

УДК 697.1+699.86

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ МАЛОПОВЕРХОВОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З МАТЕРІАЛІВ ОРГАНІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

ДАНІШЕВСЬКИЙ В.В.¹, д.т.н., проф.САВИЦЬКИЙ М.В.^{2*}, д.т.н., проф.ЮРЧЕНКО Є.Л.³, к.т.н., доц.

¹ Кафедра будівельної механіки та опору матеріалів, Державний вищий навчальний заклад „Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського 24а, Дніпропетровськ 49600, тел. +38 (0562) 47-03-79, e-mail: ydanish@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад „Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського 24а, Дніпропетровськ 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

³ Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад „Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського 24а, Дніпропетровськ 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-10-36, e-mail: yel@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

Анотація. Мета. Однією з головних задач енергозбереження є зменшення витрат теплоти на опалення житлового фонду. В роботі запропоновано новий метод розрахунку енергетичних показників житлових та громадських будівель. Як приклад, розглянуто житловий будинок із матеріалів органічного походження у м. Київ. **Методика.** Тепловтрати через зовнішні огороження, на нагрів вентиляційного повітря та інфільтрацію визначено в залежності від середньодобової температури зовнішнього повітря. Сезонні зміни кліматологічних параметрів описано за допомогою математичної моделі на основі розкладів Фур'є. **Результати.** Проведено аналіз теплозахисних властивостей зовнішніх огорожень. Обчислено витрати енергії на опалення з урахуванням рекуперації вторинної теплоти витяжного повітря та зміни режиму теплоспоживання протягом опалювального періоду. **Наукова новизна.** Запропонований метод визначення тепловтрат дозволяє враховувати сезонні зміни кліматологічних параметрів, що неможливо зробити в рамках відомих інженерних методів розрахунку. Це суттєво підвищує точність результатів при проектуванні „пасивних будинків” з низьким енергоспоживанням. **Практична значимість.** Надано рекомендації щодо раціонального проектування теплоізоляційної оболонки енергоефективних будівель. Одержані результати дозволяють визначати оптимальний комплекс заходів енергозбереження та виконувати уточнені розрахунки енергетичних показників будівель.

Ключові слова: енергозбереження; теплоізоляційна оболонка; тепловтрати; рекуперація; опалення; пасивний будинок.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАЛОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА ИЗ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

ДАНИШЕВСКИЙ В.В.¹, д.т.н., проф.САВИЦКИЙ Н.В.^{2*}, д.т.н., проф.ЮРЧЕНКО Е.Л.³, к.т.н., доц.

¹ Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение „Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского 24а, Днепропетровск 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-03-79, e-mail: vdanish@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение „Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского 24а, Днепропетровск 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

³ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение „Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского 24а, Днепропетровск 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-10-36, e-mail: yel@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

Аннотація. Цель. Одной из главных задач энергосбережения в строительстве является уменьшение расхода теплоты на отопление жилого фонда. В работе предложен новый метод расчета энергетических показателей жилых и гражданских зданий. В качестве примера рассмотрен жилой дом из материалов органического происхождения в г. Киев. **Методика.** Теплотери здания через наружные ограждения, на нагрев вентиляционного воздуха и инфильтрацию определены в зависимости от среднесуточной температуры наружного воздуха. Сезонные изменения климатологических параметров описаны при помощи разложений Фурье. **Результаты.** Проведен анализ теплозащитных свойств внешних ограждений. Вычислен расход энергии на отопление с учетом рекуперации вторичной теплоты вытяжного воздуха и изменения режима теплотребления в течении отопительного периода. **Научная новизна.** Предложенный метод определения теплотерь позволяет учитывать сезонные изменения климатологических параметров, что невозможно сделать в рамках известных

инженерных методов расчета. Это существенно повышает точность результатов при проектировании «пассивных домов» с низким энергопотреблением. **Практическое значение.** Даны рекомендации для рационального проектирования теплоизоляционной оболочки энергоэффективных зданий. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный комплекс мероприятий энергосбережения и выполнять уточненные расчеты энергетических показателей зданий.

Ключевые слова: энергосбережение; теплоизоляционная оболочка; теплопотери; рекуперация; отопление; пассивный дом.

ENERGETIC PARAMETERS OF A LOW-RISE LIVING BUILDING CONSTRUCTED WITH MATERIALS OF THE ORGANIC ORIGIN

DANISHEVSKYY V.V.¹, *Dr. Sc., Prof.*
SAVYTSKYI M.V.^{2*}, *Dr. Sc., Prof.*
IURCHENKO Iev.L.³, *Cand. Sc. (Tech.), Ass.-prof.*

¹ Department of Structural Mechanics and Strength of Materials, State Higher Education Establishment “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevsky St. 24a, Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-03-79, e-mail: vdanish@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Department of Reinforce-Concrete and Stone Structures, State Higher Education Establishment “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevsky St. 24a, Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

³ Department of Reinforce-Concrete and Stone Structures, State Higher Education Establishment “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernyshevsky St. 24a, Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-10-36, e-mail: yel@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

