

МІСЬКЕ БУДІВНИЦТВО ТА ГОСПОДАРСТВО

УДК 699.86:697.133:004.942

Проценко С. Б., к.т.н., доцент, Новицька О. С., к.т.н., доцент, Ковальчук В. П., студент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ ВАРІАНТНОГО АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

У статті відображена методика визначення економічно обґрунтованої товщини утеплення фасадів житлового будинку в м. Рівне та виконано варіантний аналіз ефективності заходів з енергозбереження за допомогою комп'ютерного моделювання будівель.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, енергозбереження, тепловтрати, утеплення, опалення.

Стрімке подорожчання всіх видів енергоресурсів зумовлює необхідність активного пошуку шляхів зменшення втрат тепла в будівлях, скорочення видатків на опалення, підвищення ефективності роботи систем формування мікроклімату приміщень. При цьому часто постає задача техніко-економічної оцінки різних варіантів інженерних рішень та вибору з них оптимального. Проведення варіантного аналізу ефективності заходів з енергозбереження зазвичай є достатньо складною задачею, оскільки вимагає значного обсягу трудомістких обчислень. Виконання такого аналізу може бути здійснене шляхом застосування інноваційних підходів та комп'ютерних методів моделювання і розрахунку, зокрема сучасних технологій інформаційного моделювання будівель або BIM-технологій (від англ. Building Information Modelling).

На сьогоднішній день найбільш популярними заходами зі зменшення енерговитрат на опалення будинків є утеплення фасадів і заміна застарілих віконних систем на сучасні герметичні вікна. За літературними джерелами ці заходи здатні забезпечити зменшення річних видатків на опалення на рівні 9-32%.

Однак слід зазначити, що утеплення будівель може дати реальну економію енергоресурсів та коштів споживачів тепла виключно

у випадку індивідуального регулювання теплоспоживання та організації оплати послуг з опалення за фактично спожиту теплову енергію. В іншому випадку єдиним результатом зазначених заходів є підвищення рівня теплового комфорту в приміщеннях, а «надлишкове» тепло просто відводиться назовні шляхом додаткового провітрювання кімнат.

При утепленні фасадів будівель закономірно постає питання, яку саме товщину утеплювача вибрати. При її збільшенні втрати тепла в приміщеннях зменшуються, натомість вартість самого утеплювача зростає. Необхідно підбирати таку товщину утеплювача, за якої капітальні видатки на утеплення будівель досить швидко окупаються за рахунок економії експлуатаційних видатків на опалення.

Метою даного дослідження є розробка методики визначення економічно обґрунтованої товщини утеплення зовнішніх огорожень будівель з урахуванням видатків на опалення із застосуванням комп'ютерного моделювання будинку.

В задачі досліджень входило виконання варіантного аналізу ефективності заходів з утеплення зовнішніх стін на прикладі житлового будинку в кліматичних умовах м. Рівне, визначення оптимальної з економічних міркувань товщини шару утеплювача, її порівняння з тією величиною, що необхідна для забезпечення нормативного опору теплотеплопередачі огорожувальних конструкцій згідно з вимогами ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель» [1].

Дослідження були проведені в комп'ютерній програмі Cap OZC 6.1 [2] на тривимірній моделі житлового будинку і показали можливість та доцільність застосування запропонованого підходу для проведення техніко-економічного аналізу заходів з енергозбереження.

Для визначення економічно обґрунтованої товщини утеплення засобами комп'ютерної програми Cap OZC 6.1, що була надана в навчально-дослідницьких цілях кафедрі теплогазопостачання, вентиляції та санітарної техніки НУВГП компанією Cap Sp. z o.o., розроблено тривимірну модель 9-поверхового 72-квартирного житлового будинку. Комп'ютерна модель (рис. 1) включає в себе планувально-конструктивне рішення будинку, теплотехнічні характеристики будівельних матеріалів та огорожувальних конструкцій, кліматичні параметри району розташування об'єкта, вимоги до внутрішнього мікроклімату приміщень та інші необхідні для розрахунків дані. Змінюючи ті чи інші параметри моделі будинку, можна легко виконувати складні обчислення та аналізувати імовірні наслідки впровадження різних заходів з енергозбереження.

