

У.Д. Марущак, М.А. Саницький, В.В. Гоц¹, Ю.Б. Федунь
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельного виробництва

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ БУДИНКІВ

© Марущак У.Д., Саницький М.А., Гоц В.В., Федунь Ю.Б., 2013

Наведено техніко-економічні показники будинків на основі їх енергетично-екологічного аналізу. Методом математичного моделювання оцінено економічну доцільність рішень інвестиційних проектів за критерієм мінімізації коштів експлуатації будинків та терміну повернення інвестицій.

Ключові слова: техніко-економічні показники, низькоенергетичний будинок, життєвий цикл, питома енергоспоживання, термін окупності, економічна ефективність.

In this paper the technical and economical parameters of buildings on the bases of their energetic and ecological analysis are shown. The economy effectiveness of investment project by the criterion of minimizing operating costs of buildings and term return on investment is assessment by mathematical modeling method.

Key words: technical and economical parameters, low-energy building, specific energy consumption, Life cycle, Simple Pay Back Time, economy effectiveness.

Вступ

На житлово-комунальний сектор України припадає найбільша частина кінцевого споживання енергії, зокрема в країнах ЄС та Україні – близько 42–44 %, при цьому в будинках створюється емісія близько 35 % всіх парникових газів. Істотні витрати енергії необхідні як на спорудження будинків, так і на їхню експлуатацію протягом всього життєвого циклу. Тому будівництво з оптимізованим енергетичним потенціалом, тобто раціональним використанням енергетичних ресурсів у житлово-комунальному секторі – це один із найважливіших пріоритетів державної політики України, що визначає необхідність ширшого впровадження систем інтегрованого проектування низькоенергетичних будинків, які ґрунтуються на оцінці життєвого циклу будівель і споруд з врахуванням їх енергетично-екологічних показників.

Постановка проблеми

Понад 50 % будинків житлового фонду України побудовано до 1970 р. та не відповідають ні архітектурно-планувальним, ні санітарно-гігієнічним, ні експлуатаційним вимогам. Зношення основних фондів перевищує 60 %, а енергоемність послуг у 2,5–3 рази перевищує показники європейських країн. Питома енергоспоживання на опалення (що є основною енергетичною характеристикою будинків житлового фонду країни) сягає 200–300 кВт·год/(м²·рік). Застарілий житловий фонд щороку вимагає більше коштів на утримання, а будівництво нових будинків, які не відповідають нормативним вимогам, ще більше загострює проблему.

Для забезпечення енергоефективності в житлово-комунальному секторі України необхідне впровадження проектів термомодернізації наявного житлового фонду, особливо будинків перших масових серій та інтегрального проектування низькоенергетичних будівель та споруд за так званими інтелегентними технологіями, зокрема технологіями пасивного будинку та будинків з нульовим споживанням енергії. При цьому пріоритетною є економічна складова енергетичної ефективності, що ґрунтується на економічній оцінці доцільності проектних рішень у житловому будівництві та інвестиційній привабливості застосування різних інноваційних енергоощадних технологій.

Аналіз останніх джерел і публікацій

Світові тенденції дотримання принципів зрівноваженого розвитку, а також постійне зростання цін на енергоносії вимагають від проєктантів та девелоперів створення проєктів енергоощадних будинків [1]. Прийняття директиви 2002/91/WE EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) та зміни в Директиві 2010/31/EU, що стосуються енергетичної характеристики будинків і зумовлює зведення з 2021 року на територіях Європейського Союзу будинків тільки з дуже низькою потребою в енергії, в яких частково буде використано відновлювальні джерела енергії. Підвищення ефективності використання енергії вимагає змін у підходах до проєктування об'єктів нерухомості та вимагає впровадження системи інтегрованого проєктування низькоенергетичних будинків, яка ґрунтується на принципах сталого розвитку з врахуванням вимог до охорони довкілля та особливостей життєвого циклу будівельного об'єкта від проєкту до знесення [1–4].

