

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ В ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ЗАДАННОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

Докт. техн. наук, проф. АКЕЛЬЕВ В. Д.,
канд. техн. наук, доц. ВОРОНОВА Н. П., асп. КОСТЕВИЧ М. Ф.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: tqv_73@tut.by

HEAT REGIME IN HEATED PREMISES WITH PLANNED CHANGES OF EXTERNAL AIR TEMPERATURE

AKELIEV V. D., VORONOVA N. P., KOSTEVICH M. F.

Belarusian National Technical University

Рассмотрен тепловой режим отапливаемых помещений, рассчитаны оптимальные размеры слоев ограждений, разработана математическая модель для анализа температуры воздуха в помещениях, теплоточков при произвольном характере тепловых воздействий, обосновано эффективное использование программного потребления теплоты в помещениях.

Ключевые слова: тепловой режим, отапливаемые помещения, температура наружного воздуха.

Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

The paper considers a heat regime in heated premises, contains information on calculation of optimum enclosure layer size, development of mathematical model for analysis of air temperature in the premises, heat flows when heat influence is of arbitrary character and substantiates efficient usage of , analyses mathematical model elaborated, effective use of programmable heat consumption.

Keywords: heat regime, heated premises, external air temperature.

Fig. 4. Tab. 2. Ref.: 11 titles.

Объекты, теплозащитный уровень которых ниже нормируемого, утепляются материалами на поверхностях, ограничивающих характерную конструкцию. Распространение получили тепло- и ресурсосберегающие экологические жилые системы, известные как экологическая жилая среда, в которых минимизированы теплотери, а потенциал экономичности достигает 40–50 % [1–3].

Тепло- и массоперенос в строительных конструкциях связан с их температурами поверхности, а аэродинамика структуры линий тока в замкнутых контурах определяется соотношениями их геометрических размеров. Конвективно-радиационные потоки взаимодействуют между собой, зависят от конфигураций поверхностей в пространствах, в них возникают циркуляционные контуры, зависящие от их теплофизических характеристик [4–6].

Теплотери при различных способах теплозащиты ограждающих конструкций, произвольно расположенных в пространстве, характеризуются числами Нуссельта, Рэлея, граничными и начальными условиями. Для снижения теплотери используются конструкции, в которых минимальны конвективные воздушные токи, так как их коэффициент теплопроводности $\lambda \sim 0,23 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

В Беларуси и России на отопление жилых, административных и производственных зданий используется энергоресурсов больше, чем в странах с аналогичными климатическими условиями [7]. В соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями к теплотехническому проектированию недопустимо образование конденсата на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, что подтверждено как нормативными документами, так и апробировано в США, Канаде и других странах.

В строительных сооружениях воздушное пространство между утеплителем и внешним слоем улучшает теплоизоляционные свойства стены вследствие экранирующего действия облицовки по отношению к радиационному тепловому потоку, при этом расчеты показывают, что для повышения теплозащиты зданий эффективно наружное утепление [1]. Одним из вариантов увеличения сопротивления теплопередаче терморемонтируемых объектов является наличие у наружных поверхностей ограждений замкнутых радиационно-конвективных воздушных контуров, в которых при вертикальном потоке теплоты схемы циркуляции воздуха имеют вид различных форм вращающихся ячеек при возникновении конвекции. У изотермических поверхностей движение воздуха происходит при наличии цилиндрических ячеек в зависимости от геометрических характеристик вертикальной поверхности при числах Рэлея, меньших 1700. Анализ теплопереноса в ограниченных контурах при вертикальных конвективных потоках показывает, что увеличение их характерных размеров приводит к росту числа Ra , являющегося определяющим в расчетах минимизации теплотерь.

В зависимости от конфигурации, ориентации ограждающих систем отапливаемых помещений и заданного изменения наружного воздуха процессы теплопереноса и аэродинамика потоков различны. До настоящего времени отсутствуют оптимальные решения задач тепло- и массозащиты ограждений, покрытий, светопрозрачных конструкций, приквартирных пространств и т. д. Решение проблемы повышения энергоэффективности зданий и сооружений на этапе их проектирования, строительства и эксплуатации актуально для Республики Беларусь.

