

**ОЦІНКА ВПЛИВУ СПОСОБІВ БАЛАНСУВАННЯ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ
НА ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ТА ЕКОНОМІЮ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ БУДІВЛЕЮ
ЗВО***

Є. О. Антипов, кандидат технічних наук, доцент

В. Г. Горобець, доктор технічних наук, професор

Н. А. Сподинюк, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: ievgeniy_antypov@ukr.net

Анотація. При порівнянні ефективності балансування однотрубних систем опалення будівлі та оцінки її впливу на економію теплової енергії будівлею закладу вищої освіти (ЗВО) була складена та охарактеризована модель теплового режиму будинку як єдиної теплоенергетичної системи з урахуванням трьох її підсистем: моделі теплоенергетичного впливу зовнішнього клімату на будівлю (η_1), моделі теплоенергетичного впливу теплової інерції оболонки будівлі (η_2) та моделі теплоенергетичного впливу інженерних систем будівлі (η_3). Для оцінки забезпеченості заданих показників на основі моделей теплоенергетичного впливу введено коефіцієнт забезпеченості $K_{3(PD)}$ (project deviation), який показує (в частках одиниці) відхилення згаданих показників від розрахункових умов та характеризує ступінь відмінності реалізованого рішення від оптимального і є показником теплоенергетичної ефективності проектного рішення у цілому. Наведено отриману економію теплової енергії при застосуванні різних варіантів автоматичного балансування – для однотрубної системи з постійним гідравлічним режимом та окремо для однотрубної систем опалення зі змінним гідравлічним режимом.

Встановлено, що зі збільшенням величини внутрішньої теплоємності будівлі, менш відчутним стає зменшення питомого споживання енергії будівлею ЗВО порівняно із менш масивними будівлями (легкої та дуже легкої конструкції). Так, для будівель із показником внутрішньої теплоємності будівлі $C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, питомий показник зниження енергоспоживання будівлею ЗВО становить 0,8 тис. $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$, тоді як для будівель із показником внутрішньої теплоємності будівлі $C = 80 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $C = 25 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ - питоме зниження енергоспоживання будівлею склало 1,0 тис. $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ та 1,1 тис. $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ в рік відповідно.

* Стаття підготовлена в рамках виконання проекту Національного фонду досліджень України «Інформаційна технологія енергоаудиту будівель як складова енергетичної безпеки країни» (договір від 01.08.2023 р. № 154/0048)

Показано, що рівень економії спожитої енергії після балансування системи опалення для будівлі дуже легкої конструкції (показник внутрішньої теплоємності будівлі $C = 25 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) склав 2 %, для будівель важкої та дуже важкої конструкцій (показник внутрішньої теплоємності будівлі $C = 80 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ відповідно) – 2,2 %.

Ключові слова: система опалення, тепловий режим, теплова інерція, показник забезпеченості, параметри мікроклімату

Актуальність. Однією з найважливіших вимог до сучасних будівель є рівень їх енергетичної ефективності [1], тобто мінімальних витрат енергії на підтримку теплового комфорту в приміщеннях, у нерозривному зв'язку з автоматичним регулюванням систем опалення [2]. Зазначене викликано, перш за все, розумінням та практичним підтвердженням суттєвої ролі автоматичного регулювання у зниженні теплоспоживання будівель та доведення його до нормованого значення [3]. Щоб виконати необхідні вимоги щодо забезпеченості внутрішніх параметрів мікроклімату приміщень [4], необхідно правильно спроектувати теплозахисні властивості зовнішніх огорожень, розрахувати теплову потужність системи опалення, відправним моментом в якому будуть розрахункові зовнішні умови [5]. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень залежать від їх функціонального призначення і санітарного гігієнічних вимог. Для більшості житлових і громадських будівель ці умови приблизно однакові. При цьому визначальним фактором підвищення рівня енергоефективності будівлі є дослідження взаємовпливу згаданих параметрів з урахуванням положень [6, 7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати дослідження впливу теплової інерції приміщення наведено в статті [8], де врахування показника внутрішньої теплоємності будівлі на прикладі навчально-адміністративного корпусу Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України), дозволяє уникнути перевитрат енергії на рівні близько 10-12 %. У цьому напрямку авторами В. Дешко., І. Білоус, Н. Буяк., О. Голубенко., М. Гурєєв досліджено зміну умов комфортності приміщень від інерційності зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі при роботі системи опалення в енергоощадних режимах [9], а також залежність умов комфортності громадських

будівель з різним ступенем теплового захисту зовнішніх огорожувальних конструкцій в умовах роботи системи опалення споруди в черговому режимі [10], його вплив на динаміку енергопотребі. Крім того, авторами А. Есмаїлзаде, М. Закерзаде, А. Юсефі Кома також вводиться поняття контролю теплового комфорту будівлі [11]. Авторами В. Наливайко, Радько, А. Жильцов, О. Окушко, А. Міщенко, Є. Антипов проведено дослідження теплового комфорту будівлі після її термомодернізації з використанням відновлюваної енергії [12] та з урахуванням положень відповідних стандартів, норм та методик [13-15].

Схема взаємодії елементів будівлі, як енергетичної системи, наведена на рис. 1. Основний вплив на формування теплового комфорту і, відповідно, рівня енергетичної ефективності будівлі здійснює її теплоізоляційна оболонка, від властивостей якої залежить вибір параметрів підсистеми опалення.

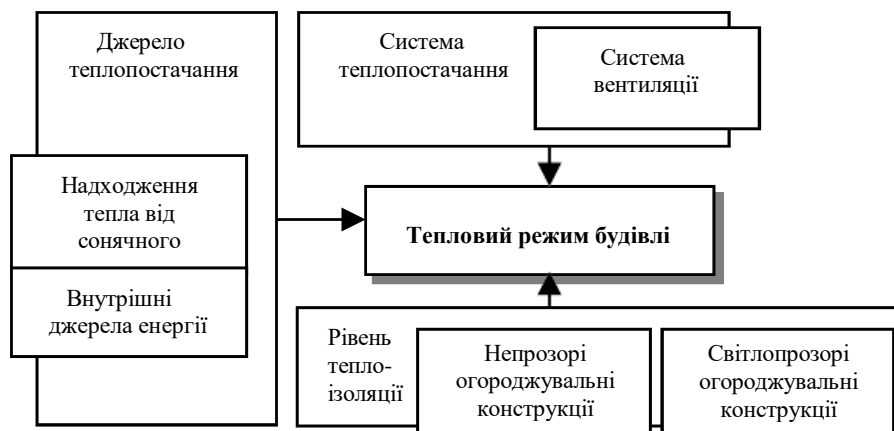


Рис. 1. Взаємодія основних підсистем будівлі з точки зору їх впливу на рівень енергоефективності [16]

Відповідно до методології системного аналізу модель теплового режиму будівлі, як єдиної теплоенергетичної системи, доцільно представити у вигляді трьох взаємопов'язаних моделей, більш зручних для вивчення (рис. 2).



Рис. 2. Модель теплового режиму будівлі

З урахуванням прийнятого поділу моделі теплового режиму будинку як єдиної теплоенергетичної системи на три взаємозалежних підмоделі можна записати:

$$Q_{np} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, \quad (1)$$

де: η_1 – показник теплоенергетичної ефективності впливу зовнішніх кліматичних параметрів (температура, швидкість та напрям вітру, рівень сонячної радіації) на будівлю; η_2 – показник теплоенергетичної ефективності оптимального вибору тепло- і сонцезахисних характеристик зовнішніх огорожувальних конструкцій, а також їх масивності; η_3 – показник теплоенергетичної ефективності оптимального вибору систем забезпечення мікроклімату та рівня їх автоматизації.