На моделі виконано теплотехнічний розрахунок та варіантний

аналіз тепловтрат у будинку при утепленні зовнішніх стін товщиною 510 мм із дірчатої керамічної цегли плитами з якісного і довговічного термоізоляційного матеріалу – плит з екструдованого пінополістиролу марки Реноboard з теплопровідністю $\lambda_A = 0,031$ Вт/(м·К). За різної товщини шару утеплювача в діапазоні від 0 до 100 мм визначено опір теплопередачі зовнішньої стіни (рис. 2, а), тепловтрати будинку за рахунок теплопередачі та на вентиляцію, а також проектну теплову потужність системи опалення (рис. 2, б).

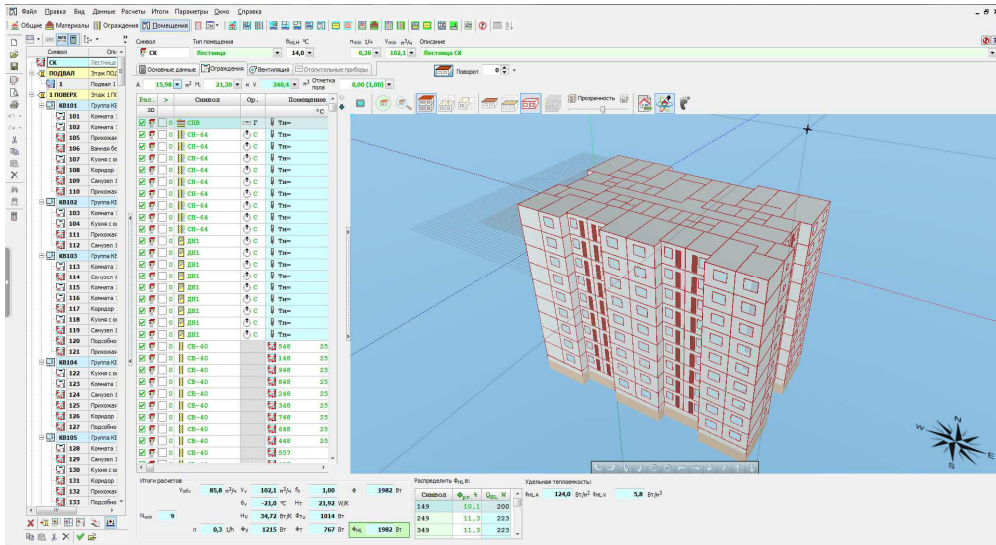


Рис. 1. Тривимірна модель житлового будинку в комп'ютерній програмі Cap OZC 6.1

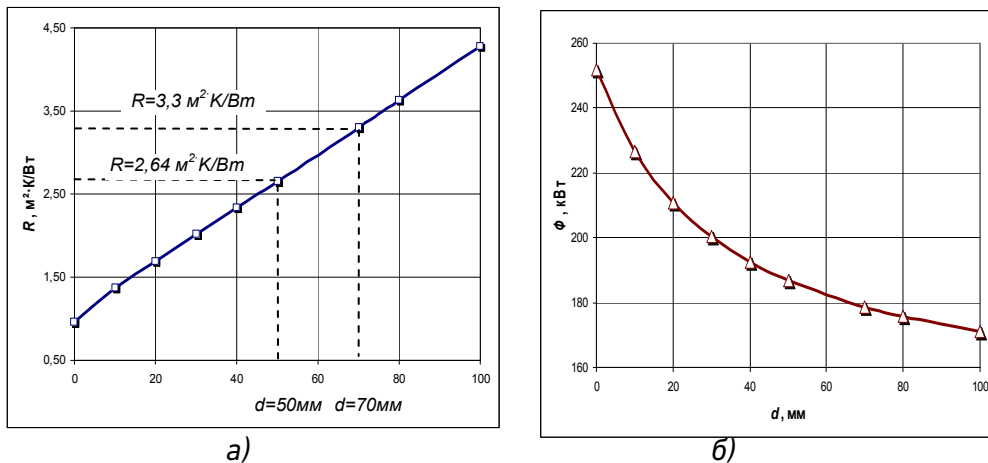


Рис. 2. Опір теплопередачі R зовнішньої цегляної стіни (а) та проектна теплова потужність системи опалення будинку Φ (б) за різної товщини d шару утеплювача з пінополістиролу з теплопровідністю $\lambda_A = 0,031$ Вт/(м·К)

Відповідно до вимог п. 6.3.4 ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [3] розрахунок проектної теплової потужності системи опалення виконано за методикою, що викладена в європейському стандарті EN 12831 [4; 5].

