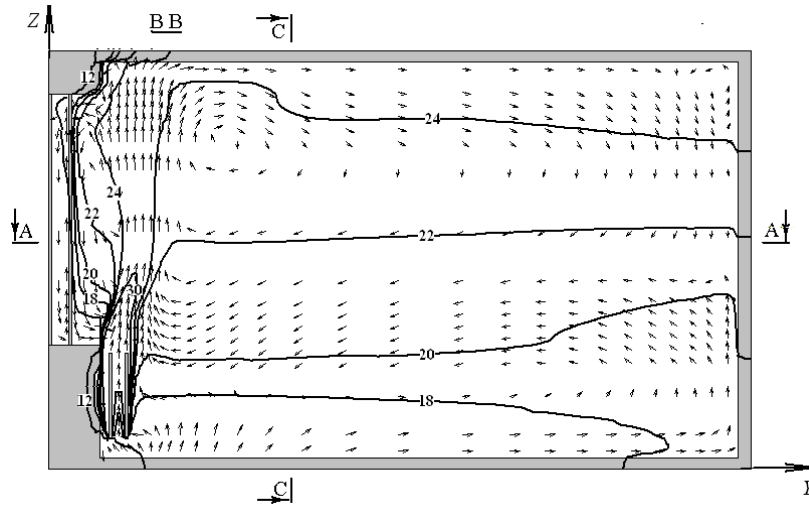


Рисунок 2 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении В-В при  $t_p = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$

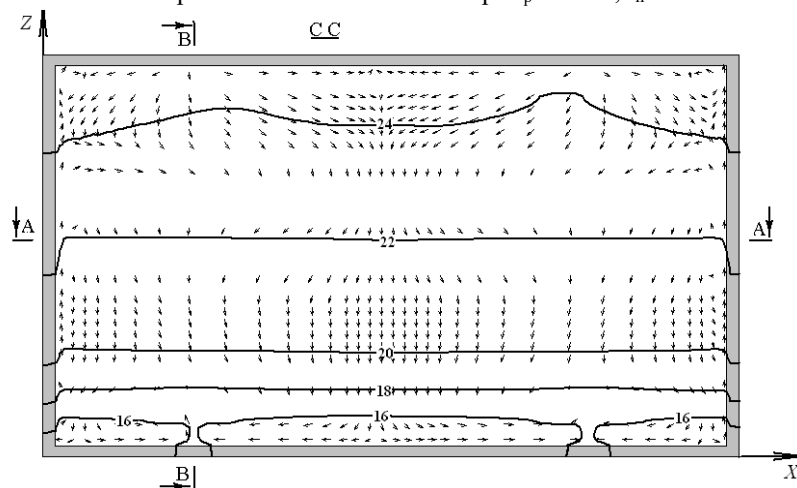


Рисунок 3 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении С-С при  $t_p = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$

Характерные особенности распределений по высоте помещения горизонтальной скорости  $u_y$  и температуры видны также из рис.4. Распределения скорости и температуры по высоте строятся по трем вертикальным линиям, расположение которых видны из рис.1. На этом рисунке точками *a*, *b*, и *c* указаны места, в которых строятся указанные распределения. Данные три точки лежат на плоскости, проходящей через середину радиатора. Как видно из рис. 4 а, максимальные положительные значения скорости  $u_y$  соответствуют нижней части вертикальной линии, проходящей через точку *a*. Эта линия располагается ближе всего к наружной стене и к окну, где происходит наиболее интенсивное опускное течение холодного воздуха. На этой же линии на расстоянии 0,2 м от пола наблюдается минимальное значение температуры  $t=14\text{ }^\circ\text{C}$ . На самом полу температура оказывается несколько выше ( $t=16\text{ }^\circ\text{C}$ ) из-за влияния лучистого теплового потока от радиатора. По мере удаления от наружной стены максимальные значения скорости течения воздуха над полом уменьшаются. Становятся также менее выраженными минимальные температуры над полом. С увеличением высоты  $z$  над полом значения температуры увеличиваются. Распределения температуры вдоль линий *a*, *b* и *c*, при  $z > 0,8$  м практически совпадают (рис. 4 б). На интервале  $0,6\text{ м} < z < 2,4\text{ м}$  наблюдается течение воздуха в обратном направлении ( $u_y < 0$ ). Данный характер распределения скорости по высоте соответствует наличию двух разнонаправленных вихревых потоков, о которых уже упоминалось выше.