Abstract. Aim. One of the main problems of the energy conservation refers reducing the heat consumption in Civil Engineering. We propose a new method to determine energetic parameters of residential buildings. As an illustrative example, a low-rise building constructed with materials of the organic origin and located in Kyiv is considered. **Methodology.** Heat consumptions through fencing structures, for the supply and infiltrated air are determined depending on the daily average outdoor temperatures. Changing of the climate parameters within the year are described by expansions into Fourier series. **Results.** Thermal properties of the fencing structures are analyzed. The energy consumption of the building is determined considering the heat recovering from the exhaust air and the season variations of the heating regime. **Novelty.** The developed method gives a possibility to take into account the changing of the climate parameters during the heating period, which is not possible in the framework of commonly used engineering approaches. This enhances the accuracy of the results, in particular, for “passive houses” with enormously low heat consumption. **Practical importance.** Practical recommendations for the optimal design of the thermal insulation of buildings are given. The obtained results allow one to evaluate precisely the energetic parameters of the energy efficient buildings.

Keywords: energy conservation; thermal insulation; heat consumption; heat recuperation; heating; passive house.

1. Вступ

Актуальною задачею будівництва є зменшення витрат енергії на опалення житлового фонду. Для цього можуть застосовуватись різні заходи [1]: підвищення теплозахисних властивостей зовнішніх огорожень, використання поновлювальних джерел енергії (системи теплопостачання на основі теплових насосів [2, 3] та сонячних колекторів [4, 5]), утилізація вторинної енергії (наприклад, рекуперация теплоти витяжного повітря та димових газів). На практиці, ефективність заходів енергозбереження залежить від багатьох факторів, таких як конструкція теплоізоляційної оболонки будинку і відсутність в ній „містків холоду”, сезонні зміни режиму споживання тепла, конструкція і режим роботи системи опалення тощо. Як правило, відомі інженерні методи розрахунку є спрощеними та не дозволяють у повній мірі врахувати вплив зазначених вище факторів.

В роботі запропоновано новий метод розрахунку енергетичних показників житлових та громадських будівель. Як приклад, розглянуто житловий будинок із матеріалів органічного походження. Район будівництва – м. Київ.

2. Теплозахисні властивості зовнішніх огорожень

Проектування теплоізоляційної оболонки будинку за теплотехнічними показниками її елементів передбачає виконання умови [6]:

$$R_{\Sigma np} \geq R_{q \min}, \quad (1)$$

де $R_{\Sigma np}$ – приведений опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, $m^2 \cdot K / Wt$; $R_{q \min}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі. Для будинку, що проектується, значення $R_{q \min}$ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Мінімально допустимий опір теплопередачі /
The minimal thermal resistance

Вид конструкції	$R_{q_{\min}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$
Зовнішні стіни	3.3
Горищні перекриття	4.95
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами	3.75
Світлопрозорі конструкції	0.75
Вхідні двері	0.65

Приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma_{\text{пр}}}$ визначимо так: $R_{\Sigma_{\text{пр}}} = 1/k_{\Sigma_{\text{пр}}}$, де $k_{\Sigma_{\text{пр}}}$ – приведений коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, який обчислюється за формулою:

$$k_{\Sigma_{\text{пр}}} = \frac{\xi}{F_{\Sigma}} \left(\frac{F_{\text{нп}}}{R_{\text{нп}}} + \frac{F_{\text{сп}}}{R_{\text{сп}}} \right).$$

Тут $F_{\text{нп}}$, $F_{\text{сп}}$ – площа непрозорих та світлопрозорих огорожень відповідно, $F_{\text{нп}} = 219.2 \text{ м}^2$, $F_{\text{сп}} = 16.2 \text{ м}^2$; F_{Σ} – загальна площа теплоізоляційної оболонки, $F_{\Sigma} = 235.4 \text{ м}^2$; $R_{\text{нп}}$, $R_{\text{сп}}$ – приведений опір теплопередачі непрозорих та світлопрозорих огорожень, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$; коефіцієнт ξ враховує додаткові тепловтрати, пов'язані з орієнтацією огорожень за сторонами світу, наявністю кутових приміщень та надходженням холодного повітря через вхідні двері, $\xi = 1.13$.

Вікна будинку виконані з двокамерного склопакету 4i-10-4M1-10-4i, що містить два енергозберігаючих скла з м'яким покриттям; камери на 100% заповнені криптоном. Така конструкція забезпечує максимально високе значення опору теплопередачі, яке можливе досягти для двокамерного скління: $R_{\text{сп}} = 1.35 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$.

Опір теплопередачі непрозорих шаруватих огорожень дорівнює:

$$R_{\text{нп}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{з}}}, \quad (2)$$

де δ_i – товщина, м, λ_i – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, i -го шару; n – кількість шарів; $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{з}}$ – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої та зовнішньої поверхні огороження відповідно. Для вертикальних стін $\alpha_{\text{в}} = 8.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\alpha_{\text{з}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Зовнішні стіни будинку складаються з трьох шарів, $n = 3$. Внутрішній та зовнішній шари – цегла з ґрунтобетону, $\delta_1 = \delta_3 = 0.12 \text{ м}$, $\lambda_1 = \lambda_3 = 0.64 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, проміжний шар – утеплювач із костриці коноплі, $\lambda_2 = 0.05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. З точки зору енергоефективності, раціональне проектування теплоізоляційної оболонки

будинку передбачає, щоб усі непрозорі огороження мали однаковий опір теплопередачі, що досягається відповідним підбором товщини утеплювача. Будемо вважати, що опір теплопередачі горищного та підвального перекриття дорівнює опору теплопередачі стін, який, в свою чергу, визначається за формулою (2).

