

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ НАРУЖНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Басок Б.И., Накорчевский А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины
г. Киев, Украина

АННОТАЦИЯ: Наведені методика і приклад розрахунку теплопередачі через зовнішнє огороження будинку з врахуванням неперервної дії сукупності кліматичних факторів

АННОТАЦИЯ: Изложены методика и пример расчета теплопередачи через наружные ограждения зданий с учетом непрерывного действия совокупности климатических факторов.

ABSTRACT: Set out the methodology and an example of calculation of heat transfer through the outer fence of buildings with light continuous combined climatic factors.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Теплопередача, ограждение зданий, климатический фактор.

Расчетные методики теплопередачи через наружные ограждения зданий [1 - 3 и др.] основываются на допущении о гармоническом характере изменений тепловых характеристик на границах ограждения. Ранние работы [4] акцентировали внимание на изменении параметров внутри помещения (например, разовое в течение суток печное отопление). При повсеместном распространении централизованного отопления и стабилизации внутренней температуры определяющими стали внешние факторы. Однако основы теоретических построений остались прежними, что привело к введению полуэмпирических комплексов и понятий «теплоусвоение» поверхностей, «теплоустойчивость» ограждений и помещений в форме, не отвечающей реальной количественной мере этих понятий.

Основными внешними факторами, определяющими теплопередачу через ограждение, являются температура воздуха, скорость ветра и интенсивность солнечной радиации. Эти характеристики трудно предсказуемы для конкретных суток конкретной местности. Поэтому, если нет частной информации, следует ориентироваться на среднемесячные показатели, которые приводятся в климатических справочниках, как, например, [5 - 7] для территории Украины. Попытка учесть действие солнечной инсоляции была предпринята в середине прошлого столетия А. М. Шкловером [8] путем введения условной наружной температуры воздуха, являющейся суммой температуры воздуха и виртуальной добавки от действия солнечной радиации. Эта методика применялась преимущественно для прогнозирования тепловых параметров в зданиях, расположенных в южных республиках СССР. Уровень современной

вычислительной техники позволяет оперативно решать задачи теплопередачи через ограждения, базируясь на всей совокупности климатических факторов без каких-либо допущений и упрощений.

Ограждение может быть комбинированным, состоящим из ряда слоев, например, таких как показано на рис. 1. Здесь, в цифровой последовательности 1, 2, ... ,7 от

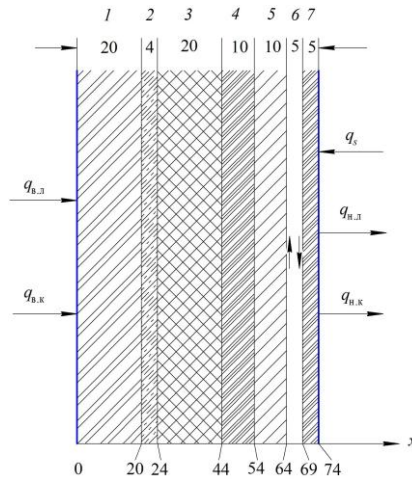


Рис. 1. Схема ограждения

внутренней поверхности ($x = 0$), используются материалы: арболит, гранулы пенополистерола, ракушечник, базальтовая вата, пенополистерол, воздушный слой, пенополистерол. Вверху даны толщины слоев в сантиметрах, внизу – текущее значение поверхностей, разделяющих слои. Толщина ограждения – $\delta = 0,74$ м. Движущая сила теплопередачи определяется действием тепловых потоков по обеим сторонам ограждения (см. рис. 1), а именно, конвективным с плотностью $q_{в,к}$ и лучистым с плотностью $q_{в,л}$ на внутренней поверхности и соответствующими $q_{н,к}$, $q_{н,л}$ на наружной, а также плотностью солнечного излучения q_s .