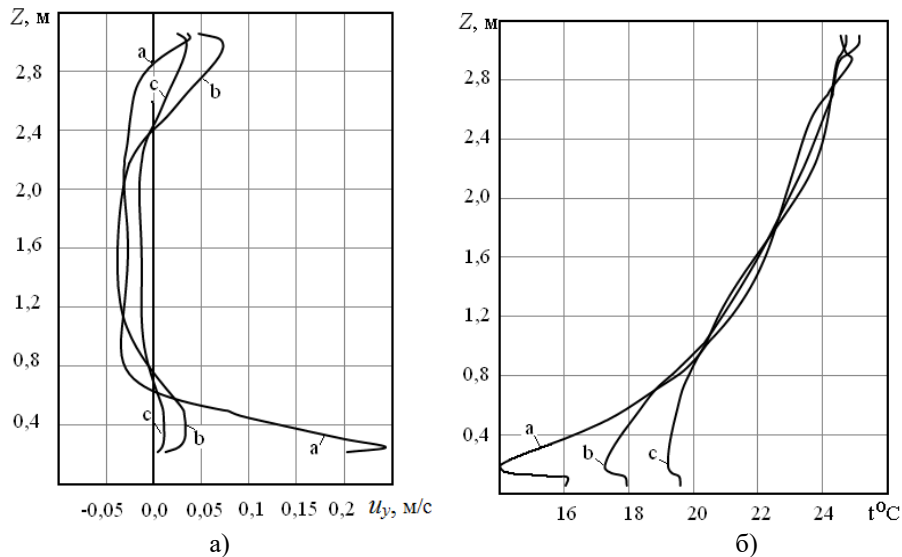


Рисунок 4 – Распределение горизонтальной скорости воздуха (а) и температуры (б) по высоте помещения

На рис.5 представлено распределение плотностей тепловых потоков по наружной поверхности внешней стены. Как видно из рисунка, под окнами в области расположения радиаторов плотности тепловых потоков превышают  $100 \text{ Вт/м}^2$ . На наружных поверхностях окон плотности тепловых потоков увеличиваются снизу вверх. В верхней части окна их значения превышают  $150 \text{ Вт/м}^2$ , а в нижней части окна они составляют  $50 \text{ Вт/м}^2$ . Данная особенность теплопереноса через окно объясняется наличием подъемных и опускающих течений в газовой прослойке между стеклами [5, 6]. Над окнами плотности тепловых потоков оказываются выше  $100 \text{ Вт/м}^2$ . Суммарные потери теплоты через наружную стену данного помещения составляют при этом  $Q=1835 \text{ Вт}$ .

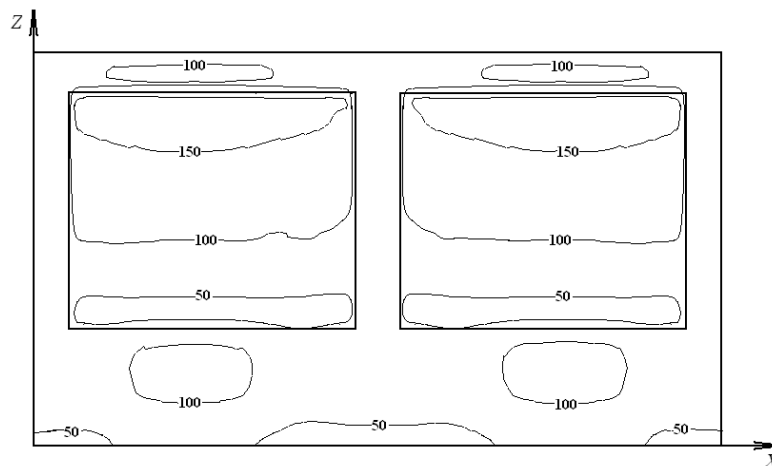


Рисунок 5 – Распределение плотностей тепловых ( $\text{Вт/м}^2$ ) потоков по наружной поверхности наружной стен