На рис. 1 наведено залежність приведенного опору теплопередачі $R_{\Sigma_{\text{пр}}}$ від товщини утеплювача δ_2 . Залежність носить нелінійний характер: зі збільшенням δ_2 швидкість зростання $R_{\Sigma_{\text{пр}}}$ помітно зменшується. Це пов'язано з витратами теплоти через світлопрозорі частини огорожень. Безрозмірні частки тепловитрат через непрозорі $\bar{q}_{\text{нп}}$ та світлопрозорі $\bar{q}_{\text{сп}}$ огороження складають:

$$\bar{q}_{\text{нп}} = \frac{F_{\text{нп}}}{R_{\text{нп}}} \left(\frac{F_{\text{нп}}}{R_{\text{нп}}} + \frac{F_{\text{сп}}}{R_{\text{сп}}} \right)^{-1}, \quad \bar{q}_{\text{сп}} = \frac{F_{\text{сп}}}{R_{\text{сп}}} \left(\frac{F_{\text{нп}}}{R_{\text{нп}}} + \frac{F_{\text{сп}}}{R_{\text{сп}}} \right)^{-1}.$$

На рис. 2 наведено залежності $\bar{q}_{\text{нп}}$, $\bar{q}_{\text{сп}}$ від товщини утеплювача δ_2 .

Аналіз одержаних результатів свідчить, що при відносно малій товщині утеплювача (0.3–0.4 м), коли приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma_{\text{пр}}}$ близький до мінімально допустимого значення $R_{q_{\min}}$, переважна більшість витрат теплоти відбувається через непрозорі частини зовнішніх огорожень. У цьому випадку збільшення товщини теплоізоляції дозволяє суттєво підвищити $R_{\Sigma_{\text{пр}}}$ та покращити енергоефективність будинку. Коли товщина утеплювача перевищує 1 м, основна частина витрат теплоти припадає на світлопрозорі огороження і тому збільшення товщини теплоізоляції не призводить до істотного зростання $R_{\Sigma_{\text{пр}}}$. У цьому випадку для підвищення енергоефективності будинку необхідно в першу чергу збільшувати опір теплопередачі світлопрозорих огорожень.

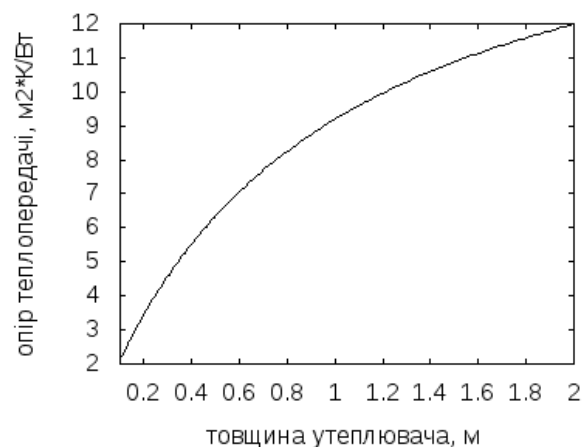


Рис. 1. Приведений опір теплопередачі /
The normalized thermal resistance

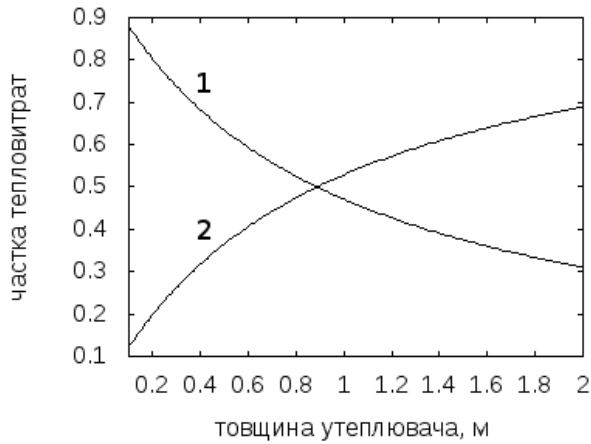


Рис. 2. Частки тепловтрат через непрозорі (1) та світлопрозорі (2) огороження / Rates of the heat flow throw opaque (1) and translucent (2) fences

3. Енергетичні показники будинку з урахуванням рекуперації теплоти витяжного повітря

Зазначимо, що для сучасних енергоефективних будинків умова (1), як правило, виконується із запасом. Більш важливим з точки зору енергозбереження є проектування теплоізоляційної оболонки, виходячи з тепловтрат на опалення. Питомі витрати теплової енергії протягом року $q_{буд}$, кВт·год/м², віднесені до одиниці опалювальної площі, можна визначити так:

$$q_{буд} = (q_{\Sigma} + q_{інф} - q_{над}) \beta_h, \tag{3}$$

де q_{Σ} – сумарні витрати теплоти через зовнішні огороження, $q_{інф}$ – витрати теплоти на нагрів вентиляційного повітря та на інфільтрацію, $q_{над}$ – побутові надходження теплоти від освітлення, електрообладнання та людей, β_h – коефіцієнт, що враховує додаткове теплоспоживання, пов’язане з дискретністю номінального теплового потоку номенклатурного ряду опалювальних приладів і з додатковими тепловтратами через зарадіаторні ділянки огорож, $\beta_h = 1.13$.