Комп'ютерні програми для визначення споживання енергії та емісії парникових газів згідно з методологією циклу існування будинку (LCA), а також стандартизація за екологічною ефективністю згідно з вимогами до охорони довкілля стають вже стандартами з проєктування будинків у світі, зокрема це такі системи оцінки, як BREEAM (Великобританія), CASBEE (Японія), HQE (Франція), ITB (Польща), LEED (США) [3]. У процесі інтегрованого проєктування енергоощадних будинків на всіх етапах життєвого циклу повинні бути реалізовані певні ідеї: мінімальне використання сировинних невідновлювальних матеріалів, в т.ч. води, будівельних матеріалів, викопного палива, простору; мінімальна емісія парникових газів; мінімальне продукування відходів; мінімальний негативний вплив на локальні екосистеми; оптимальні показники внутрішнього середовища, що включають якість повітря, тепловий комфорт, освітлення та звукоізоляцію; архітектурна виразність [5].

Вирішальною умовою розвитку і стабільної життєздатності будь-якого проєкту є доцільність вкладення капіталу. Період часу від початку вкладення інвестицій до отримання кінцевого ефекту від їх вкладень називається життєвим (інвестиційним) циклом інвестиційного (девелоперського) проєкту. Відповідно до практики стани, через які проходить проєкт протягом його життєвого циклу, називають фазами (етапами, стадіями). Успішність діяльності девелоперських проєктів залежить від повноти і достовірності інформації про всі фази таких проєктів. Достовірна інформація здатна дати проєктам миттєвий і потужний поштовх, забезпечити швидкий обмін даними, знизити матеріальні витрати, скоротити терміни створення девелоперських проєктів, отримати максимальний рівень прибутковості на вкладений капітал [6, 7].

Для більшості проєктів життєвий цикл однаковий, тоді як вхідна і вихідна інформація на кожному етапі життєвого циклу кожного проєкту індивідуальна і не може бути універсальною. Тому для кожного проєкта необхідна власна стратегія управління. Особливо це стосується ранніх фаз девелоперських проєктів, таких як ідея проєкту, розроблення концепції, придбання земельної ділянки та проєктування будинку. На першій стадії циклу, що стосується вибору або генерування ідей, які можуть забезпечити виконання важливих завдань розвитку, складають перелік усіх можливих ідей, придатних для реалізації цілей економічного розвитку [6, 8]. Слід зазначити, що на сучасному етапі впровадження низькоенергетичного будівництва будинки високої енерго-ефективності (потреба в енергії на опалення менша за 75 кВт·год/м² на рік) та пасивні будинки (тепловитрати на опалення менші за 15 кВт·год/м² на рік) в країнах ЄС є визнаним стандартом [2–4]. Мінімізація використання первинної енергії та впливу на довкілля спонукає до пошуків нових концептуальних підходів у будівництві, до яких можна віднести проєктування та послідовну реалізацію з врахуванням перспектив розвитку будинків «нуль теплової енергії» (nearly zero energy building – nZEB), будинків «нуль теплової енергії» та «нуль електричної енергії», активні будинків (active house), Smart-Grid-0-Energy будинків («розумні будинки нуль енергії») [5].

Управління інформацією на кожному етапі життєвого циклу забезпечує прийняття правильних рішень, які дадуть змогу мінімізувати витрати та час в процесі створення низькоенергетичних будинків [6]. Інвестиційна привабливість цих проєктів забезпечується за рахунок досягнення високого рівня теплового комфорту та низьких експлуатаційних витрат протягом всього життєвого циклу будинку [5, 9].

Мета роботи – оцінити енерго-екологічні та економічні показники будинків в напрямку інтегрованого проектування низькоенергетичних будівельних об'єктів та визначити економічну ефективність запропонованих варіантів проектів.

Об'єкт та методика досліджень

За функціональним призначенням як об'єкт дослідження вибрано індивідуальний житловий двоповерховий будинок з мансардою (базовий варіант). Загальна висота будинку 9,590 м. Опалювальна площа будівлі – $F_h = 232 \text{ м}^2$.

Конструктивна схема будинку – поздовжні цегляні несучі стіни із монолітним перекриттям та стрічковими фундаментами. Зовнішні стіни будинку завтовшки 380 мм виконано з пустотілої цегли. Мансардний поверх утеплений мінераловатним утеплювачем завтовшки 150 мм. Дах шатровий двосхилий, конструкції дерев'яні, покрівлю виконано з металочерепиці. Світлопрозорі конструкції (вікна) виконані з однокамерних склопакетів з варіантом скління $4M_1-16-4M_1$ і заповнені повітрям. У будинку передбачено газове опалення.