Рассмотрим решение задачи теплообмена в помещениях с устройством ограждений, например в соответствии со схемой на рис. 1.

Конструкцию стены можно рассматривать как однослойную, рассчитав ее эквивалентные теплофизические характеристики. Для этого воспользуемся математической моделью теплообмена стены, включающей два и более слоев с различными теплофизическими свойствами. Процесс теплообмена в i -м слое характеризуется краевой задачей [8].

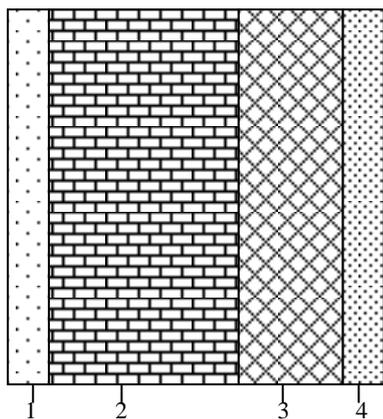


Рис. 1. Схема конструкции наружной стены здания: 1 – штукатурный слой; 2 – кирпичная кладка; 3 – слой утеплителя из поробетона; 4 – облицовка затиркой

Математической моделью считается система математических соотношений, описывающих процесс или явление, а операции по составлению и изучению таких моделей рассматриваются как математическое моделирование. Информационная модель – набор неких величин, которые содержат необходимую информацию об объекте, системе объектов, процессе или явлении.

При решении обратной задачи теплопроводности при известном распределении температур в наружной стене, например включающей четыре слоя, и нестационарном тепловом режиме получено $\lambda_{эк} = 2,32$ Вт/(м·К).

Тепловой баланс помещения можно представить уравнением [9]

$$V_C \frac{\partial T_B(\tau)}{\partial \tau} = -Fk[t_B(\tau) - t_H(\tau)] - c_n(\tau)[t_B(\tau) - t_H(\tau)] + Q_n(\tau) - \sum_{i=1}^m F_{H_i} \alpha_{H_{B_i}} [t_H(\tau) - t_{H_{C_i}}(\tau)] - \sum_{i=1}^{m_1} F_{B_i} \alpha_{B_i} [t_B(\tau) - t_{B_{C_i}}(\tau)], \quad (1)$$

где V – объем помещения; c – удельная объемная теплоемкость воздуха; $t_B(\tau)$ – средняя температура внутреннего воздуха в помещении; $t_H(\tau)$ – температура наружного воздуха; $t_{H_{C_i}}(\tau)$ – температура внутренних поверхностей i -го наружного слоя; $t_{B_{C_i}}(\tau)$ – температура поверхности i -го внутреннего слоя; $c_n(\tau)$ – коэффициент инфильтрации ($Q_n = Vnc'$); n – кратность воздухообмена; $Q_n(\tau)$ – количество теплоты, поступающей в помещение; Fk – площадь и коэффициент теплопередачи через светопрозрачные конструкции; F_{H_i} , F_{B_i} – площадь соответственно наружных и внутренних слоев; $\alpha_{H_{B_i}}$, α_{B_i} – коэффициент теплоотдачи i -го наружного и i -го внутреннего слоев; m , m_1 – число наружных и внутренних слоев.

Для анализа теплообмена в наружных слоях учитывали краевую задачу, полученную из общего вида для $n = 0$, когда:

$$\frac{\partial t_{H_i}(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{H_i} \frac{\partial^2 t_{H_i}(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad l_{H_{i-1}} \leq x \leq l_{H_i}; \quad i = 1, m; \quad l_{H_0} = 0; \quad (2)$$

$$-\lambda_{H_i} \frac{\partial t_{H_i}(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_{H_{B_i}} [t_B(\tau) - t_{H_i}(0, \tau)]; \quad (3)$$

$$\lambda_{H_i} \frac{\partial t_{H_i}(l_{H_m}, \tau)}{\partial x} = \alpha_{H_{0i}} [t_H(\tau) - t_{H_i}(l_{H_m}, \tau)]; \quad (4)$$

$$t_{H_i}(x, 0) = t_{H_i}(x), \quad (5)$$

где $t_{H_i}(x, \tau)$ – температура i -го наружного слоя; λ_{H_i} – коэффициент теплопроводности i -го наружного слоя; l_{H_i} – толщина i -го наружного слоя; $\alpha_{H_{0i}}$ – коэффициент теплоотдачи у i -го наружного слоя; a_{H_i} – коэффициент температуропроводности i -го наружного слоя.