Витрати теплоти q_{Σ} та $q_{інф}$, кВт·год/м², обчислюються за формулами:

$$q_{\Sigma} = 0.024 k_{\Sigma пр} D_d F_{\Sigma} / F_h, \tag{4}$$

$$q_{інф} = 0.024 k_{інф} (1 - \kappa_{рек}) D_d F_{\Sigma} / F_h, \tag{5}$$

де F_h – опалювальна площа, $F_h = 72.8 \text{ м}^2$; D_d – кількість градусо-днів опалювального періоду, $D_d = (t_b - t_3^{он}) z_{он}$, t_b – розрахункова температура внутрішнього повітря, $t_b = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_3^{он}$ – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період, $t_3^{он} = -0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $z_{он}$ – тривалість опалювального

періоду, $z_{он} = 176$ днів. Тут і нижче всі кліматологічні дані наведені для району будівництва у м. Київ.

Умовний коефіцієнт теплопередачі $k_{інф}$, Вт/(м²·К), враховує витрати теплоти за рахунок вентиляції та інфільтрації:

$$k_{інф} = 0.278 c n_{об} v_v V_h \gamma_3^{он} \eta / F_{\Sigma},$$

де c – питома теплоємність повітря, $c = 1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $n_{об}$ – нормативна кратність повітрообміну, $n_{об} = 1 \text{ год}^{-1}$; v_v – коефіцієнт зниження об’єму повітря за рахунок наявності внутрішніх огорожень, $v_v = 0.85$; V_h – опалювальний об’єм, $V_h = 191.2 \text{ м}^3$; $\gamma_3^{он}$ – середня густина повітря за опалювальний період, $\gamma_3^{он} = 353 / [273 + 0.5(t_b + t_3^{он})]$, кг/м³; η – коефіцієнт впливу зустрічного теплового потоку в огорожувальних конструкціях, для даного типу будинку $\eta = 1$.

Коефіцієнт температурної ефективності рекуперації $\kappa_{рек}$ враховує частку явної теплоти, яку можна одержати шляхом утилізації теплової енергії витяжного повітря: $\kappa_{рек} = (t_n - t_3) / (t_n - t_3)$, де t_n , t_3 , t_3 – температура припливного, внутрішнього та зовнішнього повітря відповідно. Для сучасних пластинчатих рекуператорів $\kappa_{рек} = 0.85$.

Надходження теплоти $q_{над}$, кВт·год/м², обчислюються так:

$$q_{над} = 24 z_{он} q_{поб} v_{\zeta}, \tag{6}$$

де $q_{поб}$ – питома тепла потужність побутових джерел тепла, згідно [7] приблизно можна прийняти $q_{поб} = 0.01 \text{ кВт}/\text{м}^2$; v – коефіцієнт, що враховує здатність огорожувальних конструкцій акумулювати тепло при періодичному тепловому режимі, $v = 0.8$; ζ – коефіцієнт авторегулювання подавання тепла в системах опалення, для системи з термостатами та по квартирним горизонтальним розведенням $\zeta = 1$.

Згідно нормативних вимог [6], витрати теплоти на опалення повинні відповідати умові:

$$q_{буд} \leq E_{max},$$

де E_{max} – максимально допустимі питомі витрати теплоти за опалювальний період. Для будинку, що проектується, $E_{max} = 600 F_h^{-1/4} = 205.4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Клас енергетичної ефективності будинку визначається за даними таблиці 2 в залежності від співвідношення показників $q_{буд}$ та E_{max} .

На рис. 3 наведено залежність питомих витрат теплоти на опалення протягом року $q_{буд}$, кВт·год/м², від приведеного опору теплопередачі $R_{\Sigma пр}$ теплоізоляційної оболонки будинку. Одержані

результати свідчать, що застосування рекуперації теплоти витяжного повітря дозволяє зменшити витрати енергії на опалення від двох (при $R_{\Sigma пр} = 3...4 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$) до шести (при $R_{\Sigma пр} = 8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$) разів. Питома частка витрат теплоти на нагрів вентиляційного повітря та інфільтрацію в загальних тепловитратах будинку складає $\bar{q}_{\text{інф}} = q_{\text{інф}} / (q_{\Sigma} + q_{\text{інф}})$. Залежність $\bar{q}_{\text{інф}}$ від $R_{\Sigma пр}$ наведено на рис. 4.