Следуя работе [3], выпишем основные соотношения для перечисленных выше первых четырех потоков:

$$\begin{aligned} \alpha_{в,к} &= 1,43 \sqrt[3]{T_в - T_0}, & \alpha_{н,к} &= 6,31 v^{0,656} + 3,25 e^{-1,91 v}, \\ q_{в,к} &= \alpha_{в,к} (T_в - T_0), & q_{н,к} &= \alpha_{н,к} (T_\delta - T_n), \\ q_{в,л} &= C_0^n \left[\left(\frac{T_в + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0 + 273}{100} \right)^4 \right], & q_{н,л} &= C_\delta^n \left[\left(\frac{T_\delta + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n + 273}{100} \right)^4 \right], \\ q_в &= q_{в,к} + q_{в,л}, & q_n &= q_{н,к} + q_{н,л}, \end{aligned} \quad (1)$$

где v – скорость ветра,

C_i^n – приведенный коэффициент излучения для внутренней ($i = 0$) и наружной ($i = \delta$) поверхностей.

Необходимо учитывать «строительную» специфику размерностей величин, входящих в (1) – $\text{ккал}, \text{час}$ [3]. Поэтому при переходе в систему СИ вычисленные по (1) значения следует умножать на коэффициент $1,163 \text{ Вт} \cdot \text{час} / \text{ккал}$. Действие

солнечной радиации зависит от широты местности, угла наклона β наружной поверхности ограждения и ее ориентации по странам света. Суточная плотность солнечной энергии для вертикальной стенки ($\beta = \pi/2$) определяется зависимостью:

$$U_{\pi/2} = U_{s\downarrow} + 0,5 U_{d\leftrightarrow} + 0,5 A U_{s\leftrightarrow} + U_{d\leftrightarrow} . \quad (2)$$

Вокруг зданий земная поверхность обычно травяная либо покрывается асфальтом и значение альбеда A будет порядка 0,2. Поэтому вклад отражательной способности окажется небольшим. Действие суммарной радиации ограничивается длительностью светового дня, равного разности времен захода t_{3x} и восхода t_{bx} Солнца. Учитывая синусоидальный характер изменения солнечной активности на протяжении светового дня, плотность теплового потока можно представить в виде зависимости от времени:

$$q_s = \frac{\pi U_\beta}{2 t_{3x} - t_{bx}} \sin \left(\pi \frac{t - t_{bx}}{t_{3x} - t_{bx}} \right) \quad t \in t_{bx}, t_{3x} . \quad (3)$$

Задача сводится к нахождению распределения температур $T(t, x)$ в ограждении согласно уравнению:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_x}{\rho_x c_x} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

при граничных условиях третьего рода на внутренней ($x = 0$) и внешней ($x = \delta$) его границах

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_0 = - \frac{\alpha_{в.к} T_b - T_0 + q_{в.л}}{\lambda_0}, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_\delta = - \frac{\alpha_{н.к} T_\delta - T_n + q_{н.л} - q_s}{\lambda_\delta}, \quad (5)$$

когда известны C_0^{Π} , C_δ^{Π} и теплофизические свойства заполнения ограждения, а также заданы начальное условие $T(0, x)$ и $T_b(t)$, $U_\beta(t)$, $T_n(t)$, $v(t)$, $t_{bx}(t)$, $t_{3x}(t)$. Значения последних пяти функций, если нет другой достоверной информации, находятся по данным климатических справочников. В них приведены значения для каждого месяца года, которые здесь были распространены на каждые сутки конкретного месяца. Поточечные числовые значения последних четырех функций на протяжении суток аппроксимировались полиномами при статистике R^2 не меньше 95 % [10]. Поскольку заданные функции посуточно почти периодические, решение слабо зависит от начальных условий.

Рассмотрим конкретный пример семислойной ограждающей конструкции южной ориентации, представленной на рис. 1. Что касается воздушной полости 6, то она предназначена, в общем случае, для отвода или подачи теплоты в ограждение. Этот слой может выполнять и функции теплоизолятора, если он окажется замкнутым. В последнем случае в полости будет происходить естественная циркуляция воздуха и теплопередача конвекцией, а также молекулярной теплопроводностью и излучением ограничивающих поверхностей. Наиболее просто учесть радиационную составляющую в форме коэффициента лучистой теплоотдачи:

$$\alpha_l = \frac{1,163}{\frac{1}{C_{5,6}} + \frac{1}{C_{6,7}} - \frac{1}{C_q}} \frac{\left(\frac{T_{5,6} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{6,7} + 273}{100} \right)^4}{T_{5,6} - T_{6,7}}, \quad (6)$$