Під час модернізації систем забезпечення мікроклімату приміщень найбільше проблем виникає саме з однотрубними системами опалення, тому саме на їх прикладі доцільно більш детально розглянути та оцінити їх вплив на загальний показник енергетичної ефективності будівлі ЗВО. Причини підвищеного енергоспоживання однотрубних систем розглянуто та підтверджено математичним моделюванням динамічного режиму їх роботи [17 – 21]. Для однотрубної системи виявилось недостатнім застосування лише гідравлічного способу балансування як для двотрубної. В однотрубній системі виявилось недостатнім застосування не тільки статичного (ручними вентилями, шайбами, діаметрами трубопроводів) балансування, а й автоматичної стабілізації витрати у стояках (приладових гілках). Стабілізація гідравлічного режиму, яку забезпечували фахівці як західних, так і східних країн в останнє десятиліття, зробила вагомий позитивний внесок у енергоефективність, проте не вирішила всіх проблем. Не вирішила найголовнішу з них – забезпечення теплової стійкості системи, яка потребує зміни не тільки температури, а й витрати теплоносія в стояках (приладових гілках) однотрубної системи при зміні зовнішньої температури повітря.

Нині вже вирішили цю проблему і повсюди її усувають при модернізації однотрубних систем шляхом автоматичного регулювання витрати і температури теплоносія, що повертається зі стояків (приладових гілок) системи. Найбільш поширений на території країн західної Європи та СНД спосіб регулювання однотрубної системи – автоматичне обмеження витрати і регулювання за

температурним графіком теплоносія, що повертається в стояках. Це рішення найбільш енергоефективне, яке впритул наблизило енергоспоживання до двотрубних систем. Широко застосовують також обмеження витрати зі стабілізацією температури теплоносія в стояках однотрубною системою. Цей спосіб дещо дешевше, але й енергоефективність його дещо нижча.

Для оцінки забезпеченості заданих показників введемо коефіцієнт забезпеченості $K_{з(РД)}$ (project deviation), який показує (в частках одиниці) відхилення згаданих показників від розрахункових умов та характеризує ступінь відмінності реалізованого рішення від оптимального і є показником теплоенергетичної ефективності проектного рішення у цілому:

$$K_{з(РД)} = \frac{Q_{ем,ls}}{Q_{пр}}, \quad (2)$$

де $Q_{ем,ls}$ - розрахункова витрата енергії системою опалення на створення мікроклімату в приміщеннях енергоефективної будівлі; $Q_{пр}$ - витрата енергії на створення мікроклімату в приміщеннях енергоефективної будівлі, прийнятого до проектування.

Мета дослідження - проаналізувати вплив інженерних систем будівлі на тепловий режим та економію теплової енергії будівлею ЗВО за умови доведення рівня їх автоматизації до мінімально допустимого рівня «С», який визначено положенням [1-4, 6, 7].

Матеріали і методи дослідження. *Модель теплоенергетичного впливу зовнішнього клімату на будівлю (η_1).* У разі застосування місцевого, пофасадного або індивідуального регулювання систем опалення слід враховувати всю сукупність показників, які формують тепловий режим будівлі, його окремих фасадів, приміщень. Це сукупність кліматичних параметрів, внутрішніх виділень і поглинань тепла, теплозахисні властивості огорожень. При розрахунку передачі тепла через огороження дію цих параметрів необхідно враховувати спільно: для зими визначальними параметрами клімату, наприклад, є температура зовнішнього повітря $t_{з,н}$, і швидкість вітру v . У деяких розрахунках додатково до них слід враховувати відносну вологість φ , і ентальпію i , зовнішнього повітря, а також сонячну радіацію,

напряму вітру, опади. Деякі з цих параметрів пов'язані між собою, і зміна одного з них супроводжується певною зміною іншого. Наприклад, похолодання для більшості районів країни з континентальним кліматом пов'язане зі зниженням швидкості вітру, яку приймають рівною максимальній швидкості з середніх швидкостей вітру за румбами за січень, повторюваність яких складає 16 % і більше, з коригуванням на висоту будівлі [5]. Характеристики опалювального періоду при цьому будуть різні для різних будівель і навіть фасадів та окремих приміщень в одній будівлі в одному географічному районі.

Гармонійний характер зміни кліматичних параметрів (температури і ентальпії зовнішнього повітря, інтенсивності сонячної радіації) дозволяє визначити їх функцією пори року у вигляді тригонометричного ряду. При цьому, достатня точність досягається найпростішою апроксимацією двох перших членів ряду, якою тут і обмежено розгляд [22]:

$$y = y_p + A_y \cos \bar{z}, \quad (3)$$

де y_p - середньорічне значення параметра; A_y - річна амплітуда його зміни; \bar{z} - відносний час річної зміни параметра

$$\bar{z} = \frac{z}{365} 2\pi, \quad (4)$$

де $z = z' - z^{max}$ - місцевий час, діб, від моменту досягнення параметром максимуму; z' - теж, відрахований від 1 січня; z^{max} - час досягнення параметром максимального значення, відрахований від 1 січня.

Значення величин y_p , A_y , z^{max} для різних кліматичних параметрів і географічних районів можуть бути отримані за допомогою обробки даних спостережень. У [5] наведені середньорічні значення амплітуди зміни і час досягнення максимуму температури зовнішнього повітря $t_{3,n}$ його ентальпії i , та інтенсивності сумарної сонячної радіації q на горизонтальну і вертикальну поверхні різної орієнтації.

За допомогою формули (3), аналогічно формулі (5), можна знайти тривалість Δz стояння в році параметрів клімату вище заданого значення, як зворотну тригонометричну функцію цього значення [22]:

$$\Delta z = \frac{365}{\pi} \arccos(y - y_p) / A_y. \quad (5)$$

Однак у ряді випадків виникає необхідність визначення тривалості стояння параметра y , коли його значення виходить за межі середньомісячних. Так, ряд перехідних процесів регулювання систем опалення або кондиціонування повітря приміщень протікають в періоди, яким відповідають параметри, близькі до мінімальних та максимальних значень, відповідно. У цьому випадку доводиться відмовлятися від опису річної зміни, за допомогою середньомісячних значень і переходити до використання параметрів клімату в періоди їх мінімальних та максимальних значень. Змінність всієї сукупності значень параметра можна визначити за допомогою статистичних функцій розподілу цих значень протягом року.

У [5] показані температура і ентальпія повітря, відповідні різній тривалості їх стояння для різних регіонів та міст розташування об'єкта проектування. Криві розподілу параметрів клімату за формулою близькі до синусоїди. Тому в межах, де така апроксимація справедлива, синусоїда має амплітуду, рівну $365/2$ діб, а чверть її періоду Δy_3 дорівнює зміні параметра від середньорічного $y_{3,p}$ до екстремального (максимального) $\Delta y_{3,extr,max}$ або мінімального $\Delta y_{3,extr,min}$ його значення. Слід особливо звернути увагу, що згідно із законом синуса в цьому випадку змінюється час z при зміні параметра y_3 з періодом, що дорівнює $4\Delta y_3$:

$$z = \frac{365}{2} - \frac{365}{2} \sin \frac{2\pi}{4\Delta y_3} (y_3 - y_{3,p}), \quad (6)$$

де $\Delta y_3 = (\Delta y_{3,extr} - y_{3,p})$ - чверть періоду; $y_{3,p}$ - середньорічне значення параметра; $y_{3,extr}$ – теж саме, екстремальне (для максимального і для мінімальних значень).