Таблиця 2

Класифікація будинків за енергоефективністю / Classification of buildings by the energy efficiency

Класи енергетичної ефективності будинку	$\frac{q_{\text{буд}} - E_{\text{max}}}{E_{\text{max}}} 100\%$
A	≤ -50
B	$-10...-49$
C	$-9...0$
D	$1...25$
E	$26...75$
F	≥ 76

Зі збільшенням опору теплопередачі $R_{\Sigma пр}$ надходження теплоти від побутових джерел відіграють суттєву роль у покритті тепловитрат на опалення. Частка побутових надходжень теплоти відносно загальних тепловитрат будинку дорівнює $\bar{q}_{\text{над}} = q_{\text{над}} / (q_{\Sigma} + q_{\text{інф}})$. На рис. 5 наведено залежність $\bar{q}_{\text{над}}$ від $R_{\Sigma пр}$. Дані щодо енергетичної ефективності будинку, відповідно до класифікації табл. 2, наведено на рис. 6. У випадку застосування рекуперації витяжного повітря, збільшення приведенного опору теплопередачі до $R_{\Sigma пр} = 8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ дозволяє покрити 75% витрат енергії на опалення за рахунок надходжень теплоти з побутових джерел. При цьому показник енергоефективності будинку досягає -94% .

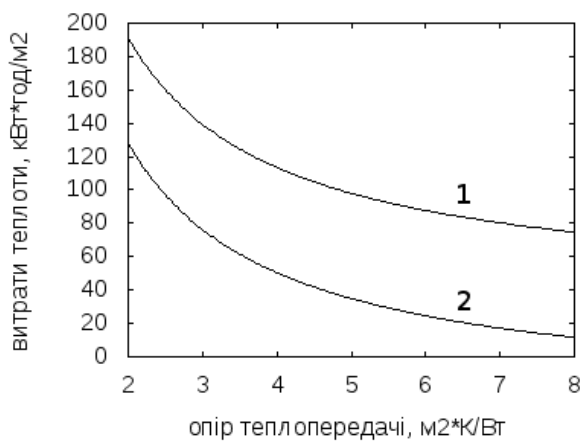


Рис. 3. Витрати теплоти на опалення: 1 – без рекуперації, 2 – із рекуперацією / The heat consumption: 1 – no recuperation, 2 – with recuperation of the waste air heat

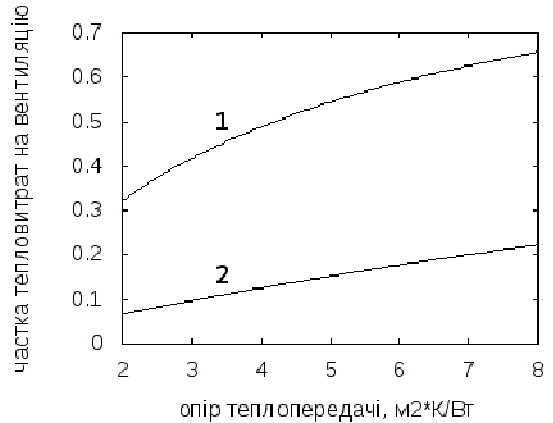


Рис. 4. Питома частка витрат теплоти на нагрів вентиляційного повітря та інфільтрацію: 1 – без рекуперації, 2 – із рекуперацією / The rate of the heat consumption for ventilation: 1 – no recuperation, 2 – with recuperation

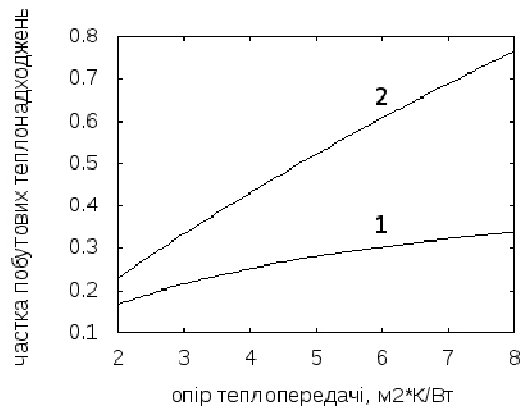


Рис. 5. Частка побутових надходжень теплоти відносно загальних тепловитрат будинку: 1 – без рекуперації, 2 – із рекуперацією / The rate of the heat gains form domestic sources: 1 – no recuperation, 2 – with recuperation

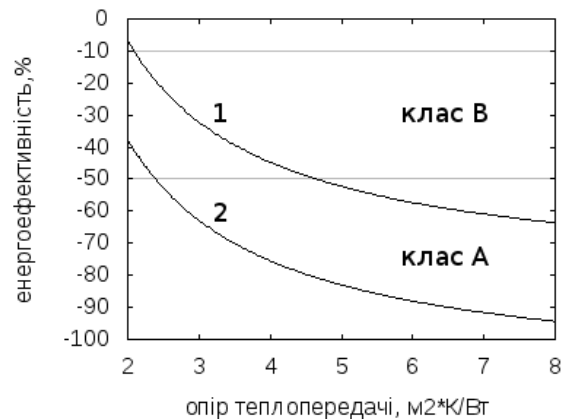


Рис. 6. Показники енергоефективності будинку: 1 – без рекуперації, 2 – із рекуперацією / The energy efficiency of the building: 1 – no recuperation, 2 – with recuperation

4. Енергетичні показники “пасивного будинку” з урахуванням сезонної зміни теплових витрат