где цифровые индексы относят величины к соответствующим поверхностям на границах между 5 и 6, 6 и 7 слоями, показанными на рис. 1. Влияние естественной конвекции учитывается посредством коэффициента конвекции ϵ_k , определяемого как [11]:

$$\epsilon_k = \frac{\lambda_{эк}}{\lambda_{в3}} = 0,105 Gr_{в3} Pr_{в3}^{0,3} \quad \text{при} \quad 10^3 < Gr_{в3} Pr_{в3} < 10^6, \quad (7)$$

где

$$\text{Gr}_{\text{вз}} = \frac{\beta_* g \delta_6^3 |T_{5,6} - T_{6,7}|}{\nu^2}, \quad \text{Pr}_{\text{вз}} = \left(\frac{\nu}{a} \right)_{\text{вз}}. \quad (8)$$

Здесь $\lambda_{\text{эк}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий конвективную и молекулярную составляющие теплопереноса. Теплофизические характеристики воздуха определяются при температуре $T_{\text{вз}} = (T_{5,6} + T_{6,7})/2$. Если значение произведения критериев Грасгофа и Прандтля в (7) меньше или равно 10^3 , то коэффициент ϵ_k принимается равным единице, что будет свидетельствовать о пренебрежимо малом действии конвекции. Используя (6) – (8), получаем зависимость, определяющую результирующую теплопередачу в воздушном слое

$$q_6 = -(\lambda_{\text{эк}} + \alpha_{\text{л}} \delta_6) \frac{T_{6,7} - T_{5,6}}{\delta_6}. \quad (9)$$

Поскольку такие задачи обычно решаются численно, то (9) удобно представить в дифференциальном виде

$$q_x = -\epsilon_k \lambda_{\text{вз}} + \alpha_{\text{л}} \delta_6 \frac{\partial T}{\partial x} \quad x \in [x_{5,6}, x_{6,7}]. \quad (10)$$

Для численного решения наиболее приемлем неявный метод с использованием прогонки. При малом временном шаге (5 секунд) проблема пространственной нелинейности некоторых коэффициентов при $T(t, x)$ решается принятием их значения на предыдущем моменте времени. Точность контролировалась совпадением (по шести значащим цифрам) годовых количеств энергии, воспринятой ограждением и отведенной от него.

На рис. 2 представлены распределения температур по сечению многослойного ограждения для средин зимы (15 сутки от начала года), весны (105 сутки), лета (196 сутки), осени (289 сутки) в 6, 12, 18, 24 часа суток. Отчетливо проявились теплоизоляционные свойства пенополистирола (второй слой, $x = 0,20 - 0,24$ м). Наибольшее разнообразие распределений $T(x, t)$ характерно для внешних (4, 5, 6, 7) слоев ограждения. И основной причиной такого поведения функций явилось действие солнечной радиации, независимо от времени года. Так всегда в 6 и 7 слоях температура в 12 часов существенно выше температуры в 18 часов. Минимальные температуры приходятся на темное время суток. Причем, если весной и летом температура наружной поверхности в 6 часов больше температуры в 24 часа, то зимой и осенью тенденция противоположная. Отчетливо выражено тепловосприятие наружных слоев ограждения $\left(\frac{\partial T}{\partial x} > 0 \right)$ весной, летом и даже осенью. Для внутренних слоев 1 – 3 характерна

тепловая стабильность в течение суток, что положительно должно отразиться на эксплуатационных свойствах их материалов. Следует отметить маленький перепад температур внутри помещения и внутренней поверхностью стены.