Для визначення енергетичних показників будинку використано методологію складання енергетичного паспорта згідно з ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 «Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції». Порядок розрахунків основних теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій для підтвердження їх відповідності для енергоощадних будинків здійснювали згідно з ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель». Теплоізоляційну оболонку зовнішніх стін проектували згідно з ДБН В.2.6-33:2008 та ДСТУ Б В.2.6-36:2008.

Для оптимізації теплотехнічних характеристик зовнішніх стін та світлопрозорих конструкцій індивідуального будинку з метою покращення енергетичних та екологічних показників, а також одержання максимальної економічної ефективності проведено математичне планування. Вартість робіт та економічну ефективність термомодернізаційних та термореконструктивних заходів в будинку розраховано за допомогою програми АВК-5.

Результати досліджень

Основним енергетичним показником будинку, що визначає його енергоефективність, є значення питомих тепловитрат на опалення будинку для досягнення умов комфортності – $q_{\text{буд}}$. Крім того, цей показник є критерієм, за яким визначають якість проекту та вартість його реалізації. Питомі тепловитрати будинку базового варіанта визначали на основі теплового балансу будинку за опалювальний період з врахуванням статей втрат теплоти (теплота, що втрачається через зовнішні огорожувальні конструкції, та теплота, що витрачається на підігрів інфільтраційного повітря) і статей надходження теплоти (побутові надходження від людей та працюючих електроприладів, надходження від сонячної радіації протягом опалювального періоду).

Згідно з розрахунками, питомі тепловитрати на опалення базового варіанта $q_{\text{буд}} = 176,7 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$, при цьому $[(q_{\text{буд}} - E_{\text{макс}})/E_{\text{макс}}] \cdot 100\% = 50 \%$, що дає змогу зарахувати цей індивідуальний будинок до класу енергетичної ефективності “Е”. Згідно з вимогами ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007, для цього будинку необхідно розробити заходи щодо підвищення його енергоефективності з доведенням до класу енергоефективності не нижче “С”. З метою зниження трансмісійних тепловтрат через стінові огорожувальні конструкції використано систему фасадної теплоізоляції з опорядженням тонкошаровими штукатурками.

З метою оптимізації теплотехнічних параметрів стінових та світлопрозорих конструкцій індивідуального будинку за критерієм енергоефективності для забезпечення необхідних санітарно-гігієнічних умов у зимовий період та економії паливно-енергетичних ресурсів проведено математичне планування, змінними факторами якого прийнято товщину теплоізоляційного шару з пінополістиролу [$\lambda=0,038 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] при утепленні зовнішніх стін ($\delta_{\text{із}} = 0; 10; 20 \text{ см}$) та коефіцієнт теплопередачі вікон [$U_{\text{вік}} = 2,7; 1,7; 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$]. При цьому вирішували задачі планування багатофакторного експерименту для встановлення залежностей між енергетичними показниками (питомі тепловитрати – $q_{\text{буд}}$), екологічним показником (емісія CO_2) індивідуального будинку та теплофізичними властивостями його зовнішніх огорожувальних конструкцій. Запропоновану методику використано для пошуку оптимального варіанта проекту індивідуального будинку для умов II температурної зони України.

Для раціональнішого проектування енергоощадних будинків необхідно оцінити економічну ефективність капіталовкладень, одним із важливих показників якої є термін окупності або простий час повернення коштів SPBT (Simple Pay Back Time). Термін окупності – це час в роках, необхідний для повернення вкладених у проект інвестицій:

$$T_{ок} (SPBT) = I/E,$$

де E – річний економічний ефект, грн.; I – інвестиційні затрати, грн.

Математична модель пошуку оптимального варіанта проекту енергоефективної будівлі формулюється за умови мінімізації питомих тепловитрат на опалення, емісії вуглекислого газу та терміну окупності інвестицій. При цьому обмеженням задач оптимізації було порівняння питомих витрат на опалення з:

– показником згідно із чинними нормами $q_{буд} \leq E_{max}$ (для базового варіанта $E_{max} = 117$ кВт·год/(м²·рік));

– стандартами енергоощадного будинку $q_{буд} \leq 75$ кВт·год/(м²·рік);

– стандартами пасивного будинку $q_{буд} \leq 15$ кВт·год/(м²·рік).