Подальший аналіз виконуємо для випадку, коли застосовується рекуперация теплоти витяжного повітря. Запропонований у розділі 3 метод розрахунку енергетичних показників будинку та одержані за його допомогою результати ґрунтуються на загальноприйнятих нормативних положеннях [6, 8]. При цьому кліматологічні характеристики зовнішнього повітря враховувались на основі середніх значень за опалювальний період, а витрати теплоти через зовнішні огороження q_{Σ} та на нагрів повітря $q_{\text{інф}}$ припускалися незмінними впродовж сезону. Даний підхід забезпечує високу точність розрахунків, коли сумарні тепловтрати будинку $q_{\Sigma} + q_{\text{інф}}$ є суттєво більшими за теплонадходження $q_{\text{над}}$. Як свідчать одержані результати (рис. 5), якщо приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma\text{пр}}$ досягає значення $8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ чи більше, частка побутових надходжень теплоти відносно загальних тепловитрат будинку $\bar{q}_{\text{над}}$ наближається до одиниці. Це відповідає критеріям „пасивного будинку”, в якому майже всі витрати енергії на опалення компенсуються за рахунок побутових джерел [9 - 14]. У цьому випадку на початку та в кінці опалювального сезону $q_{\text{над}} > q_{\Sigma} + q_{\text{інф}}$. Це означає, що має місце надлишок теплової енергії, який не може бути використаний для опалення. Для правильного визначення енергетичних показників „пасивного будинку” необхідно враховувати зміни теплових витрат q_{Σ} і $q_{\text{інф}}$ впродовж опалювального періоду. При цьому нормативний метод розрахунку виявляється неприйнятним.

Представимо функцію, що описує середньодобову температуру зовнішнього повітря $t_3^{\text{н}}(z)$, у вигляді розкладу в ряд Фур’є:

$$t_3^{\text{н}}(z) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^6 \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{z_{\text{рік}}} z\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{z_{\text{рік}}} z\right) \right], \quad (7)$$

де z – номер доби, відрховуючи з 1 січня; $z_{\text{рік}}$ – періодичність коливаний $t_3^{\text{н}}(z)$, що дорівнює тривалості календарного року, $z_{\text{рік}} = 365$ діб. Коефіцієнти a_0 , a_n , b_n обчислюються так:

$$a_0 = \frac{2}{z_{\text{рік}}} \sum_{z=1}^{z_{\text{рік}}} t_3^{\text{міс}}(z), \quad a_n = \frac{2}{z_{\text{рік}}} \sum_{z=1}^{z_{\text{рік}}} t_3^{\text{міс}}(z) \cos\left(\frac{2\pi n}{z_{\text{рік}}} z\right),$$

$$b_n = \frac{2}{z_{\text{рік}}} \sum_{z=1}^{z_{\text{рік}}} t_3^{\text{міс}}(z) \sin\left(\frac{2\pi n}{z_{\text{рік}}} z\right).$$

Тут $t_3^{\text{міс}}(z)$ – кусково-задана функція, що описує середньомісячні значення температури зовнішнього

повітря, $t_3^{\text{міс}}(z) = t_i$ при $z_{i-1} < z \leq z_i$, i – номер місяця, t_i – середня температура зовнішнього повітря у i -му місяці [8], z_i – номер останньої доби i -го місяця. Значення t_i , z_i наведено у табл. 3, $z_0 = 0$. Графіки функцій $t_3^{\text{н}}(z)$, $t_3^{\text{міс}}(z)$ наведено на рис. 7.

Таблиця 3

**Значення показників t_i , °C, та z_i , діб
Magnitudes of the parameters t_i , °C, and z_i , days**

i	1	2	3	4	5	6
t_i	-4.7	-3.6	1.0	9.0	15.2	18.3
z_i	31	59	90	120	151	181
i	7	8	9	10	11	12
t_i	19.8	19.0	13.9	8.1	1.9	-2.5
z_i	212	243	273	304	334	365

Оцінимо точність запропонованої математичної моделі (7). Точки переходу функції $t_3^{\text{міс}}(z)$ через значення 8°C дозволяють визначити початок z_{start} та кінець z_{end} опалювального періоду: $z_{\text{start}} = 290$ діб, $z_{\text{end}} = 466$ діб. Тривалість опалювального періоду складає $z_{\text{он}} = z_{\text{start}} - z_{\text{end}} = 176$ діб, що співпадає з нормативними даними [8]. Кількість градусо-діб опалювального періоду дорівнює:

$$D_d = \sum_{z=z_{\text{start}}}^{z_{\text{end}}} [t_{\text{в}} - t_3^{\text{н}}(z)] = 3571.3 \text{ град}\cdot\text{діб}.$$

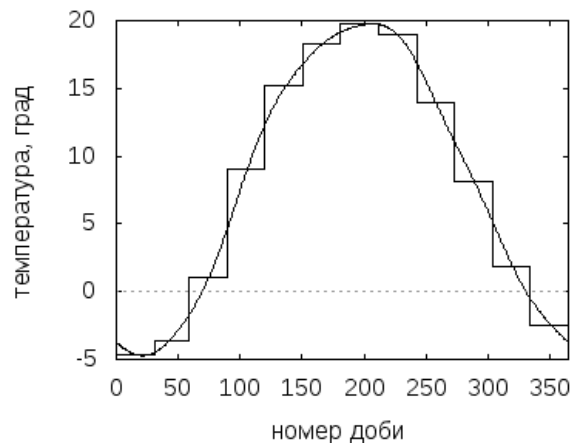


Рис. 7. Середньодобова та середньомісячна температури зовнішнього повітря
Fig. 7. The daily and the monthly average outdoor temperatures

Похибка відносно нормативного значення $D_d = (t_{\text{в}} - t_3^{\text{он}})z_{\text{он}} = 3537.6 \text{ град}\cdot\text{діб}$ складає менше 1%.