Распределение энергетических параметров по часам указанных выше 15, 105, 196, 289 суток дано на рис. 3. Прежде всего, следует отметить тесную связь между действием солнечной радиации $q_s(t)$, температурой наружной поверхности $T(t, \delta)$ и плотностью теплового потока на ней $q(t, \delta)$. Величина $q(t, \delta)$ начинает резко уменьшаться, начиная с восхода Солнца. Если зимой она достигает нулевого значения в 11 – 12 часов, то в остальные времена года она изменяет знак на противоположный на протяжении длительного периода. Тогда происходит аккумулялирование солнечной энергии ограждением. Температура $T(t, \delta)$ почти мгновенно реагирует на действие солнечной радиации. Что касается внутренних параметров $T(t, 0)$, $q(t, 0)$, то они практически не изменяются на протяжении суток. Это коррелируется с данными для первых трех слоев, приведенными на рис. 2.

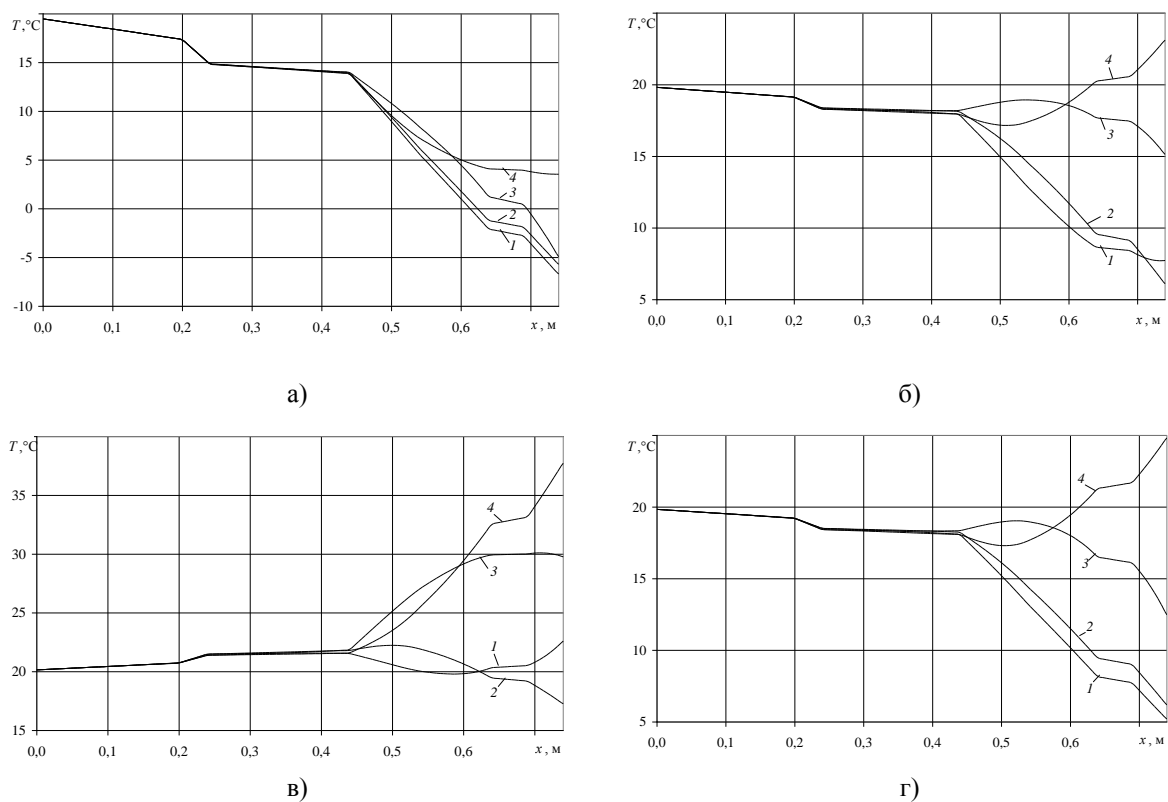


Рис. 2. Распределение температур по сечению ограждения на 15 (а), на 105 (б), на 196 (в), на 289 (г) сутки года. 1 – в 6 час, 2 – в 24 час, 3 – в 18 час, 4 – в 12 час