Для оценки теплового режима помещения и эффективности его обогрева двумя двухпанельными радиаторами определяется значение среднеобъемной температуры воздуха в помещении. Осреднение температуры производится в той части объема помещения, которая отстоит от наружной стены на расстоянии  $0,3 \text{ м}$ , т.е. в той части объема помещения, в которой обычно находятся люди. Для рассматриваемого случая, при котором  $t_p = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_n = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , средняя температура в помещении составляет  $t_{cp} = 21,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует нормативным условиям для зимнего периода.

При уменьшении температуры радиатора до  $t_p = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  при температуре наружного воздуха  $t_n = -10 \text{ }^\circ\text{C}$  температура в помещении значительно снижается. Результаты расчета распределения температуры и скорости внутри помещения при этих условиях представлены на рис. 6 и рис. 7. Как видно из данных рисунков, температура в верхней части помещения снижается при этом до  $t \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в нижней - до  $t \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Средняя температура в объеме помещения уменьшается до значения  $t_{cp} = 16,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , которое значительно ниже нормативного. Суммарный тепловой поток через наружную стену данного помещения составляет при этом  $Q=1376 \text{ Вт}$ .

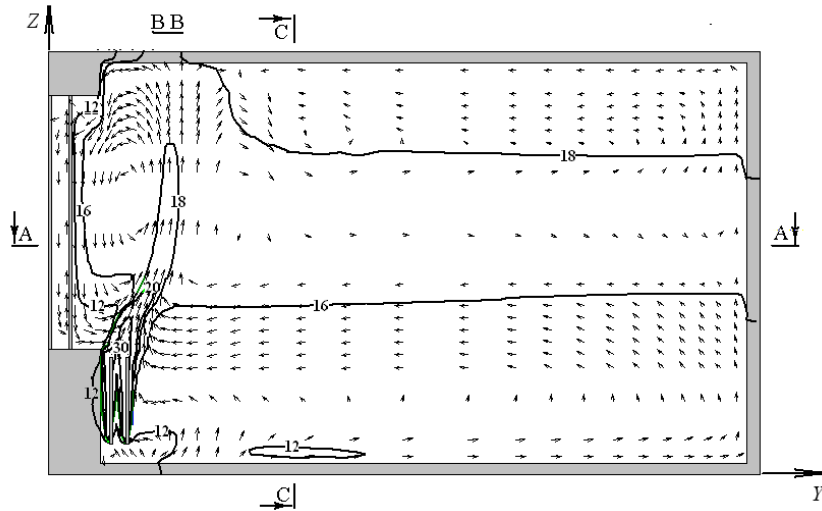


Рисунок 6 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении В-В при  $t_p = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$ .

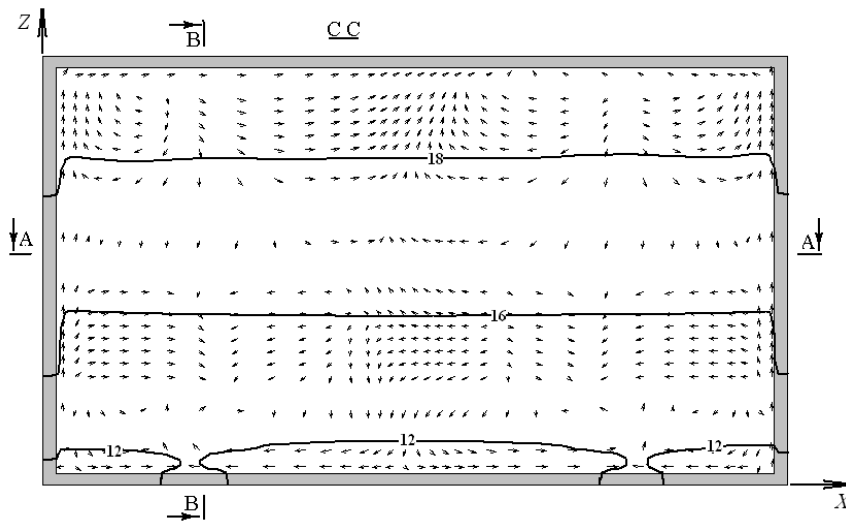


Рисунок 7 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении С-С при  $t_p = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$