Враховуючи сезонну зміну температури зовнішнього повітря, питомі витрати теплової енергії протягом року $q_{\text{буд}}$ можна визначити за формулою:

$$q_{\text{буд}} = \sum_{z=z_{\text{старт}}}^{z_{\text{конец}}} [q_{\Sigma}^n(z) + q_{\text{інф}}^n(z) - q_{\text{над}}^n] \beta_h, \quad (8)$$

де $q_{\Sigma}^n(z)$, $q_{\text{інф}}^n(z)$ – добові витрати теплоти через зовнішні огороження та на нагрів вентиляційного повітря і інфільтрацію відповідно; $q_{\text{над}}^n$ – добові надходження теплоти від побутових джерел. Величини $q_{\Sigma}^n(z)$, $q_{\text{інф}}^n(z)$, $q_{\text{над}}^n$, кВт·год/м², обчислюються так:

$$q_{\Sigma}^n(z) = 0.024k_{\Sigma\text{пр}} [t_b - t_3^n(z)] F_{\Sigma} / F_h, \quad (9)$$

$$q_{\text{інф}}^n(z) = 0.024k_{\text{інф}}(z) (1 - \kappa_{\text{рек}}) [t_b - t_3^n(z)] F_{\Sigma} / F_h, \quad (10)$$

$$q_{\text{над}} = 24z_{\text{оп}} q_{\text{поб}} \nu \zeta, \quad (11)$$

де

$$k_{\text{інф}}(z) = 0.278c n_{\text{об}} \nu V_h \gamma_3(z) \eta / F_{\Sigma},$$

$$\gamma_3(z) = \frac{353}{273 + 0.5 [t_b + t_3^n(z)]}.$$

Якщо приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma\text{пр}} < 8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, результати розрахунків за нормативним (3)–(6) та уточненим (8)–(11) методами дуже близькі. При $R_{\Sigma\text{пр}} > 8 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ урахування сезонної зміни теплових витрат помітно впливає на одержаний розв'язок. На рис. 8 наведено питомі витрати теплоти на опалення протягом року $q_{\text{буд}}$, кВт·год/м², а на рис. 9 – частка побутових надходжень теплоти відносно загальних тепловитрат будинку $\bar{q}_{\text{над}}$. Витрати енергії на опалення зменшуються до 10кВт·год/м² при $R_{\Sigma\text{пр}} = 8.7 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Стандарт „будинку нульової енергії” ($q_{\text{буд}} = 0$, $\bar{q}_{\text{над}} = 1$) досягається при $R_{\Sigma\text{пр}} = 15 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. У цьому випадку навіть у саму холодну добу року витрати теплоти на опалення повністю компенсуються з побутових джерел.

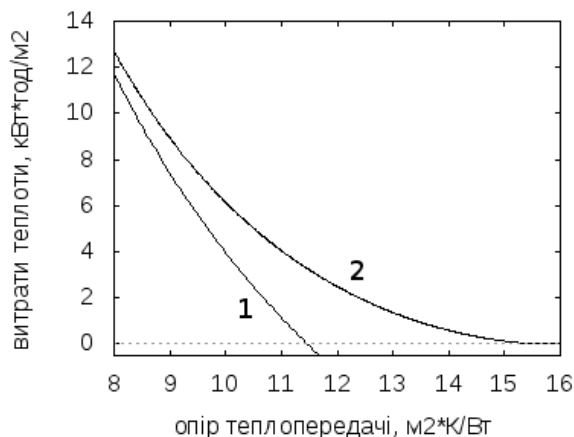


Рис. 8. Витрати теплоти на опалення: 1 – нормативний метод, 2 – уточнений метод
The heat consumption: 1 – standard solution, 2 – specified solution

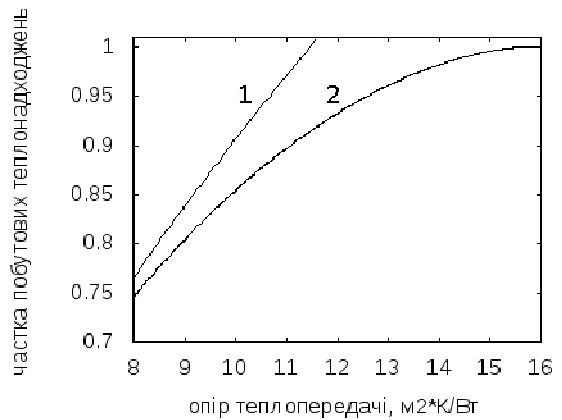


Рис. 9. Частка побутових надходжень теплоти відносно загальних тепловитрат будинку: 1 – нормативний метод, 2 – уточнений метод
The rate of the heat gains form domestic sources: 1 – standard solution, 2 – specified solution