Як видно з рис. 2, а, опір теплопередачі неутепленої цегляної кладки товщиною 510 мм близький до $1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, однак, згідно з чинними нормативними вимогами, мінімально допустимий опір теплопередачі зовнішньої стіни для І-ї кліматичної зони, де розташоване м. Рівне, становить $3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ для нового будівництва [1, п. 2.2] та $2,64 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ у випадку реконструкції існуючих будівель з метою їх термомодернізації [1, п. 2.3]. Як свідчать результати розрахунків (рис. 2, а), нормативним величинам опору теплопередачі відповідають товщини шару утеплювача 70 мм (для опору $3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) та 50 мм (для опору $2,64 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$).

З метою техніко-економічної оцінки варіантів утеплення фасадів будинку визначені річні експлуатаційні видатки на опалення E_i в діючих тарифах за виразом:

$$E_i = \frac{Q_i \cdot T}{1000 \cdot 4,19}, \text{ тис. грн,} \quad (1)$$

де T – тариф на послуги централізованого опалення для житлових будинків з будинковими приладами обліку теплової енергії, який для м. Рівне становить 763,93 грн/Гкал; 4,19 – коефіцієнт для переведення ГДж у Гкал; Q_i – очікуване річне теплоспоживання системи опалення будинку, що визначалося за наступною формулою [6, п. 4.5]

$$Q_i = 3,6 \cdot \Phi_i \cdot \frac{t_B - t_{CO}}{t_B - t_3} \cdot 24 \cdot m \cdot 10^{-3}, \text{ ГДж,} \quad (2)$$

де Φ_i – проектна тепла потужність системи опалення за i -м варіантом, кВт (див. рис. 2, б); t_3 – розрахункова температура зовнішнього повітря, яка для м. Рівне становить мінус 21°C [7, табл. 2]; t_{CO} – середня за опалювальний період температура зовнішнього повітря, для м. Рівне $0,1^\circ \text{C}$ [7, табл. 2]; t_B – проектна температура внутрішнього повітря у приміщеннях, що прийнята рівною 20°C ; m – тривалість опалювального періоду, для м. Рівне 182 доби [7, табл. 2].

Значення економії річних експлуатаційних видатків на опалення за різними варіантами утеплення будинку, порівняно з базовим варіантом – неутепленим будинком, наведені на рис. 3. Як свідчать результати розрахунків, економія видатків на опалення зростає зі збільшенням товщини шару утеплювача і при товщині 100 мм досягає 32%.

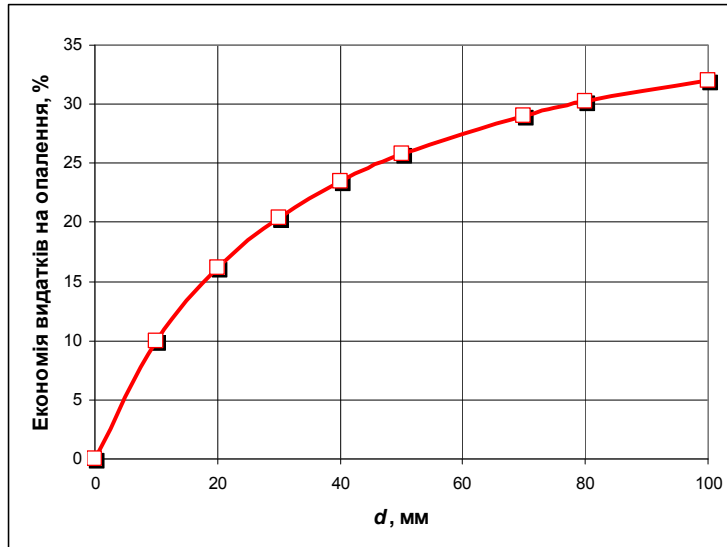


Рис. 3. Економія річних експлуатаційних витрат на опалення за різної товщини d шару утеплювача, порівняно з неутепленим будинком