### Выводы

Как следует из представленных результатов, при использовании в качестве отопительных приборов двухпанельных радиаторов, распределение температуры в объеме помещения оказывается неравномерным по высоте. Возле окна и наружной стены образуется поток охлажденного воздуха, направленный вниз. Около пола данный поток распространяется вглубь помещения. Вследствие этого, нижняя часть помещения оказывается переохлажденной. Нагретый от радиатора воздух направляется вверх к потолку. Таким образом, температура в помещении увеличивается в направлении от пола к потолку. При обеспечении в помещении нормативной среднеобъемной температуры (например,  $t_{cp} = 21\text{ }^\circ\text{C}$  при  $t_p = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ), область пространства помещения под потолком оказывается перегретой ( $t \sim 24\text{ }^\circ\text{C}$ ). В нижней же части помещения температура оказывается на 2...3  $^\circ\text{C}$  ниже, чем среднеобъемная температура воздуха.

Поскольку рассматриваемой помещение не имеет наружного утепления, а окна в помещении - однокамерные, уменьшение температуры радиатора до 40  $^\circ\text{C}$  приводит к значительному снижению среднеобъемной температуры воздуха, которая оказывается значительно ниже нормативной.

### Список использованной литературы

1. Басок Б. И. Температурный режим отапливаемого помещения. Приближенная теплофизическая модель / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, С. М. Гончарук, О. М. Лысенко // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т.35, № 4. – С. 23-30.
2. Басок Б.И. Моделивання тепловіддачі від двохпанельного радіатора / Б.І. Басок, Б.В. Давиденко, С.М. Гончарук, В.Г. Новиков // Будівельні конструкції. – 2013. – В. 77. – С. 60-64.

3. Басок Б.И. Численное моделирование температурного режима в помещении с двухпанельным радиатором / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, Г.Г. Фаренюк, С. М. Гончарук // Инженерно-физический журнал.- 2014.-Т.87, №6.- С. 1375 – 1379.

4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ Сухас Патанкар. - М., «Энергоатомиздат», 1984, 152 с.

5. Басок Б.И. Численное моделирование теплопереноса через двухкамерный стеклопакет/ Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.А. Исаев, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель // Инженерно-физический журнал.- 2016.- Т.89, № 5. - С. 1288-1295.

6. Басок Б. І. Експериментальні дослідження теплопередачі через енергоефективні склопакети з низькоемісйним м'яким покриттям / Б. І. Басок, Б. В. Давиденко, Л. М. Кужель, С. М. Гончарук, Т. Г. Беляєва.// Промислова теплотехніка.- 2017.- Т. 39, №1. - С.41–48.

**Б.І. Басок**, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0002-8935-4248

**Б.В. Давиденко**, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0001-8738-7612

**А.В. Тимошенко**, канд. техн. наук, **ORCID** 0000-0001-6840-5491

**С.М. Гончарук**, канд. техн. наук, **ORCID** 0000-0002-5609-7337

**Інститут технічної теплофізики НАН України**

### **ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРИМІЩЕННЯ, ЩО ОБІГРІВАЄТЬСЯ ДВОМА ДВОХПАНЕЛЬНИМИ РАДІАТОРАМИ**