5. Висновки

В роботі запропоновано новий метод розрахунку енергетичних показників житлових та громадських будівель. Як приклад, розглянуто житловий будинок із матеріалів органічного походження у м. Київ. Проведено аналіз теплозахисних властивостей зовнішніх огорожень та надано рекомендації щодо раціонального проектування теплоізоляційної оболонки енергоефективних будівель. Запропоновано нову математичну модель, що описує сезонні зміни температури зовнішнього повітря. Обчислено витрати енергії на опалення з урахуванням рекуперації вторинної теплоти витяжного повітря та зміни режиму теплоспоживання протягом опалювального періоду. Одержані результати дозволяють визначати оптимальний комплекс заходів енергозбереження та виконувати уточнені розрахунки енергетичних показників будівель.

Робота виконана в рамках науково-дослідної програми Міністерства освіти та науки України „Розробка наукових засад трансформації будівель та житлових комплексів сучасних великих міст України на основі інноваційних екотехнологій”; державний реєстраційний номер 0115U000218.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Мхитарян М.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. – К.: Наукова думка, 2000. – 420 с.
Mhitarjan M.M. Jenergosberegajushhie tehnologii v zhilishhnom i grazhdanskom stroitel'stve [Energy

- conservation technologies in Civil Engineering]. – К.: Naukova dumka, 2000. – 420 pp.
2. Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. – М.: Стройиздат, 1985. – 351 с.
Hajnrüh G., Najork H., Nestler V. Teplonasosnye ustanovki dlja otoplenija i gorjachego vodosnabzhenija [Heat pumps for heating and water supply systems]. – М.: Strojizdat, 1985. – 351 pp.
 3. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
Rej D., Makmajkl D. Teplovyje nasosy [Heat pumps]. – М.: Jenergoizdat, 1982. – 224 pp.
 4. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Аvezов Р.Р., Барский-Зорин М.А., Васильева И.М. и др.; под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.
Sistemy solnechnogo teplo- i hladosnabzhenija [Solar heat and cold supply systems] / Avezov R.R., Barskij-Zorin M.A., Vasil'eva I.M. i dr.; pod red. Je.V. Sarnackogo i S.A. Chistovicha. – М.: Strojizdat, 1990. – 328 pp.
 5. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
Harchenko N.V. Individual'nye solnechnye ustanovki [Individual solar systems]. – М.: Jenergoatomizdat, 1991. – 208 pp.
 6. ДБН В.2.6-31: 2006. Теплова ізоляція будівель. – К.: Укразбудінформ, 2006. – 65 с.
DBN V.2.6-31: 2006. Teplova izoljacija budivel' [Thermal insulation of buildings]. – К.: Ukrarhbudininform, 2006. – 65 pp.
 7. СНиП 2.04.05-91*У. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – К.: КиевЗНИИЭП, 1996. – 89 с.
SNiP 2.04.05-91*U. Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie [Heating, ventilation and air conditioning]. – К.: KievZNIIEP, 1996. – 89 pp.
 8. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.
DSTU-N B V.1.1-27:2010. Budivel'na klimatologija [Civil Engineering Climatology]. – К.: Minregionbud Ukraïni, 2011. – 123 pp.
 9. Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, European Committee for Standardization, 2008.
 10. Ievgenii Iurchenko, Olena Koval, Mykola Savytskyi and Karim Limam / Economic Feasibility Evaluation of Building Passive // Journal of Energy and Power Engineering Houses Volume 8, Number 6, June 2014 (Serial Number 79) 1047-1053. ISSN1934-8975 USA <http://www.davidpublishing.org>, www.davidpublishing.com.
 11. Savytskyi M., Iurchenko Iev., Koval O., Babenko M. / Development of low-rise energy-efficient construction in Ukraine // ECCE-GSCE-WCCE International Conferens Seismics-2014, #59. Tbilisi, Georgia, 14 p. 5-11 http://www.ecceengineers.eu/news/2014/59_Intl_Conf_Seismic_design_papers.pdf
 12. Iurchenko Iev.L. Development of the energy saving projects in the buildings of budget organizations on the basis of reinvestment. – Manuscript: 05.13.22 / Iurchenko Iev.L. – Dnipropetrovsk, 2004. – 180p.
 13. Koval O.O. Energy efficiency of low-rise residential buildings of architectural constructive systems. – Manuscript: 05.23.01. / Koval O.O.– Dnipropetrovsk, 2012. – 152p.
 14. Iurchenko Iev. Economic feasibility of energy-efficient and passive house construction in Ukraine / Iurchenko Ie.L., Koval O.O., Savytskyi M.V. // Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers Issue№68. – Dnipropetrovs'k, PSAES, 2013. - p. 462 – 468. <http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences> /eco/archive/vipusk_68_2013.pdf

Статья поступила в редколлегию 06.04.2015