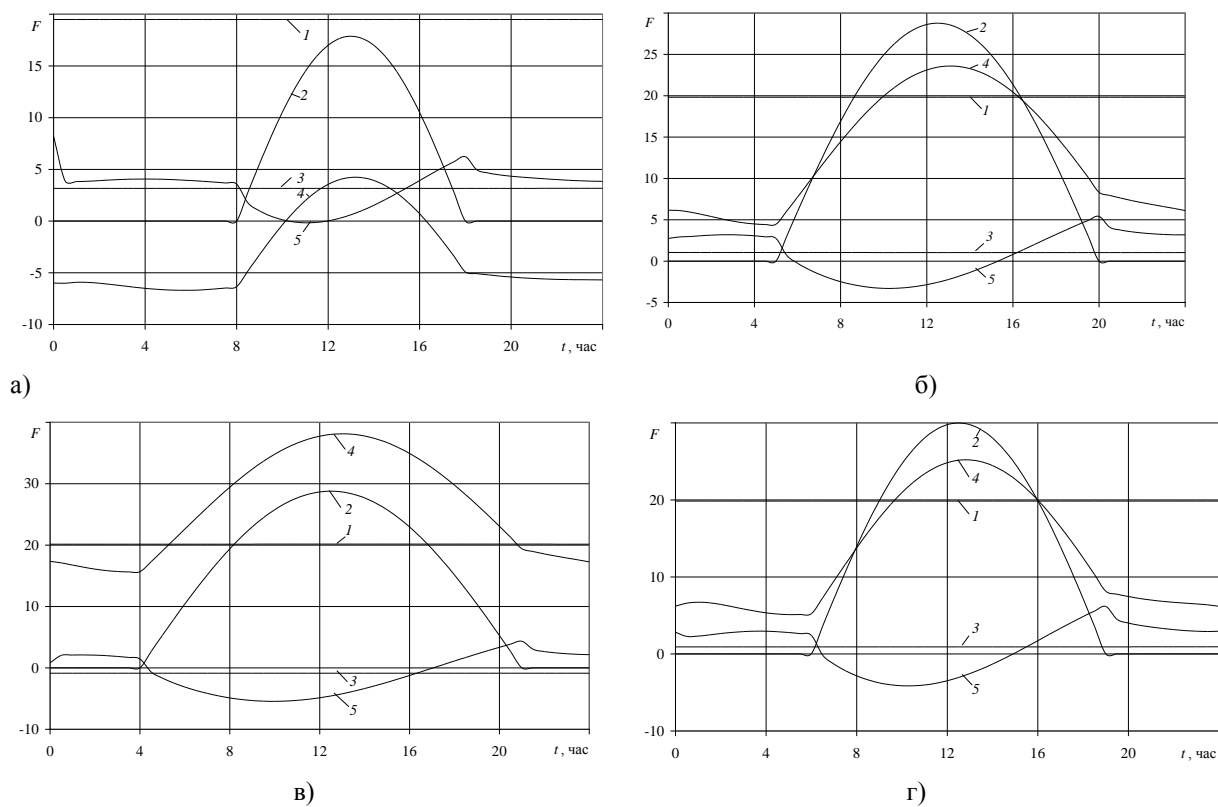


Рис. 3. Распределение энергетических характеристик на 15 (а), на 105 (б), на 196 (в), на 289 (г) сутки года. 1 – $T(0), ^\circ\text{C}$; 2 – $q_s, 10 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q(0), \text{Вт/м}^2$; 4 – $T(\delta), ^\circ\text{C}$; 5 – $q(\delta), \text{Вт/м}^2$

Динамика изменения интегральных энергетических характеристик

$$e(t, 0) = \int_0^t q(t, 0) dt, \quad e(t, \delta) = \int_0^t q(t, \delta) dt, \quad e_s(t) = \int_0^t q_s(t) dt \quad t \in [0, t^*] \quad (11)$$

представлена на рис. 4.