Позначивши

$$\bar{y}_3 = \frac{y_3 - y_{3,p}}{\Delta y_3} \quad (7)$$

і виразивши Δz в годинах, отримаємо приблизну аналітичну функцію тривалості стояння значень параметра зовнішнього клімату вище заданого y_3 :

$$\Delta z = 4,38 \cdot 10^3 \left(-\sin \frac{\pi}{2} \bar{y}_3 \right). \quad (8)$$

Для визначення тривалості стояння значень параметрів зовнішнього повітря нижче заданого необхідно змінити у формулі (8) знак мінус на плюс.

Слід зауважити, що відхилення від середньорічних значень максимальних і мінімальних значень $y_{z,extr}$ можуть бути різними, тому в рівнянні (7) Δy_z слід визначати окремо для значень великих (річна, зимова піврічна різниця $\Delta y_{z,extr,max}$) і менших (зимова піврічна різниця $\Delta y_{z,extr,min}$) середньорічного значення $y_{z,p}$. При наявності даних про ймовірну тривалість стояння Δz_{y_z} різних значень параметрів зовнішнього клімату значення Δy_z можуть бути визначені за формулою:

$$\Delta y_z = \frac{\sum_{y_{z,p}}^{y_{z,extr}} (y_z - y_{z,p}) \Delta z_{y_z}}{66,5}. \quad (9)$$

З огляду на логічний зв'язок між річним ходом зміни середньомісячних значень (3) і функцією річного розподілу параметра клімату (6) можна рекомендувати наближену залежність для визначення величин Δy_z :

$$\Delta y_z \approx 2A_{y_z}, \quad (10)$$

де A_{y_z} - амплітуда річного ходу зміни середньомісячних значень параметра y_z .

Значення Δz і $\overline{\Delta z}$ (в $\overline{\Delta z}$ величина Δz , год./рік, віднесена до $365 \cdot 24 = 8760$ год./рік) можна визначити за допомогою номограми [22].

Таким чином, беручи до уваги гармонійний характер річної зміни факторів, що впливають на теплообмін в приміщенні, тепловий режим приміщення можна представити у вигляді залежності

$$Q_n = Q_{n,p} + A_{Q_n} \cos \bar{z}, \quad (11)$$

де $Q_{n,p}$ - середнє значення (протягом року) гармонійно змінюваного теплового стану приміщення (надлишку або нестачі тепла); A_{Q_n} - амплітуда річного відхилення теплового стану приміщення від середнього.

Для спрощення будемо вважати, що річна зміна температури внутрішнього повітря наближається до гармонійного коливання. Відповідно з цим

$$t_b = t_{b,p} + A_{t_b} \cos \bar{z}. \quad (12)$$

Середньорічне значення температури внутрішнього повітря $t_{b,p}$ визначають як середнє між зимовим $t_{b,z}$ і літнім $t_{b,l}$ розрахунковими значеннями, а амплітуда A_{t_b}

дорівнює половині їх різниці. Час настання максимуму температури внутрішнього повітря збігається з часом досягнення максимуму теплонадходжень.

Враховуючи, що в опалювальний період тепловий баланс приміщення стає негативним (недостача тепла), тобто \bar{Q}_n , розв'язавши рівняння (11) можна визначити тривалість опалювального періоду $\Delta z_{оп}$, діб, як зворотну тригонометричну функцію [22]:

$$\Delta z_{оп} = \frac{365}{\pi} \arccos \bar{Q}_n = 116 \arccos \bar{Q}_n, \quad (13)$$

де \bar{Q}_n - безрозмірна величина

$$\bar{Q}_n = (Q_n - Q_{n,p}) / A_{Q_n}. \quad (14)$$

Формула (13) носить загальний характер. Вона може бути застосована і для розрахунку $\Delta z_{оп}$ при центральному регулюванні системи опалення від t_3 . Так як тривалість опалювального періоду при цьому визначається як частина року з $t_3 < 8^\circ C$, формула (14) набуває вигляду

$$\bar{t}_3 = (t_{3,p} - 8) / A_{t_{3,p}}. \quad (15)$$

При цьому, значення $\Delta z_{оп}$ найближче відповідають величинам, наведеним в [5].

Очевидно, що витрата тепла на опалення у будь-який момент опалювального періоду визначається тепловим станом приміщення в цей же момент. Річні витрати тепла на опалення, можна уявити як інтегральну суму мінливого протягом опалювального періоду теплового стану приміщення [22]:

$$Q_{оп,p} = \int Q_n dz = 0,143mn' A_{Q_n} \left(116 \sin \frac{1}{2} \Delta \bar{z} - \bar{Q}_n \Delta z_{оп} \right); \quad (16)$$

де m – число годин роботи системи опалення на добу; n' - число днів роботи системи опалення в тиждень.

У звичайному інтервалі зміни \bar{Q}_n (від - 0,6 до + 0,6) зручно користуватися наближеною формулою, яка дає досить точний результат [22]:

$$Q_{оп,p} = 0,143mn' A_{Q_n} [116 - \bar{Q}_n (91,2 + 0,5 \Delta z_{оп})]. \quad (17)$$

У [22] показана крива залежності $K_{оп} = f(\bar{Q}_n)$, побудована за формулою

$$K_{оп} = 116 \sin \frac{1}{2} \Delta \bar{z} - \bar{Q}_n \Delta z_{оп}. \quad (18)$$

З урахуванням її формула (16) набуває вигляду

$$Q_{\text{оп,р}} = 0,143143mn' A_{Q_{\text{п}}} K_{\text{оп}}. \quad (19)$$

Розрахунок витрати тепла на вентиляцію і тривалість її роботи може бути виконаний аналогічно розглянутому для опалення. При цьому, річні витрати тепла на опалення і вентиляцію приміщення і тривалість роботи цих систем можуть бути визначені з урахуванням коефіцієнта забезпеченості $K_{з(РД)}$, визначеного за формулою (2).

Модель теплоенергетичного впливу теплової інерції оболонки будівлі (η_2). Тут особлива увага, безумовно, має бути спрямована на термомодернізацію будівель з метою доведення наявного рівня опорів теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій до нормованих значень R_{qmin} , які визначені положенням діючих норм [7]. Для спрощення подальших розрахунків приймаємо, що для різних кліматичних умов нашої країни (наприклад, для I-ї та II-ї температурних зон), відповідно до [5], приведені опори теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій $R_{\Sigma np}$, повністю задовольняють вимоги таблиці 1 [7]. Таким чином, з урахуванням зазначеного, а також раніше прийнятого поділу моделі теплового режиму будинку як єдиної теплоенергетичної системи показник теплоенергетичної ефективності в частині оптимального вибору тепло- і сонцезахисних характеристик зовнішніх огорожувальних конструкцій - $\eta_2 = 1$, за умови що:

$$R_{\Sigma np} \geq R_{qmin}, \quad (20)$$

де $R_{\Sigma np}$ — зведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції (для термічно однорідних огорожувальних конструкцій визначається опір теплопередачі), зведений опір теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Показник теплоенергетичної ефективності в частині впливу масивності огорожувальних конструкцій далі буде розглянуто разом із наступною моделлю з урахуванням значень температур зовнішнього повітря, залежно від внутрішньої теплоємності будівлі, визначеної за [23], які наведені у таблиці 2.