Капітальні витрати на утеплення будинку залежать від багатьох факторів, а саме: від площі та геометрії фасадів, конструктивного рішення утеплення, вартості будівельних робіт, виду та товщини шару теплової ізоляції, видів інших необхідних матеріалів (клею для приклеювання утеплювача, клею та сітки для армування, дюбелів, перфорованих кутів, декоративної штукатурки, ґрунтовки, фасадної фарби тощо). В мережі Інтернет можна знайти численні online-калькулятори, що допомагають розрахувати вартість утеплення будинку (приміром, <http://kievrem.com.ua/ua/kalkulyator-uteplenie-fasadov/>, <http://www.kievbud.com.ua/calc.html>, <http://stroymateriali.kiev.ua/penoplast-fasad-cena> тощо).

В даному дослідженні площа утеплюваних зовнішніх стін будинку становить 2860 м^2 . Вартість утеплення будинку за порівнюваними варіантами насамперед залежить від товщини шару утеплювача, натомість вартість будівельних робіт та інших необхідних матеріалів практично однакова. Результати розрахунку капітальних витрат на утеплення фасадів та річних експлуатаційних витрат на опалення будинку за порівнюваними варіантами наведені на рис. 4, а.

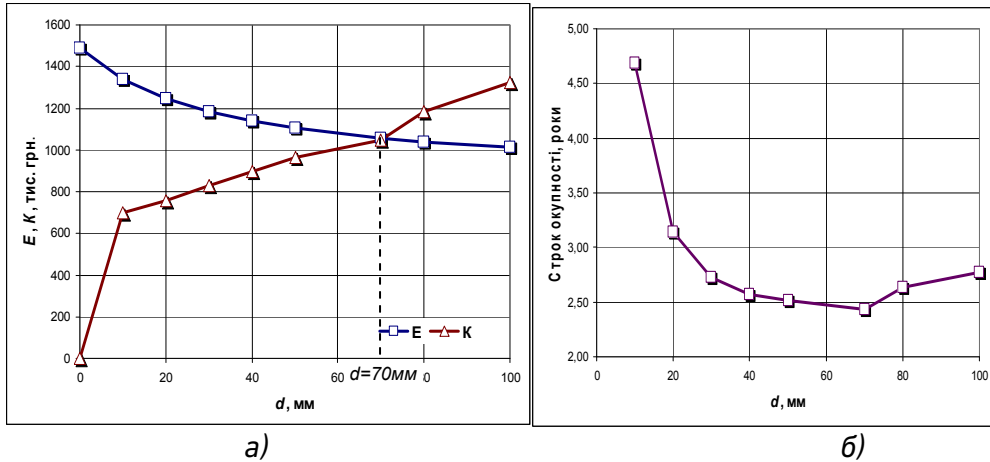


Рис. 4. Капітальні видатки на утеплення фасадів K та річні експлуатаційні видатки на опалення будинку E (а), строк окупності капітальних видатків на утеплення фасадів за рахунок економії витрат на опалення будинку (б) за різної товщини d шару утеплювача

Строк окупності заходів з утеплення фасадів житлового будинку за рахунок економії видатків мешканців цього будинку на оплату послуг централізованого опалення визначений за формулою

$$CO = \frac{K_i}{E_{БАЗ} - E_i}, \text{ роки}, \quad (3)$$

де E_i – річні експлуатаційні видатки на опалення за i -м варіантом утеплення будинку, тис. грн; $E_{БАЗ}$ – річні експлуатаційні видатки на опалення за базовим варіантом – неутепленим будинком, тис. грн, K_i – капітальні видатки на утеплення будинку за i -м варіантом, тис. грн.

Як свідчать результати розрахунків (рис. 4, б), при використанні для утеплення екструдованого пінополістиролу найбільш економічно вигідною є товщина шару утеплювача 70 мм, при цьому економія річних експлуатаційних видатків на опалення складає 28% (див. рис. 3), а видатки на утеплення будинку за діючих тарифів здатні окупитися вже за 2,4 роки. Така товщина утеплювача повністю відповідає чинним нормативним вимогам щодо забезпечення мінімально допустимого опору теплопередачі зовнішніх стін у новому будівництві [1, п. 2.2].