Аналогичная система уравнений имеет место для внутренних слоев:

$$\frac{\partial t_{bi}(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{bi} \frac{\partial^2 t_{bi}(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad l_{bi-1} \leq x \leq l_{bi}; \quad i = 1, m_1; \quad l_0 = 0; \quad (6)$$

$$\lambda_{bi} \frac{\partial t_{bi}(l_{bm_1}, \tau)}{\partial x} = \alpha_{bi} [t_b(\tau) - t_{bi}(l_{bm_1}, \tau)]; \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_{bi}(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

$$t_{bi}(x, 0) = t_{bi}(x), \quad (9)$$

где $t_{bi}(x, \tau)$ – температура в i -м внутреннем слое.

Математическая модель разработана при следующих допущениях: температура воздуха стационарна в помещениях; поверхность слоя в любой момент времени изотермична; влажностный режим ограждений – стационарный; коэффициенты теплоотдачи в данном диапазоне температур постоянны; $Q_n(\tau) = \text{const}$; изменение $Q(\tau)$ и $t_n(\tau)$ принимается в соответствии с законами теплопереноса. Применим к решению задачи (1)–(9) конечно-разностный метод [10], допуская наличие двух однослойных внутренних и двух наружных стен, включающих четыре слоя, оптимальные толщины которых были рассчитаны в [11]. Значения параметров модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры математической модели

$F, \text{ м}^2$	$k, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$a_{n1} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$a_{b1} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$a_{b2} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\alpha_{nb1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
4,0	2,32	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$	9,86

$\alpha_{nb2}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\alpha_{n01}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\alpha_{n02}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\lambda_{n1}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\lambda_{n2}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
9,86	29,0	29,0	2,32	2,32

$\lambda_{b1}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\lambda_{b2}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$F_{n1}, \text{ м}^2$	$F_{b1}, \text{ м}^2$	$F_{b2}, \text{ м}^2$	$V, \text{ м}^3$	$c, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\alpha_{b1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\alpha_{b2}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$l_{n1}, \text{ м}$	$l_{n2}, \text{ м}$	$l_{b1}, \text{ м}$	$l_{b2}, \text{ м}$
3,48	3,48	20	40	10	100	1,045	9,86	9,86	0,56	0,56	0,16	0,16

Амплитуды колебаний наружной температуры воздуха рассчитывали в соответствии с уравнением: $t_n(\tau) = -2 + 10 \cos(0,261\tau), \text{ }^\circ\text{С}$. Количество теплоты, поступающей в помещение, принимали равным $Q(\tau) = 5000 \text{ кДж}/\text{ч}$, $Q_n(\tau) = 200 \text{ кДж}/(\text{ч} \cdot \text{К})$ (Q_n – количество, теплоты необходимое для нагревания инфильтрующегося наружного воздуха).

Расчет температурного поля помещения производили с шагом $\Delta\tau = 8 \text{ ч}$ по временной оси и при $h = 0,08$ – по координате x , их результаты представлены на рис. 2.

Используя предложенный метод, были рассчитаны потоки теплоты, которые нужны для достижения оптимальных температур воздуха в помещениях, и определены зависимости для потоков теплоты, необходимых для сохранения в помещениях постоянной температуры, – при заданных значениях $t_n(\tau)$, $t_b(\tau)$, a_n , $Q(\tau)$. Такая постановка задачи обеспе-

чит реализацию программного отпуска теплоты, его оптимизацию, что позволит улучшить температурно-влажностный режим помещений и сократить расход теплоты на их отопление.