1. Мінімально допустиме значення зведеного опору теплопередачі огорожувальної конструкції житлових та громадських будівель R_{qmin}

№ з/п	Вид огорожувальної конструкції	Значення R_{qmin} , $m^2 \cdot K/Wt$, для температурної зони	
		I	II
1	Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	4,00	3,50
2	Суміщені покриття, що межують із зовнішнім повітрям	7,00	6,00
3	Покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалюваних горищ	6,00	5,50
4	Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям, та над неопалюваними підвалами	5,00	4,00
5	Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,90	0,70
6	Зенітні ліхтарі	0,80	0,70
7	Зовнішні двері	0,70	0,60

2. Національні значення для внутрішньої теплоємності

Клас	Внутрішня теплоємність будівлі, $Wt \cdot год/(m^2 \cdot K)$	Температура зовнішнього повітря, °C, яка приймається за розрахункову
Дуже легкий	25	$t_{з.п.min}$
Легкий	35	$t_{з.п.1}^{0,98}$
Середній	50	$t_{з.п.1}^{0,92}$
Важкий	80	$\frac{t_{з.п.1}^{0,92} + t_{з.п.5}}{2}$
Дуже важкий	110	$t_{з.п.5}$

Модель теплоенергетичного впливу інженерних систем будівлі (η_3).

Ефективність використання теплової енергії системою опалення представлена в європейській нормі *prEN15316-2-1:2007 Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 2-1: Space heating emission systems* (Системи опалення будівель. Метод розрахунку необхідної енергії та ефективності систем. Системи центрального опалення), яка переглянута та введена у дію нова редакція [24]. У ній було рекомендовано два альтернативні розрахункові методи:

- метод використання ефективності, адаптований із німецького стандарту DIN 18599;

- метод використання перевищення внутрішньої температури повітря, адаптований із французького стандарту RT2005.

Зосередимо увагу на методі використання ефективності, що найбільше охоплює різноманітність проектних рішень. У цьому методі визначено енергоефективність значущих конструктивних особливостей системи опалення, виражених через коефіцієнти. Аналогічний підхід використано і у введеному в дію з 01.03.2023 року національному стандарті ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання» [23].

Розрахункова витрата теплової енергії системою опалення на створення мікроклімату в приміщеннях будівлі $Q_{em,ls,piч}$ за опалювальний період залежно від ступеня деталізації факторів, що впливають на енергоефективність системи [23, 25] – устаткування, схемного рішення, засобів регулювання, характеристик опалювального приміщення, визначають за рівнянням:

$$Q_{em,ls,piч} = \frac{f_{hydr} \cdot f_{im} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} \cdot \sum_{i=1}^n [Q_k - (Q_{вн} + Q_s)v], \quad (21)$$

де: f_{hydr} – коефіцієнт, що враховує виконання гідравлічного балансування системи; f_{im} – коефіцієнт, що враховує застосування періодичного теплового режиму приміщення; f_{rad} – коефіцієнт, що враховує вплив променистого теплообміну; η_{em} – узагальнюючий коефіцієнт, що враховує умови тепловіддачі системи та визначається за формулою:

$$\eta_{em} = \frac{1}{(4 - \eta_{str} - \eta_{ctr} - \eta_{rad})}, \quad (22)$$

η_{str} – коефіцієнт, що враховує вплив градієнту (стратифікації) температури повітря у приміщенні; для деяких систем є середньоарифметичним таких коефіцієнтів: η_{str1} – враховує температуру теплоносія та η_{str2} – враховує умови встановлення опалювального приладу; η_{ctr} – коефіцієнт, що враховує застосований вид регулювання температури повітря у приміщенні; η_{emb} – коефіцієнт, що враховує теплонадходження в опалювальне приміщення від вбудованих нагрівальних елементів (для панельно-променистих систем); для деяких систем є

середньоарифметичним таких коефіцієнтів: η_{emb1} – враховує тип панельно-променистої системи та η_{emb2} – враховує теплоізоляцію панельно-променистої системи до суміжних приміщень; n – кількість повних та неповних i -тих місяців опалювального періоду; Q_k – загальні тепловтрати будівлі через ороджувальні конструкції в i -му місяці опалювального періоду, кВт·год.; $Q_{вн}$ – внутрішні теплонадходження у i -му місяці опалювального періоду, кВт·год.; Q_s – теплонадходження через вікна та інші світлопрозорі огорожувальні конструкції будівлі від сумарної сонячної радіації (прямої та розсіяної) за середніх умов хмарності в i -тому місяці опалювального періоду, кВт·год.; ν - коефіцієнт утилізації теплопритоків:

- для будівель без автоматичного забезпечення регулювання температури повітря в приміщеннях $\nu = 0$;

- для будівель з автоматичним забезпеченням регулювання температури повітря в приміщеннях визначають відповідно до рис. 3 [26], за критерієм теплової інерції D , який визначають згідно з алгоритмом, який наведено у Додатку Г ДСТУ-Н Б В.2.6-190.

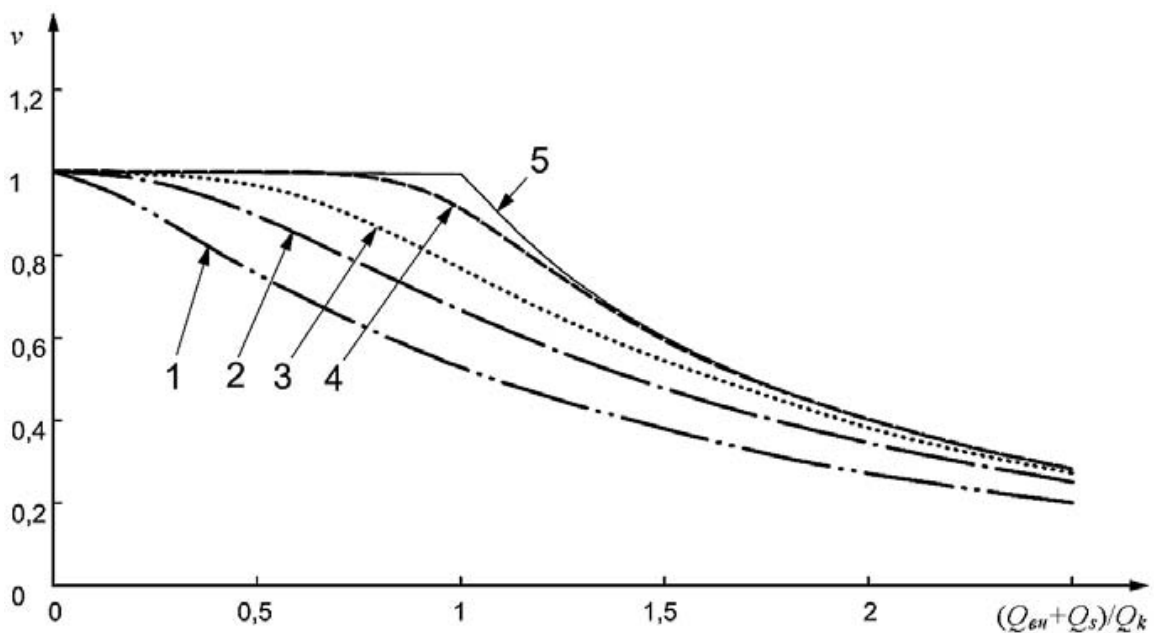


Рис. 3. Коефіцієнт утилізації теплопритоків [26] для будівель з тепловою інерцією D :