Цілком прийнятною також є товщина шару утеплювача у 50 мм, що відповідає нормативним рекомендаціям стосовно термо-модернізації існуючих будівель [1, п. 2.3]. Натомість застосування теплоізоляції товщиною 30 мм і менше слід вважати економічно неви-

гідним, оскільки отримуване при цьому зменшення тепловтрат у будинку є порівняно невеликим. Збільшення товщини теплової ізоляції до 80-100 мм, хоч і окупається дещо довше, ніж за товщини теплоізоляції 70 мм, у довгостроковій перспективі може принести неабияку економію експлуатаційних витратків на опалення, особливо, якщо врахувати той факт, що в майбутньому тарифи на теплову енергію тільки зростатимуть.

При оцінюванні ефективності заходів з утеплення будівель необхідно також враховувати додаткову економію капітальних витратків за рахунок зменшення потрібної потужності і, відповідно, вартості як системи опалення, так і джерела тепlopостачання. Цю задачу, принаймні частково, також можна вирішити шляхом комп'ютерного моделювання будинку, оскільки програма Cap OZC передбачає можливість автоматизованого підбору типорозмірів опалювальних приладів для окремих приміщень.

У даному дослідженні в системі радіаторного опалення житлового будинку був прийнятий типоряд сталевих панельних радіаторів марки Rurgo Comrast C висотою 600 мм з радіаторними термостатичними вентилями. Результати розрахунку капітальних витратків за варіантами з урахуванням вартості опалювальних приладів наведені на рис. 5.

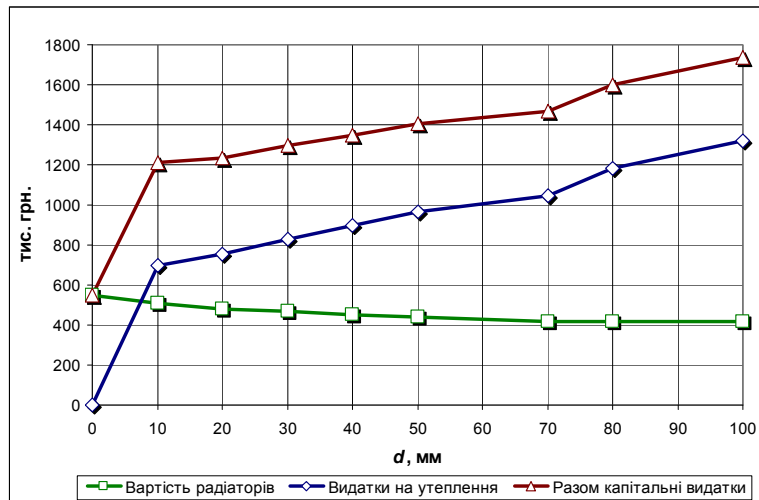


Рис. 5. Значення вартості опалювальних приладів, витратків на утеплення фасадів будинку та сумарних капітальних витратків за різної товщини d шару утеплювача

При розрахунку економічної ефективності енергозберігаючих заходів необхідно привести різночасові витатки та результати заходів до єдиного для всіх порівнюваних варіантів моменту часу – роз-

рахункового року. За розрахунковий рік зазвичай приймають рік початку фінансування робіт з реалізації енергозберігаючого рішення. Кінцевий рік розрахункового періоду визначається моментом завершення енергозберігаючих заходів або строком служби обладнання. Відповідно до рекомендацій додатка П ДБН В.2.5.-67:20013 [3] середній строк служби радіаторів водяної системи опалення становить 30-40 років, тому в нашому дослідженні тривалість розрахункового періоду T прийнята рівною 30 років.

Приведення різночасових видатків та результатів усіх років розрахункового періоду до початкового року здійснюється множенням відповідної величини за кожний рік на коефіцієнт дисконтування α_t , який визначають за виразом:

$$\alpha_t = (1 + \varepsilon)^{n-t}, \quad (4)$$

де ε – норма дисконтування, що приймається залежно від конкретних умов здійснення енергозберігаючих заходів (вартості та умов отримання кредиту, норми прибутку на акції, структури капіталу тощо [8; 9]); t_n – порядковий номер початкового року, що дорівнює 0; t – порядковий номер року, видатки та результати за який приводяться до початкового року.