З метою визначення величини капіталовкладень, пов'язаних з реалізацією проектів, зроблено кошторисний розрахунок за допомогою програмного комплексу АВК-5 на проведення робіт з:

– влаштування системи фасадної теплоізоляції з опорядженням тонкошаровою штукатуркою загальною площею зовнішніх непрозорих стінових огорожувальних конструкцій $F_{нп} = 188$ м² із товщиною теплоізоляційного шару 10 та 20 см;

– заміни вікон (загальна площа зовнішніх світлопрозорих огорожувальних конструкцій $F_{сп.в} = 33,5$ м²) на вікна з коефіцієнтом теплопередачі $U_{вк} = 1,7$ Вт/м²·К та $U_{вк} = 0,7$ Вт/м²·К.

Аналіз результатів розрахунків енерго-екологічних показників базового варіанта та восьми варіантів проектів на його основі, що відрізняються рівнем теплового захисту зовнішніх огорожувальних конструкцій, при використанні гравітаційної системи вентиляції показав (табл. 1), що заміна світлопрозорих конструкцій не забезпечує виконання умов чинних стандартів щодо енергоефективності (клас енергетичної ефективності (ЕЕФ) нижче С).

Таблиця 1

Техніко-економічні показники будинків з гравітаційною системою вентиляції

№ з/п	$\delta_{із}$, см	$U_{вік}$, Вт/м ² ·К	$q_{буд}$, кВт·год/м ² ·рік	Клас ЕЕФ	$V_{газу}$, м ³ /м ² ·рік	Емісія CO ₂ , м ³ /рік	E, грн./рік	I, тис. грн.	T _{ок} , роки
1	0	2,7	176,67	Е	16	1877	-	-	-
2	0	1,7	161,14	Е	15,26	1804	460	70,138	153
3	0	0,7	148,34	Е	14,05	1661	1212	117,379	97
4	10	2,7	99,47	В	9,42	1113	4091	69,871	17
5	10	1,7	85,24	В	8,08	954	4924	140,009	28
6	10	0,7	70,53	В	6,68	790	5795	187,250	32
7	20	2,7	89,33	В	8,46	1000	4688	95,256	20
8	20	1,7	75,16	В	7,12	842	5521	165,394	30
9	20	0,7	61,09	В	5,79	684	6348	212,635	34

Для будинку з гравітаційною системою вентиляції базового варіанта питомі витрати теплоти на опалення становили $q_{буд max} = 176,67$ кВт·год/(м²·рік), тоді як після підвищення теплотехнічних показників зовнішніх стін та вікон – $q_{буд min} = 61,09$ кВт·год/(м²·рік), тобто тепловитрати зменшуються в 2,9 разу. Варіанти 6, 8 та 9, що передбачають влаштування фасадної теплоізоляції та встановлення енергоефективних вікон, забезпечують показники для будинку низького споживання енергії.

Використання фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатуркою та заміна вікон на ефективніші дають змогу досягти річної економії коштів на опалення будинку впродовж року за рахунок зменшення споживання енергії на опалення та зниження ціни за 1 м³ природного газу, що залежить від річного обсягу споживання природного газу. На основі аналізу математичних моделей терміну окупності капіталовкладень (рис. 1) для проектування енергоощадного будинку за класом енергоефективності вищим за С при гравітаційній системі вентиляції оптимальним за енергетичними ($q_{буд} = 75,16$ кВт·год/м²·рік), екологічними (емісія CO₂ = 842 м³/рік) і економічними

параметрами ($I=165,394$ тис. грн., $T_{ок}=30$ років) є варіант 8 із застосуванням системи фасадної теплоізоляції з товщиною теплоізоляційного шару $\delta_{із}=20$ см і вікон з коефіцієнтом теплопередачі $U_{вік}=1,7$ Вт/м²·К.