1 – $D \leq 1,5$; 2 – $D = 2,3$; 3 – $D = 3,2$; 4 – $D \geq 4$; 5 – ідеальна крива

Результати дослідження та їх обговорення. При проведенні розрахунків для порівняння ефективності балансування однотрубних систем опалення будівлі та оцінки її впливу на економію теплової енергії будівлею закладу вищої освіти (ЗВО), з використанням формул (1) - (22), прийнято:

- будівля закладу вищої освіти, з водяною системою опалення з опалювальними приладами (радіатор, конвектор та ін.) та приміщеннями висотою до 4 м;
- на опалювальних приладах встановлені терморегулятори з П-регулюванням (2 К), температурний напір – 60 К (наприклад, 90/70);
- опалювальні прилади встановлені під вікнами з радіаційним захистом (див. таблицю 17 [23]);
- температурна зона розміщення будівлі – I;
- всі опори теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій відповідають умові (20) та задовольняють діючі норми [7].

Коефіцієнти до формул (21) і (22) залежно від факторів енергоефективності, представлені в таблицях 3 і 4.

У таблиці 4 (передостання колонка таблиці), наведена отримана економія теплової енергії при застосуванні різних варіантів автоматичного балансування – для однотрубною системи з постійним гідравлічним режимом та окремо для однотрубною систем опалення зі змінним гідравлічним режимом. За базові варіанти порівняння прийнято незбалансовані системи.

3. Ефективність вільнообтічних нагрівальних поверхонь (радіатори); приміщення заввишки не більше ніж 4 м

Впливовий чинник		Складові загального рівня ефективності			
		η_{str1}	η_{str2}	η_{ctr}	η_{emb}
Регулювання температури повітря приміщення	Відсутнє			0,86	
	За усередненої (характерної) температури повітря приміщень будівлі			0,88	
	П-регулювання * (2 К ^{**})			0,93	
	П-регулювання * (1 К ^{**})			0,95	
	ПІ-регулювання***			0,97	
	ПІ-регулювання*** з оптимізацією (наприклад, наявність диспетчеризації, адаптованого контролю)			0,99	
Температурний напір (за температури повітря 20 °С)	60 К (наприклад, 90/70)	0,88			
	42,5 К (наприклад, 70/55)	0,93			
	30 К (наприклад, 55/45)	0,95			
Специфічні тепловтрати через зовнішні огородження	Опалювальний прилад встановлено біля внутрішньої стіни		0,87		1
	Опалювальний прилад встановлено біля зовнішньої стіни:				
	- вікно без радіаційного захисту;		0,83		1
	- вікно з радіаційним захистом;		0,88		1
	- звичайна стіна		0,95		1
* Пропорційне регулювання.					
** Точність регулювання температури (у градусах Кельвіна).					
*** Пропорційне інтегральне регулювання					

4. Вплив способу балансування системи опалення на економію теплової енергії

Система	Фактор, що впливає	Коефіцієнт врахування гідравлічного балансування системи f_{hydr}	Економія енергії
Однотрубна (постійний гідравлічний режим)	Система не налагоджена. Відсутня балансувальна арматура на стояках (горизонтальних гілках) системи	1,09	Базовий варіант порівняння систем 0 %
	Система налагоджена. Наявна ручна балансувальна арматура на стояках (горизонтальних гілках)	1,07	8,3 %
	Система налагоджена. Наявні автоматичні регулятори (стабілізатори) витрати на стояках (горизонтальних гілках)	1,05	16,6 %
Однотрубна (змінний гідравлічний режим)	Система налагоджена. Наявні автоматичні регулятори (обмежувачі) витрати зі стабілізацією температури теплоносія на виході зі стояка (горизонтальної гілки)	1,01	33,1 %
	Система налагоджена. Наявні автоматичні регулятори (обмежувачі) витрати з регулюванням температури теплоносія на виході зі стояка (горизонтальної гілки) за температурним графіком	1,00	8,3 %

Нижче, на рис. 4-5, наведені графічні залежності, які враховують вплив внутрішньої теплоємності будівлі, визначеної за [23], і способів балансування системи опалення на тепловий режим та економію теплової енергії будівлею ЗВО. За базовий варіант порівняння прийнято однотрубну неналагоджену систему.

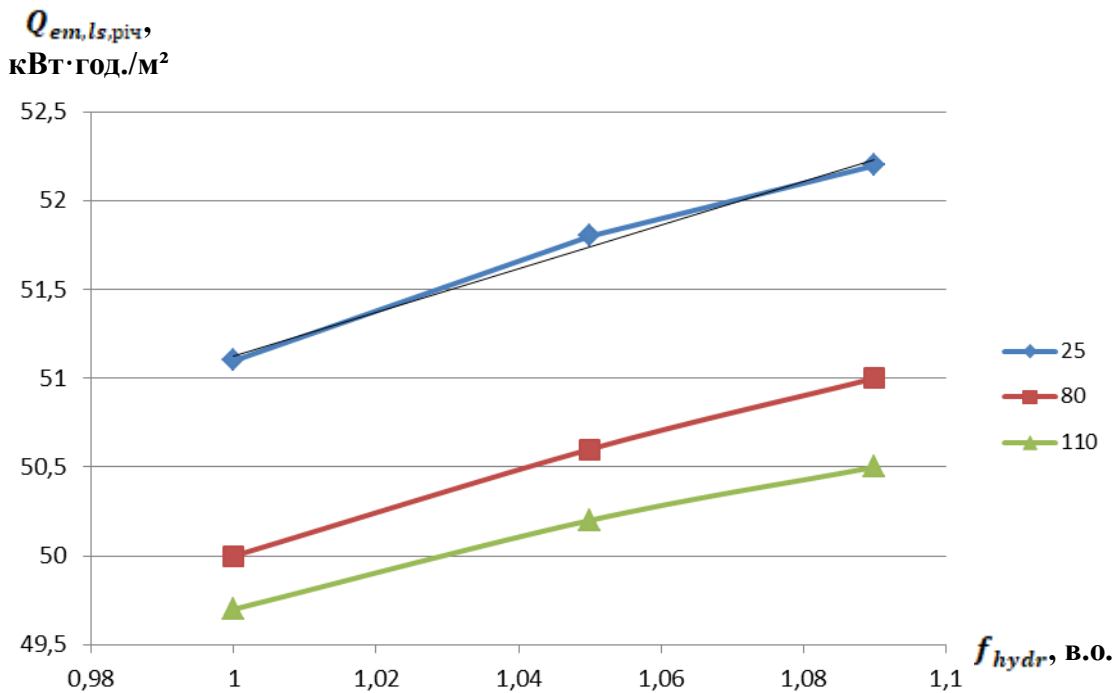


Рис. 4. Вплив внутрішньої теплоємності будівлі, визначеної за [23], і способів балансування системи опалення на тепловий режим будівлі ЗВО (за умови, що $K_{з(РД)} = 1,0$), $\text{Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$:
 — $C = 25$; — $C = 80$; — $C = 110$

Аналізуючи дані рисунку 4, можна стверджувати, що зі збільшенням величини внутрішньої теплоємності будівлі менш відчутним стає зменшення питомого споживання енергії будівлею ЗВО порівняно із менш масивними будівлями (легкої та дуже легкої конструкцій). Так, для будівель із показником внутрішньої теплоємності будівлі $C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ питомий показник зниження енергоспоживання будівлею ЗВО становить 0,8 тис. $\text{кВт} \cdot \text{год.} / \text{м}^2$, тоді як для будівель із показником внутрішньої теплоємності будівлі $C = 80 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $C = 25 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ - питоме зниження енергоспоживання будівлею склало 1,0 тис. $\text{кВт} \cdot \text{год.} / \text{м}^2$ та 1,1 тис. $\text{кВт} \cdot \text{год.} / \text{м}^2$ в рік, відповідно.