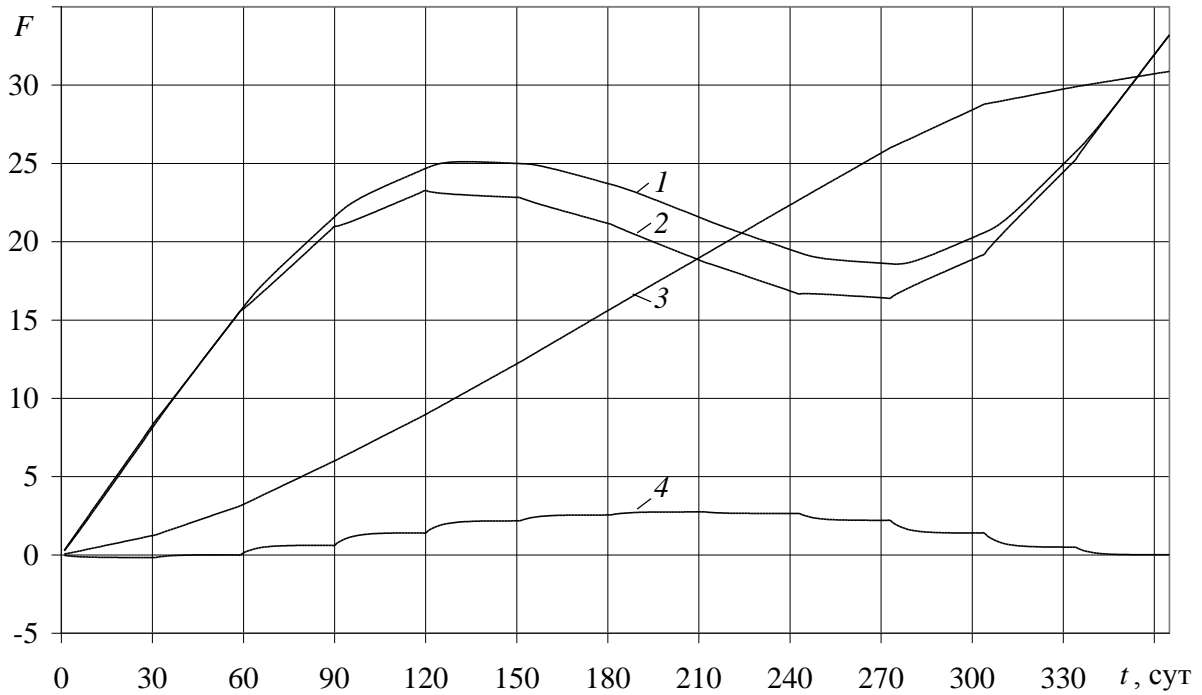


Рис. 4. Энергетические интегральные характеристики. 1 – $e(0), 10^6$ Дж/м²; 2 – $e(\delta), 10^6$ Дж/м²; 3 – $e_s, 10^8$ Дж/м²; 4 – $e(0)-e(\delta), 10^6$ Дж/м²