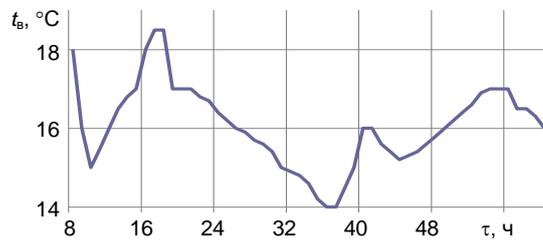


Рис. 2. Температурное поле помещения при заданном изменении наружной температуры и стационарном тепловом режиме

Уравнение (1) примет вид:

$$Q(\tau) = Fk[t_b(\tau) - t_n(\tau)] - Q_n[t_b(\tau) - t_n(\tau)] + \sum_{i=1}^2 F_{ni} \alpha_{nvi} [t_n(\tau) - t_{nci}(\tau)] + \sum_{i=1}^2 F_{vi} \alpha_{vi} [t_b(\tau) - t_{vci}(\tau)]. \quad (10)$$

В результате численного решения задачи (2)–(10) при $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ получена функциональная зависимость для $Q(\tau)$, изображенная на рис. 3.

Используя метод наименьших квадратов, получена аналитическая зависимость в виде (с погрешностью до 5 %)

$$Q_n(\tau) = 5000 + 4000\cos(0,245\tau).$$

Результаты исследований Q_n при заданных $t_n(\tau)$, $t_b(\tau)$, $Q(\tau)$ на основании разработанной математической модели представлены на рис. 4.

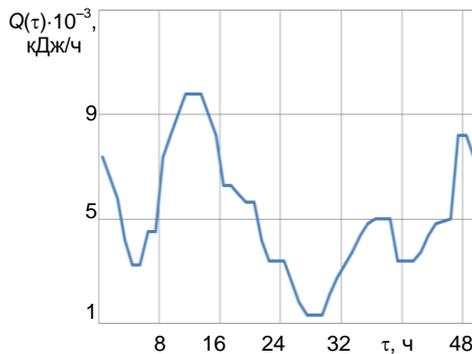


Рис. 3. Истоки и стоки теплоты для достижения оптимальных температур воздуха в помещении в течение двух суток

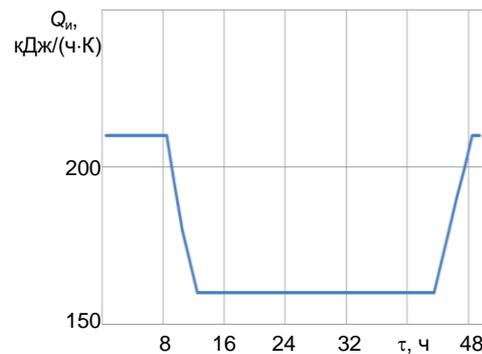


Рис. 4. Количество теплоты, необходимое для нагрева инфильтрующегося наружного воздуха

С помощью предложенной методики рассчитан теплообмен в помещениях при произвольном характере изменения температур наружного воздуха, скорости воздушных потоков. Амплитуды месячных и годовых температур наружного воздуха для областных центров городов Беларуси представлены в табл. 2.

Таблица 2

Амплитуды температур наружного воздуха в климатической зоне Беларуси

Город	Средняя суточная амплитуда температуры наружного воздуха, °С												Средняя годовая амплитуда температуры наружного воздуха
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Брест	5,5	6,3	7,4	9,4	10,8	10,9	10,8	10,4	9,7	7,8	5,7	4,5	8,2
Витебск	6,2	6,8	7,6	8,8	10,8	10,7	10,3	10,1	8,8	6,4	4,4	5,0	8,0
Гомель	6,3	6,8	7,2	8,6	11,0	10,8	10,5	10,7	10,2	7,8	5,0	5,0	8,3
Гродно	5,7	6,3	7,2	9,4	11,0	10,8	10,6	10,1	9,4	7,3	4,3	4,5	8,1
Минск	6,2	6,6	7,3	8,9	11,0	10,6	10,3	10,1	9,2	6,6	4,3	4,7	8,0
Могилев	6,4	7,0	7,7	8,8	11,1	10,8	10,8	10,7	9,7	7,0	4,9	5,3	8,4
Средние месячные по городам	6,1	6,6	7,4	9,0	11,0	10,8	10,5	10,4	9,5	7,2	4,8	4,8	8,1