Зазначене ілюструють графіки оцінки впливу внутрішньої теплоємності будівлі і способів балансування системи опалення на економію теплової енергії будівлею ЗВО, які зображені на рис. 5.

У відсотковому вираженні рівень економії спожитої енергії після балансування системи опалення для будівлі дуже легкої конструкції (показник внутрішньої теплоємності будівлі $C = 25 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) склав 2 %, для будівель важкої та дуже важкої конструкцій (показник внутрішньої теплоємності будівлі $C = 80 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ відповідно) – 2,2 %.

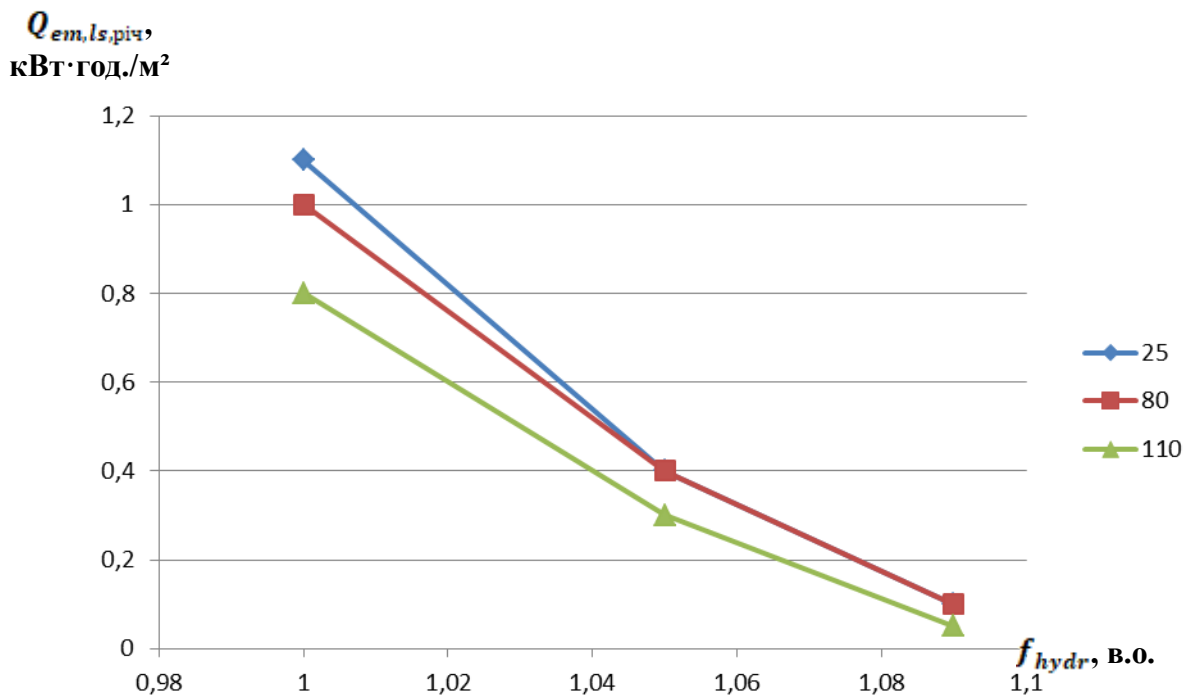


Рис. 5. Вплив внутрішньої теплоємності будівлі, визначеної за [23], і способів балансування системи опалення на економію теплової енергії будівлею ЗВО (за умови, що $K_{з(РD)} = 1,0$), $\text{Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

— $C = 25$; — $C = 80$; — $C = 110$

Різниця в однотипних варіантах гідравлічного балансування (неналагоджена з неналагодженою, ручна з ручною, автоматична з автоматичною) показує підвищення енергоспоживання однотрубною системою приблизно на 20 % порівняно з двотрубною, що підтверджено даними наведеними в [27]. Причина – квазіпостійний гідравлічний режим. Витрата теплоносія в стояках не зменшується при підвищенні зовнішньої температури повітря, як вимагає забезпечення теплової стійкості (див. рисунок 3). Результат – перегрівання приміщень (без

терморегуляторів на опалювальних приладах) та транзитний пропуск теплоносія із завищеною температурою у зворотний трубопровід (з/без будь-якої регулюючої арматури на опалювальних приладах). Цей недолік усувають змінним, а не постійним, гідравлічним режимом однотрубною системи – регулюванням витрати (обмеженням) у стояку за температурою теплоносія на виході з нього. Такий режим називають теплогідравлічним балансуванням. Застосовуючи його в однотрубній системі, приблизно досягають рівня енергоспоживання двотрубною системою [27]. По суті – це метод автоматичного гідравлічного налагодження стояків однотрубною системи як за витратою, так і за температурою теплоносія.

Уточнення: у таблиці 4 не передбачено способу автоматичного регулювання перепаду тиску в терморегуляторах або в електронних регуляторах на опалювальних приладах однотрубною системи, як це прийнято для двотрубною. Цей спосіб регулювання недоцільний для однотрубною системи. Він створює підвищений гідравлічний опір вузлів обв'язки опалювальних приладів і, як наслідок, призводить до суттєвого зростання гідравлічного опору всієї системи.

Висновки і перспективи. При проведенні розрахунків для порівняння ефективності балансування однотрубних систем опалення будівлі та оцінки її впливу на економію теплової енергії будівлею закладу вищої освіти проведено таке:

1. Складена та охарактеризована модель теплового режиму будинку як єдиною теплоенергетичною системою з урахуванням трьох її підсистем: моделі теплоенергетичного впливу зовнішнього клімату на будівлю (η_1), моделі теплоенергетичного впливу теплової інерції оболонки будівлі (η_2) та моделі теплоенергетичного впливу інженерних систем будівлі (η_3).

2. Для оцінки забезпеченості заданих показників введено коефіцієнт забезпеченості $K_{3(PD)}$ (*project deviation*), який показує (в частках одиниці) відхилення згаданих показників від розрахункових умов та характеризує ступінь відмінності реалізованого рішення від оптимального, і є показником теплоенергетичної ефективності проектного рішення у цілому.

3. Наведено отриману економію теплової енергії при застосуванні різних варіантів автоматичного балансування – для однотрубною системи з постійним

гідравлічним режимом та окремо для однотрубною систем опалення зі змінним гідравлічним режимом.

4. Встановлено, що зі збільшенням величини внутрішньої теплоємності будівлі, менш відчутним стає зменшення питомого споживання енергії будівлею ЗВО порівняно із менш масивними будівлями (легкої та дуже легкої конструкції). Так, для будівель із показником внутрішньої теплоємності будівлі $C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, питомий показник зниження енергоспоживання будівлею ЗВО становить 0,8 тис. кВт·год./ м^2 , тоді як для будівель із показником внутрішньої теплоємності будівлі $C = 80 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $C = 25 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ - питоме зниження енергоспоживання будівлею склало 1,0 тис. кВт·год./ м^2 та 1,1 тис. кВт·год./ м^2 в рік, відповідно.