Таким чином, для визначення економічно обґрунтованої товщини шару утеплювача в якості критерію оптимальності були вибрані приведені до початкового року видатки за весь розрахунковий період експлуатації системи опалення будинку, що визначалися за виразом:

$$ПВ = \sum_{t=0}^T \frac{K_t + E_t}{(1 + \varepsilon)^t}, \text{ тис. грн}, \quad (5)$$

де K_t та E_t – відповідно капітальні та експлуатаційні видатки в році t , тис. грн.

Капітальні видатки K_t враховують затрати на утеплення фасадів будинку та вартість опалювальних приладів і віднесені до нульового року життєвого циклу системи. Інші видатки на влаштування системи опалення будинку, які є однаковими для всіх порівнюваних варіантів, в техніко-економічних розрахунках не враховувалися.

Щорічні експлуатаційні видатки E_t визначалися, починаючи з першого року розрахункового періоду, як сума вартості послуг централізованого опалення в діючих тарифах та видатків на технічне обслуговування і поточний ремонт системи опалення та фасадів будинку. Видатки на техобслуговування і ремонт, за рекомендаціями додатка П ДБН В.2.5.-67:20013 [3], за весь розрахунковий період прийняті рівними 2% від початкових інвестицій і рівномірно розподілені по всіх роках життєвого циклу системи.

Об'єктивність результатів оцінки ефективності інвестицій знач-

ною мірою залежить від коректно прийнятого значення норми дисконтування ϵ відповідно до тенденцій її зміни впродовж розрахункового періоду. Враховуючи важку економічну ситуацію, що нині склалася в нашій країні (значна економічна нестабільність, швидка інфляція, стрімке подорожчання енергоресурсів тощо), в даному розрахунку значення норми дисконтування ϵ прийняте рівним 0,12.

Результати визначення приведених видатків за 30 років експлуатації системи опалення для різних варіантів утеплення фасадів житлового будинку наведені на рис. 6.

Як свідчать результати виконаних розрахунків, при збільшенні товщини шару утеплювача з екструдованого пінополістиролу від 0 до 70 мм приведені сумарні видатки на влаштування теплової ізоляції та на опалення будинку стрімко зменшуються. При подальшому збільшенні товщини шару утеплювача до 80-100 мм величина приведених видатків зменшується несуттєво. В такому випадку серед кількох варіантів технічних рішень, що мають практично однаковий економічний ефект, перевагу надають тому варіанту, який передбачає менші початкові видатки. Отже, у розглянутому прикладі оптимальною є товщина шару утеплення зовнішніх стін житлового будинку 70 мм, що повністю відповідає чинним нормативним вимогам щодо забезпечення мінімально допустимого опору теплопередачі зовнішніх стін у новому будівництві.

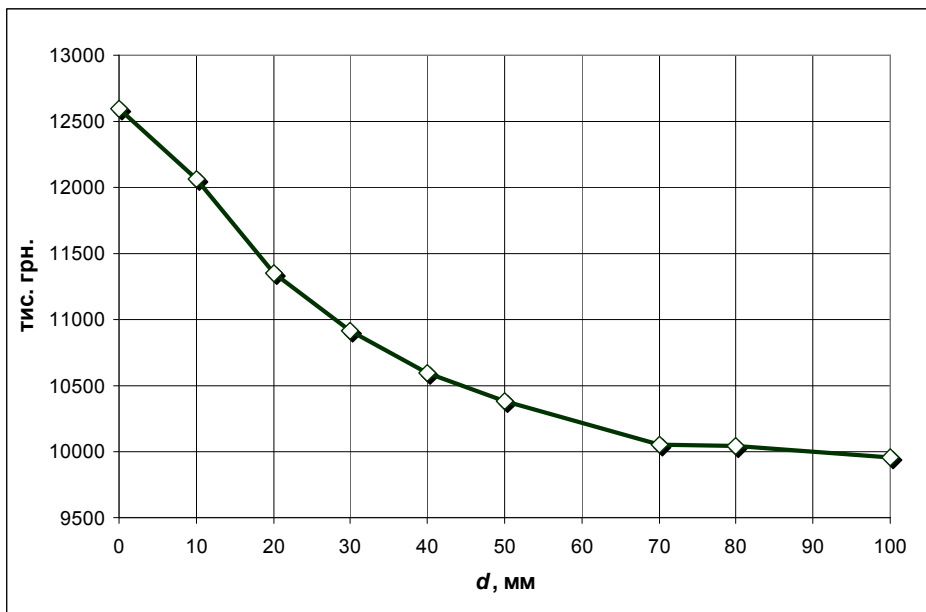


Рис. 6. Приведені видатки за 30 років експлуатації системи опалення житлового будинку за різної товщини d шару утеплювача