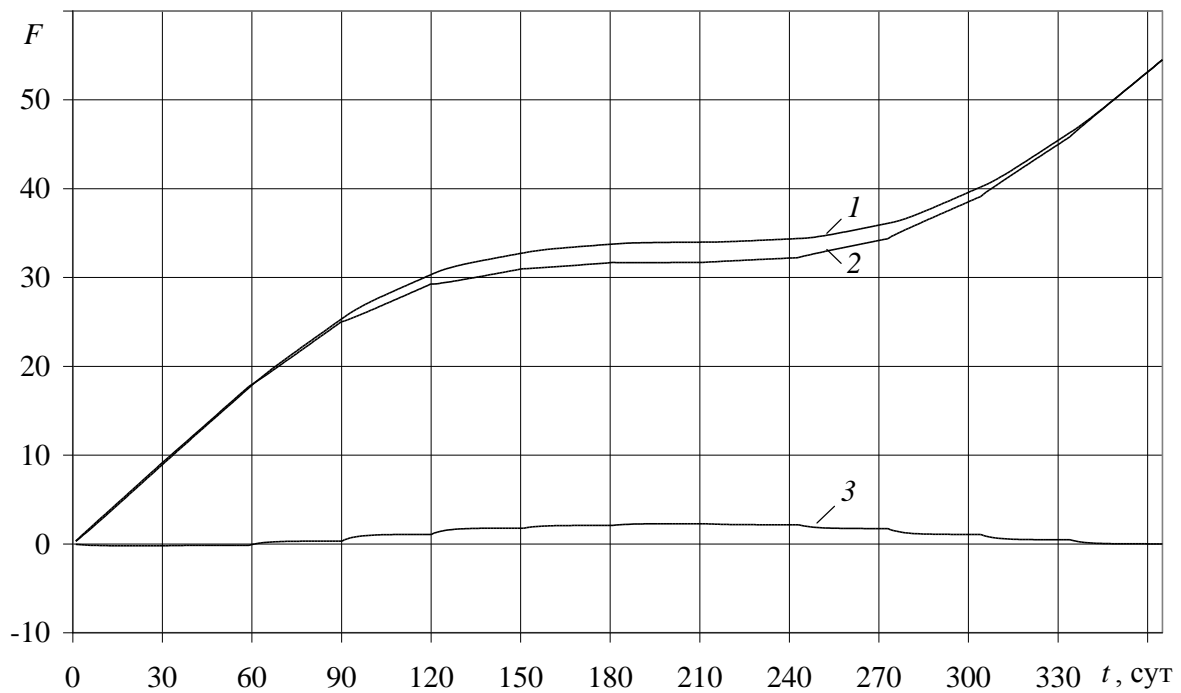


Рис. 5. Энергетические интегральные характеристики без учета действия солнечной радиации. 1 – $e(0), 10^6$ Дж/м²; 2 – $e(\delta), 10^6$ Дж/м²; 3 – $e(0)-e(\delta), 10^6$ Дж/м²

Там же дана и разность первых двух интегралов (11), определяющих аккумулирующую способность ограждения. Согласно вычислениям теплотери через ограждение в основном происходят в период с октября месяца по апрель, что совпадает с длительностью отопительного сезона, принятого для г. Киева. Естественно, в апреле и октябре темп роста теплотери наименьший по сравнению с другими месяцами. Для июня – августа характерен противоположный теплоток – в ограждение, обусловленный действием солнечной радиации. Теплоту периоду свойственно и наибольшее накопление энергии в стене, определяемому разностью $e(t, \delta)$ и $e(t, 0)$. Теплоток в помещение должен быть воспринятым и полезно использованным для горячего водоснабжения или отопления в зимний период. В соответствии с расчетом результирующие годовые теплотери через ограждение составляет для южно ориентированной стены величину $33 \cdot 10^6$ Дж/м². Если не учитывать действия Солнца, результат будет другим – $55 \cdot 10^6$ Дж/м², что в 1,7 раза больше предыдущего значения (см. рис. 5). Поскольку стена высотой 3 м обычно «обслуживает» помещение длиной 6 – 7,5 м, то результирующие теплотери, приходящиеся на единицу площади помещения, будут 3,7...4,6 кВт·час/(м²·год). Последние цифры на порядок меньше нормативных значений.

Наличие в ограждении воздушной прослойки позволяет использовать ее для принудительного отведения избыточной теплоты и поддержания заданной температуры T_v в помещении (в рассчитанном случае $T_v = 20$ °С). Как следует из данных, приведенных на рис. 2, 3, при этом возможно получение потенциала воздушного теплоносителя порядка 20...30 °С. Такую теплоту можно направить в низкопотенциальный теплоаккумулятор либо использовать для предварительного подогрева воды в системе горячего водоснабжения. Если в последней применяются тепловые насосы, то возможен непосредственный ввод этой энергии в низкотемпературный контур теплового насоса.

При отоплении по системе «теплый пол» открывается возможность создания комфортных условий в помещении в теплое время года путем извлечения этой системой избыточной энергии с последующим направлением ее в неработающие летом тепловые насосы или в теплоаккумулятор.

ВЫВОДЫ

Разработана и апробирована методика расчета теплопередачи через наружные ограждения зданий с учетом непрерывного действия внешних факторов – солнечной радиации, ветра, температуры наружного воздуха, лучистого теплотокта, ориентации ограждения по странам света. Установлено, что применение многослойной ограждающей конструкции позволяет не только решить задачу теплоизоляции помещений в холодное время года, но и использовать эту конструкцию для извлечения и рациональной утилизации избыточной летней теплоты. Более подробная информация об особенностях расчетной методики содержится в [12].