5. Показано, що рівень економії спожитої енергії після балансування системи опалення для будівлі дуже легкої конструкції (показник внутрішньої теплоємності будівлі $C = 25 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) склав 2 %, для будівель важкої та дуже важкої конструкції (показник внутрішньої теплоємності будівлі $C = 80 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ відповідно) – 2,2 %.

Список використаних джерел

1. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27 жовтня 2020 року № 261 «Про затвердження Змін до Методики визначення енергетичної ефективності будівель», зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 17 грудня 2020 р. за № 1254/35537.

2. ДСТУ Б EN 15459:2014 Енергетична ефективність будівель. Процедура енергетичної оцінки систем будівель (EN 15459:2007, IDT).

3. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27 жовтня 2020 року № 260 «Про затвердження мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель», зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 18 грудня 2020 р. за № 1257/35540.

4. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

5. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія». Київ: Ministry of the Region of Ukraine. 2011. 130 р.

6. Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11 липня 2018 року № 169 «Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель», зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 16 липня 2018 р. за № 822/32274.

7. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель». Київ: Держстандарт України, 2022. 33 с.
8. Антипов Є. О., Міщенко А. В., Шеліманова О. В., Тарасенко С. Є. Аналіз впливу внутрішньої теплоємності будівлі ЗВО та погодозалежного регулювання ІТП на ефективність роботи системи опалення в черговому режимі. Енергетика і автоматика. 2021. №5. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.05.045>.
9. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Буяк Н. А., Голубенко О. О., Гурєєв М. В. Вплив теплоінерційних особливостей огорожень на умови комфортності при впровадженні енергоощадних режимів опалення в будівлях. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». Серія: технічні науки та архітектура. 2019. Т.3, вип. 149. С. 44–50.
10. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Буяк Н. А. Вплив переривчастих режимів опалення на динаміку енергопотреби та умови комфортності будівель з різним рівнем теплового захисту. Наукові вісті НТУУ КПІ. 2019. №4. С. 7–16.
11. Esmailzadeh A., Zakerzadeh M. R., & Yousefi Koma A. The Comparison of Some Advanced Control Methods for Energy Optimization and Comfort Management in Buildings. Sustainable Cities and Society. 2018. V. 43. P. 601–623. doi:10.1016/j.scs.2018.08.038.
12. Nalyvaiko V., Radko I., Zhylytsov A., Okushko O., Mishchenko A., Antypov I. Investigation of Thermal Modernized Building's Microclimate with Renewable Energy. ICoRES 2019. E3S Web of Conferences. 154, 07011, 2020.
13. DSTU В EN ISO 7730: 2011. Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriiv lokalnoho teplovoho komfortu. [Chynnyi vid 2013-01-01]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012. 74 s.
14. DSTU В EN 15251: 2011. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osvittlennia ta akustyky budivel. [Chynnyi vid 2013-07-01]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012. 71 s.
15. DSTU В EN 15261: 2012. Rozrakhunok parametriv mikroklimatu. [Chynnyi vid 2013-01-01]. Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2012. 81 s.
16. Демченко В. В., Чуприна Х. М., Невмержицький О. В. Методи підвищення енергоефективності будівлі. Управління розвитком складних систем. 2013. Вип. 16. С. 138-143. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2013_16_27.
17. Мілейковский В. А. Математичне моделювання змінного гідравлічного режиму однотрубних вертикальних систем водяного опалення. Данфосс INFO. 2011. № 3–4. С. 25-30.
18. Мілейковский В.А. Математичне моделювання змінного гідравлічного і теплового режимів приладових вузлів однотрубних вертикальних систем опалення. Данфосс INFO. 2012. № 1–2. С. 15-27.
19. Мілейковский В. А. Практичні рекомендації по результатам математичного моделювання змінного теплогідравлічного режиму однотрубних вертикальних систем опалення. Данфосс INFO. 2013. № 1-2 . С. 20-28.
20. Мілейковский В. А. Математичне моделювання залишкової теплопередачі

опалювальних приладів однокотлових вертикальних систем опалення. Данфосс INFO. 2013. № 3-4. С. 20-23.

21. Пирков В. В. Особливості розрахунку і проектування однокотлових систем опалення з урахуванням вимог нормативної документації та вимог по енергозбереженню. Данфосс INFO. № 1-2. 2013. С. 12-15.

22. Богословський В. М. Тепловий режим будівлі. М.: Стройиздат, 1979. 284 с.

23. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.

24. ISO 52016-1:2017 Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads. Part 1: Calculation procedures.

25. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 Енергетична ефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання на опалення та охолодження (EN ISO 13790:2008, IDT).

26. EN ISO 13790:2008 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.

27. Пирков В.В. Енергоефективність автоматичного балансування нових і модернізованих систем опалення і гарячого водопостачання. Данфосс INFO. № 1-2. 2014. С. 12-17.

References

1. Nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy vid 27 zhovtnia 2020 roku № 261 «Pro zatverdzhennia Zmin do Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel», zareiestrovano v Ministerstvi yustytzii Ukrainy vid 17 hrudnia 2020 r. za № 1254/35537 [Order of the Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine dated October 27, 2020 No. 261 "On Approval of Changes to the Methodology for Determining the Energy Efficiency of Buildings", registered in the Ministry of Justice of Ukraine dated December 17, 2020 under No. 1254/35537].

2. DSTU B EN 15459:2014 Enerhetychna efektyvnist budivel. Protsedura enerhetychnoi otsinky system budivel (EN 15459:2007, IDT) [SSU B EN 15459:2014 Energy efficiency of buildings. Procedure for energy assessment of building systems (EN 15459:2007, IDT)].

3. DSTU B EN 15459:2014 Enerhetychna efektyvnist budivel. Protsedura enerhetychnoi otsinky system budivel (EN 15459:2007, IDT) [Order of the Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine dated October 27, 2020 No. 260 "On approval of minimum requirements for energy efficiency of buildings", registered in the Ministry of Justice of Ukraine dated December 18, 2020 under No. 1257/35540].

4. DBN V.2.5-67:2013 Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia (2011). [SBR V.2.5-67:2013 Heating, ventilation and air conditioning].

5. DSTU-N B V.1.1-27:2010 «Budivelna klimatolohiia» (2011)/ [SSU-N B V.1.1-27:2010 "Building climatology"]. Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine, 130.

6. Nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy vid 11 lypnia 2018 roku № 169 «Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel», zareiestrovano v

Ministerstvi yustytsii Ukrainy vid 16 lypnia 2018 r. za № 822/32274. [Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated July 11, 2018 No. 169 "On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings", registered in the Ministry of Justice of Ukraine dated July 16, 2018 under No. 822/32274].

7. BN V.2.6-31:2021 «Теплова izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel» (2022). [SBR V.2.6-31:2021 "Thermal insulation and energy efficiency of buildings"]. Kyiv: Derzhstandard of Ukraine, 33.

8. Antypov, Ye. O., Mishchenko, A. V., Shelimanova, O. V., Tarasenko, S. Ye. (2021). Analiz vplyvu vnutrishnoi teploiemnosti budivli ZVO ta pohodozalezhnogo rehuliuвання ITP na efektyvnist roboty systemy opalennia v cherhovomu rezhymi. [Analysis of the influence of the internal heat capacity of the ZVO building and weather-dependent regulation of the ITP on the efficiency of the heating system in the alternate mode]. Energy and automation, 5, 2021.