Таким чином, в результаті виконаного дослідження розгляну-

та можливість і доцільність застосування комп'ютерного моделювання будівель для проведення техніко-економічного аналізу заходів з енергозбереження. Запропонована методика визначення економічно обґрунтованої товщини утеплення будинку, що враховує як вартість заходів з утеплення, так і їхній вплив на капітальні й експлуатаційні видатки на опалення. За результатами комп'ютерного моделювання на прикладі житлового будинку в кліматичних умовах м. Рівне показано, що для зовнішніх цегляних стін товщиною 510 мм оптимальна товщина шару утеплювача з екструдованого пінополістиролу становить 70 мм. Таке утеплення забезпечує опір теплопередачі зовнішніх стін на рівні $3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що повністю відповідає чинним нормативним вимогам для нового будівництва для I кліматичної зони.

1. ДБН В.2.6-31:2006 Теплова ізоляція будівель (зі Зміною № 1 від 1 липня 2013 р.). – К. : Мінбуд України, 2006. **2.** Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «САПР систем теплогазопостачання і вентиляції» на тему «Розрахунок проектного теплового навантаження систем опалення будівель за EN 12831 у програмі Cap OZC» для студентів напряму підготовки 6.060101 «Будівництво» за професійним спрямуванням «Теплогазопостачання і вентиляція» всіх форм навчання. В 3-х ч. / С. Б. Проценко. – Рівне : НУВГП, 2016. **3.** ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. **4.** EN 12831:2003 (E) Heating systems in buildings – Method for calculation of the design heat load. – CEN, 2003. – 76 с. **5.** Проценко С. Б. Аналіз нових нормативних вимог до розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель / Проценко С. Б., Новицька О. С. // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Зб. наук. праць. Вип. 3 (71). Ч. 2. Техн. науки. – Рівне : НУВГП, 2015. – С. 17–24. **6.** Пособие по проектированию автономных инженерных систем многоквартирных и блокированных жилых домов (водоснабжение, канализация, теплоснабжение и вентиляция, газоснабжение, электроснабжение). – М. : Торговый Дом «Инженерное оборудование», 1997. – 49 с. **7.** ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с. **8.** Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. – М. : Евроклимат, 2006. – 640 с. **9.** Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия / А. Н. Дмитриев, И. Н. Ковалев, Ю. А. Табунщиков, Н. В. Шилкин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. – 120 с.

Рецензент: д.т.н., професор Ковальчук В. А. (НУВГП)

**Protsenko S. B., Candidate of Engineering, Associate Professor,
Novytska O. S., Candidate of Engineering, Associate Professor,
Kovalchuk V. P., Senior Student** (National University of Water and
Environmental Engineering, Rivne)

APPLICATION OF BUILDINGS' COMPUTER SIMULATION FOR THE EFFICIENCY ANALYSIS OF THE ENERGY SAVING MEASURES

The paper describes the method of determining the economically feasible thermal insulation thickness of external walls by example of a residential building in Rivne town. It is shown the possibility and feasibility of computer simulation of buildings for analysis of the efficiency of energy saving measures.

***Keywords:* computer simulation, energy savings, heat losses, thermal insulation, heating systems.**

**Проценко С. Б., к.т.н., доцент, Новицкая О. С., к.т.н., доцент,
Ковальчук В. П., студент** (Национальный университет водного
хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ ДЛЯ ВАРИАНТНОГО АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

В статье отображена методика определения экономически обоснованной толщины утепления фасадов жилого дома в г. Ровно и исполнен вариантный анализ эффективности энергосберегающих мероприятий с помощью компьютерного моделирования зданий.

***Ключевые слова:* компьютерное моделирование, энергосбережение, теплопотери, утепление, отопление.**