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – альбедо; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; C – коэффициент излучения поверхности, Вт/(м²·К⁴); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); e – удельная энергия, Дж/м²; g – 9,81 м/с²; q – плотность теплотокта, Вт/м²; T – температура, °С; t – время, с; U – суточная плотность солнечной энергии, Дж/м²; v – скорость, м/с; x – координата, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); β – угол наклона, рад; β^* – температурный коэффициент объемного расширения, К⁻¹; δ – толщина, м; λ –

коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ – плотность, кг/м³.

Индексы: d – диффузия; i – номер слоя; i, j – на поверхности между слоями i, j ; s – солнце; x – при x ; β – при угле наклона β ; δ – при $x = \delta$; 0 – при $x = 0$; v – внутренний; vx – восход; zx – заход; k – конвекция; l – лучистый; n – наружный; p – приведенный; ch – черный; $эк$ – эквивалентный; \leftrightarrow – горизонталь; \updownarrow – вертикаль; $*$ – годовое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий) / Ильинский В.М. – М.: Высшая школа, 1974. – 320 с.
2. Богословский В.Н. Отопление: учеб. для вузов / Богословский В.Н., Сканава А.Н. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Фокин К.Ф. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 200 с.
4. Власов О.Е. Основы строительной теплотехники / Власов О.Е. – М.: ВИА РККА, 1938. – 94 с.
5. Справочник по климату СССР. – Вып. 10, ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 124 с.
6. Справочник по климату СССР. – Вып. 10, ч. II. Температура воздуха и почвы. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 608 с.
7. Справочник по климату СССР. – Вып. 10, ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 682 с.
8. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях / Шкловер А.М. – М.: Энергоиздат, 1961.
9. Кондратьев К.Я. Радиационный режим наклонных поверхностей / Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 216 с.
10. Бартенев О.В. Фортран для профессионалов. Математическая библиотека IMSL. Ч.3. / Бартенев О.В. – М.: Диалог МИФИ, 2001. – 368 с.
11. Михеев М.А. Основы теплопередачи / Михеев М.А., Михеева И.М. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
12. Накорчевский А.И. Действие климатических условий на теплопередачу через ограждения зданий и использование избыточной теплоты для теплоснабжения / Накорчевский А.И. // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т.86. – № 3. – С. 481–488.

REFERENCES

1. Ilyinsky V.M. Building Thermophysics (walling and the microclimate of buildings)/ Ilyinsky V.M. – M.: High School, 1974. - 320 p.
2. Bogoslovsky V.N. Heating: textbook for universities / Bogoslovsky V.N., Skanavi A.N. - M: Strojizdat, 1991. - 735 p.
3. Fokin K.F. Building heat engineering protecting parts of buildings / Fokin K.F. – M.: AVOK-PRESS, 2006. - 200 p.
4. Vlasov O.E. Basics of building heat engineering / Vlasov O.E. – M.: VIA RKKA, 1938. - 94 p.
5. Reference book on the climate of the USSR. - Vol. 10, P. I. Solar radiation, radiation balance and the sun shining. - Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. - 124 p.
6. Reference book on the climate of the USSR. - Vol. 10, p. II. The temperature of air and soil. - Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. - 608 p.
7. Reference book on the climate of the USSR. - Vol. 10, p. III. - Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. - 682 p.
8. Shklover A.M. Heat transfer during periodic thermal effects / Shklover A.M. - M: Energoizdat, 1961.
9. Kondratyev C.A. Radiation mode inclined surfaces / Kondratyev C.A., Pivovarova S.I., Fedorova M.P. - Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. - 216 p.
10. Bartenev O.V. Fortran for professionals. Mathematical IMSL library. Part 3. / Bartenev O.V. - M: Dialogue MEPI, 2001. - 368 p.
11. Mikheev M.A. Fundamentals of heat transfer / Mikheev M.A., Mikheeva I.M. - M: Energy, 1973. - 320 p.
12. Nakorchevskij A.I. Effect of climatic conditions on heat transfer through the walls and use of surplus heat for heating / Nakorchevskij A.I // Engineering-physical journal. - 2013. - Vol. № 3. - P. 481-488.

Статья поступила в редакцию 10.03.2014 г.