9. Deshko, V. I., Bilous, I. Yu., Buyak, N. A., Golubenko, O. O., Gureev, M. V. (2019). Vplyv teploinertsiiinykh osoblyvostei ohorodzen na umovy komfortnosti pry vprovadzhenni enerhooshchadnykh rezhymiv opalennia v budivliakh [The influence of thermal inertia characteristics of fences on comfort conditions when implementing energy-saving heating modes in buildings. Scientific and technical collection "Utility management of cities". Series: technical sciences 3 (149), 44–50.

10. Deshko, V. I., Bilous, I. Yu., Buyak, N. A. (2019). Vplyv pereryvchastykh rezhymiv opalennia na dynamiku enerhopotreby ta umovy komfortnosti budivel z riznym rivnem teplovoho zakhystu [The influence of intermittent heating modes on the dynamics of energy consumption and comfort conditions of buildings with different levels of thermal protection]. Scientific news of NTUU KPI, 4., 7–16.

11. Esmailzadeh, A., Zakerzadeh, M. R., Yousefi Koma, A. (2018). The Comparison of Some Advanced Control Methods for Energy Optimization and Comfort Management in Buildings, Sustainable Cities and Society, 43, 601–623. doi:10.1016/j.scs.2018.08.038.

12. Nalyvaiko, V., Radko, I., Zhylytsov, A., Okushko, O., Mishchenko, A., Antypov, I. (2019). Investigation of Thermal Modernized Building's Microclimate with Renewable Energy. ICoRES 2019. E3S Web of Conferences, 154, 07011.

13. SSU B EN ISO 7730: 2011. Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriiv lokalnoho teplovoho komfortu. [Chynnyi vid 2013-01-01]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012. 74 s.

14. SSU B EN 15251: 2011. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osvittennia ta akustyky budivel. [Chynnyi vid 2013-07-01]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012. 71s.

15. SSU B EN 15261: 2012. Rozrakhunok parametriv mikroklimatu. [Chynnyi vid 2013-01-01], Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2012. 81 s.

16. Demchenko, V. V., Chupryna, Kh. M., Nevmerzhytskyi, O. V. (2013). Metody pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivli [Methods of increasing the energy efficiency

of a building]. Management of the development of complex systems,16, 138-143. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2013_16_27.

17. Mileykovsky, V. A. (2011). Matematychnе modeliuвання zminnoho hidravlichnoho rezhymu odnotrubnykh vertykalnykh system vodianoho opalennia [Mathematical modeling of variable hydraulic mode of one-pipe vertical water heating systems]. Danfoss INFO, 3–4, 25-30.

18. Mileykovsky, V. A. (2012). Matematychnе modeliuвання zminnoho hidravlichnoho i teplovoho rezhymiv pryladovykh vuzliv odnotrubnykh vertykalnykh system opalennia [Mathematical modeling of variable hydraulic and thermal modes of instrument nodes of single-pipe vertical heating systems]. Danfoss INFO, 1–2, 15-27.

19. Mileykovsky, V. A. (2013). Praktychni rekomendatsii po rezultatam matematychnoho modeliuвання zminnoho teplohidravlichnoho rezhymu odnotrubnykh vertykalnykh system opalennia [Practical recommendations based on the results of mathematical modeling of variable thermohydraulic mode of single-pipe vertical heating systems]. Danfoss INFO, 1-2, 20-28.

20. Mileikovsky, V. A. (2013). Matematychnе modeliuвання zalyshkovoї teploperedachi opaliuvalnykh pryladiv odnotrubnykh vertykalnykh system opalennia [Mathematical modeling of residual heat transfer of heating devices of single-pipe vertical heating systems]. Danfoss Info, No. 3-4, 20-23.

21. Pyrkov, V. V. (2013). Osoblyvosti rozrakhunku i proektuvannia odnotrubnykh system opalennia z urakhuvanniam vymoh normatyvnoi dokumentatsii ta vymoh po enerhozberezhenniu [Peculiarities of calculation and design of single-pipe heating systems taking into account the requirements of regulatory documentation and requirements for energy saving]. Danfoss INFO, 1-2, 12-15.

22. Bogoslovsky, V. M. (1979). Thermal regime of the building Moscow: Stroyizdat, 284.

23. DSTU 9190:2022 Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osvittennia ta hariachoho vodopostachannia [SSU 9190:2022 Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply].

24. ISO 52016-1:2017 Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures.

25. DSTU B EN ISO 13790:2011 Enerhetychna efektyvnist budivel. Rozrakhunok enerhospozhyvannia na opalennia ta okholodzhennia (EN ISO 13790:2008, IDT) [SSU B EN ISO 13790:2011 Energy efficiency of buildings. Calculation of energy consumption for heating and cooling (EN ISO 13790:2008, IDT)].

26. EN ISO 13790:2008 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.

27. Pyrkov, V. V. (2014). Enerhoefektyvnist avtomatychnoho balansuvannia novykh i modernizovanykh system opalennia i hariachoho vodopostachannia [Energy efficiency of automatic balancing of new and modernized heating and hot water supply systems]. Danfoss INFO, 1-2, 12-17.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE METHODS OF BALANCE OF THE HEATING SYSTEM ON THE THERMAL REGIME AND HEAT ENERGY ECONOMY OF THE BUILDING OF THE HIGHER EDUCATION INSTITUTION

I. Antypov, V. Gorobets, N. Spodyniuk

Abstract. *When comparing the efficiency of balancing single-pipe heating systems of a building and assessing its impact on the saving of thermal energy by the building of a higher education institution (HEI), a model of the thermal regime of the building was compiled and characterized as a single thermal energy system taking into account its three subsystems: a model of the thermal energy effect of the external climate on the building (η_1), models of the thermal energy influence of the thermal inertia of the building envelope (η_2) and models of the thermal energy influence of the engineering systems of the building (η_3). In order to assess the availability of specified indicators, based on heat energy impact models, the availability coefficient $K_{z(PD)}$ (project deviation) is introduced, which shows (in fractions of a unit) the deviation of the mentioned indicators from the calculated conditions and characterizes the degree of difference between the implemented solution and the optimal one and is an indicator of heat energy efficiency project solution as a whole. The savings of thermal energy obtained when using different options of automatic balancing are presented - for a single-pipe system with a constant hydraulic mode and separately for a single-pipe heating system with a variable hydraulic mode. It was established that with an increase in the value of the internal heat capacity of the building, the decrease in the specific energy consumption of the HEI building becomes less noticeable, compared to less massive buildings (light and very light structures). Thus, for buildings with an indicator of the internal heat capacity of the building $C = 110 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$, the specific rate of reduction in energy consumption by the HEI building is 0.8 thousand kWh/m^2 , while for buildings with an indicator of the internal heat capacity of the building $C = 80 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$ and $C = 25 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$ - the specific reduction in energy consumption by the building was 1.0 thousand kWh/m^2 and 1.1 thousand $\text{kWh h.}/\text{m}^2$ per year, respectively. It is shown that the level of energy savings after balancing the heating system for a building of very light construction (index of internal heat capacity of the building $C = 25 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$) was 2 %, for buildings of heavy and very heavy constructions (index of internal heat capacity of the building $C = 80 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$ and $C = 110 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{m}_2 \cdot \text{K})$ respectively) – 2.2 %.*

Key words: *heating system, thermal mode, thermal inertia, security index, microclimate parameters*