ВЫВОД

Для многослойных конструкций наружных стен рассчитаны оптимальные толщины слоев ограждения, разработана математическая модель для расчета температуры воздуха в помещениях, расхода теплоты и температурных полей ограждения при произвольном характере изменения возмущающих тепловых воздействий, обосновано эффективное использование программного потребления теплоты в помещениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагарин, В. Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 41–47.
2. Матросов, Ю. А. Оценка энергопотребления зданий / Ю. А. Матросов, В. С. Беляев // Жилищное строительство. – 2010. – № 8. – С. 5–8.
3. Тепло- и массообмен: учеб. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по строит., энергет. и машиностроит. специальностям: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
4. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика: теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. для вузов / В. Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с.
5. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – 5-е изд., пересм. – М.: АВОК-Пресс, 2006. – 250 с.
6. Пилипенко, В. М. Моделирование теплового режима помещений жилых зданий / В. М. Пилипенко // Строительство и архитектура. – 2008. – № 12. – С. 58–63.
7. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-Пресс, 2003. – 192 с.
8. Воронова, Н. П. Математическое моделирование и управление технологиями промышленных производств / Н. П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.
9. Лыков, А. В. Теория теплопроводности: учеб. пособие для теплотехн. специальностей вузов / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
10. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие / А. А. Амосов [и др.]. – М.: Высш. шк., 1994. – 544 с.
11. Воронова, Н. П. Математическое моделирование энергосберегающих режимов нагрева, сушки и термообработки / Н. П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2006. – 86 с.

REFERENCES

1. G a g a r i n, V. G. (2008) Economic Analysis of Heat Protection Improvement Pertaining to Building Enclosure Structures. *Stroitelnye Materialy [Construction materials]*, 8, 41–47.
2. M a t r o s o v, Yu. A., Beliaev, V. S. (2010) Evaluation of Building Energy Consumption. *Zhilishchnoye Stroitelstvo [Housing Construction]*, 8, 5–8.
3. K h r o u s t a l e v, B. M., Nesenчук, A. P., Timoshpol'sky, V. I., Akel'ev, V. D., Sednin, V. A., Kopko, V. M., & Nerez'ko, A. V. (2007) *Heat- and Mass Transfer*. Part 1. Minsk: Belarusian National Technical University.
4. B o g o s l o v s k y, V. N. (1982) *Construction Thermal Physics: Thermal Physics Principles of Heating, Ventilation and Conditioning of Air*. Moscow: Vysshaya Shkola.
5. F o k i n, K. F. (2006) *Construction Heat Technology for Building Enclosure Structures*. Moscow: AVOK-Press.
6. P i l i p e n k o, V. M. (2008) Simulation of Heat Regime in Housing Premises. *Stroitelstvo I Arkhitektura [Construction and Architecture]*, 12, 58–63.
7. T a b u n s h c h i k o v, Yu. A., Brodach, M. M., & Shilkin, N. V. (2003) *Energy-Efficient Buildings*. Moscow: AVOK-Press.
8. V o r o n o v a, N. P. (2009) *Mathematical Simulation and Control Over Technologies of Construction Industry*. Minsk: BNTU.
9. L y k o v, A. V. (1967) *Theory of Heat Conduction*. Moscow: Vysshaya Shkola.
10. A m o s o v, A. A., Dubinsky, Yu. A., & Kopchenova, N. V. (1994) *Calculative Methods for Engineers*. Moscow: Vysshaya Shkola.
11. V o r o n o v a, N. P. (2006) *Mathematical Simulation of Energy Saving Heating, Drying and Thermal Processing Regimes*. Minsk: BNTU.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 05.12.2013

УДК [621.165+621.186.3]:620.172.251.2

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Канд. техн. наук, доц. ГЕРАСИМОВА А. Г.,
магистры техн. наук КРИКСИНА Е. Н., ГОЛОВЧУК Е. А.**

Белорусский национальный технический университет

E-mail: gerasimova_alinabntu@mail.ru

RESIDUAL OPERATIONAL RESOURCE ASSESSMENT OF HIGH TEMPERATURE ELEMENTS OF POWER ENGINEERING EQUIPMENT

**GERASIMOVA A. G.,
KRIXINA E. N., GOLOVCHUK E. A.**

Belarusian National Technical University

Предложен подход к оценке остаточного ресурса теплоустойчивых сталей, основанный на определении времени выхода пор на границу зерен с учетом рабочей температуры, химического состава и структуры исследуемых сталей.

Ключевые слова: теплоустойчивые стали, паропроводы, ползучесть, продление ресурса.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.