*Представлені результати розрахункових досліджень повітряно-температурного режиму приміщення, що обігрівається двоохпанельний радіаторами в зимовий період року. Досліджуються особливості формування повітряних потоків і температурних полів в приміщенні в залежності від температури радіаторів. Розглядається приміщення з двома вікнами і двома радіаторами, встановленими під вікнами. Результати отримані шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь турбулентного перенесення імпульсу та енергії повітряним потоком. На внутрішніх поверхнях приміщення задаються граничні умови четвертого роду, що враховують радіаційно-конвекційний теплообмін даних поверхонь з повітряним середовищем і радіаторами. За отриманими даними побудовані розподілу швидкості і температури в об'ємі приміщення, а також розподіли густини теплових потоків по поверхні зовнішньої стіни. З наведених результатів випливає, що біля зовнішньої стіни рух повітря - опускний, а над радіаторами - підйомний. В результаті взаємодії цих потоків в об'ємі приміщення, що обігрівається двоохпанельними радіаторами, утворюються області циркуляційної течії повітряного середовища. Внаслідок цього формується також розподіл температури в об'ємі приміщення. Температура всередині приміщення підвищується в напрямку від підлоги до стелі.*

**Ключові слова:** температурний режим, радіатор, чисельне моделювання, тепловий потік, радіаційно-конвекційний теплообмін.

**B. Basok**, Doct. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0002-8935-4248

**B. Davydenko**, Doct. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0001-8738-7612

**A. Timoshchenko**, Cand. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0001-6840-5491

**S. Goncharuk**, Cand. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0002-5609-7337

**Institute of engineering thermophysics**

### **TEMPERATURE REGIME OF THE ROOM, HEATED BY TWO TWO-PANE RADIATORS**

*The results of computational studies of the air and temperature regime of a room heated by two-pane radiators in the winter period of the year are presented. The features of the air flow and temperature fields' formation in the room, depending on the temperature of the radiators, are researching. A room with two windows and two radiators installed under the windows is considered. The results were obtained by numerical solution of the system of equations for the turbulent transfer of momentum and energy in airflow. On the inner surfaces of the room the boundary conditions of the fourth kind, which taking into account the radiation - convective heat transfer of these surfaces with the air medium and radiators are set. According to the data obtained, the distribution of velocity and temperature in the volume of the room, as well as the distribution of the heat fluxes densities on the surface of the outer wall were constructed. From the presented results it follows that near the outer wall the air flow is downward, and above the radiator - upward. As a result of the interaction of these flows in the volume of the room, heated by two-pane radiators, areas of circulating air flow are formed. Also due to this temperature distribution is formed in the room area. Temperature inside the room increases from the floor to the ceiling.*

**Keywords:** temperature regime, radiator, numerical simulation, heat flux, radiation-convective heat transfer.

**References**

1. Basok B.I. Temperature Regime of the Heated Room. An Approximate Thermophysical Model / B.I. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk, O.N. Lysenko // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2013. – V. 35, № 4, P. 23–30.
2. Basok B.I. Modeling of Heat Transfer From a Two-Panel Radiator / B.I. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk, V.G. Novikov // *Building constructions.*- 2013.- Is. 77. – P 60-64.
3. Basok B. I. Computational Modeling of the Temperature Regime in a Room with a Two-Panel Radiator/ B. I. Basok, B. V. Davydenko, G. G. Farenuyk, S. M. Goncharuk // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal.* - 2014, V. 87, No 6, P. 1375 – 1379.
4. Patankar S. . Numerical Heat Transfer and Fluid Flow/ Suhas Patankar.-M.: Energoatomizdat, 1984, 152 p.
5. Basok B. I. Numerical Modeling of Heat Transfer Through a Triple-Pane Window/ B. I. Basok, B. V. Davydenko, S. A. Isaev, S. M. Goncharuk, L. N. Kuzhel'// *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal.*- 2016.- V. 89, No 5, P. 1288-1295
6. Basok B.I. Experimental Studies of Heat Energy Efficient Glass Units with Low Soft Surface/ B.I. Basok, B.V. Davydenko, L.M. Kuzhel, S.M. Goncharuk, T.G. Belyaeva // *Promyshlennaya teplotekhnika.*- 2017.- V. 39, No 1. - P.41–48.

Надійшла 15.02.2019  
Received 15.02.2019