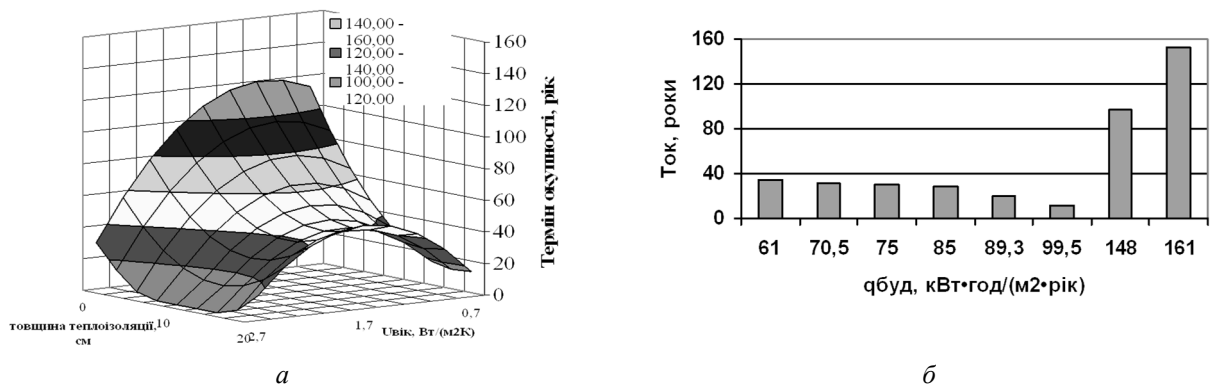


Рис. 1. Термін окупності інвестицій при реалізації варіантів проектів індивідуального будинку з гравітаційною системою вентиляції в залежності від теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій (а) та від витрати теплоти на опалення будинку (б)

Оптимальним варіантом енергоефективної будівлі є раціональне поєднання конструктивних та інженерно-технологічних складових енергетичної ефективності будівлі, що дасть змогу одержати мінімальні сукупні витрати на будівництво та експлуатацію об'єкта. Одним з основних елементів енергоощадності та забезпечення якості повітря в приміщеннях є гібридна система вентиляції – поєднання гравітаційної в літній період та механічної з рекуперацією теплоти – в зимовий. Здійснено розрахунки для механічної системи вентиляції з рекуперацією теплоти 70% (табл. 2).

Таблиця 2

Техніко-економічні показники будинків при використанні механічної системи вентиляції з рекуперацією тепла $\eta = 70\%$

№ з/п	$\delta_{із}$, см	$U_{вік}$, Вт/м ² ·К	$q_{буд}$, кВт·год/м ² ·рік	Клас ЕЕФ	$V_{газу}$, м ³ /м ² ·рік	Емісія CO ₂ , м ³ /рік	E, грн./рік	I, тис. грн.	$T_{ок}$, роки
1	0	2,7	123,97	D	11,75	1388	2574	66,924	26
2	0	1,7	108,44	C	10,27	1214	3488	132,544	38
3	0	0,7	95,64	B	9,06	1071	4240	135,680	32
4	10	2,7	46,77	A	4,43	524	6189	111,396	18
5	10	1,7	36,63	A	3,08	364	7959	183,057	23
6	10	0,7	22,46	A	1,69	200	8823	229,398	26
7	20	2,7	32,54	A	3,47	410	5599	156,781	28
8	20	1,7	17,83	A	2,13	252	9396	197,333	21
9	20	0,7	8,39	A	0,79	94	9784	264,160	27

При використанні механічної системи вентиляції з рекуперацією теплоти максимальне значення питомих тепловитрат на опалення становить $q_{буд\ max} = 123,97$ кВт·год/(м²·рік), а мінімальне – $q_{буд\ min} = 8,39$ кВт·год/(м²·рік) при співвідношенні між ними 14,8. Комплексний підхід в проектуванні та використання енергоефективних технологій дозволили досягнути витрат теплової енергії на опалення, що відповідають критеріям енергоощадного будинку і відповідають класу енергоефективності «А». Проект будинку з мінімальною витратою теплоти на опалення 8,39 кВт·год/(м²·рік) задовольняє вимоги стандарту пасивного будинку.

При заміні гравітаційної системи вентиляції з рекуперацією тепла 70% досягається менший термін окупності при менших інвестиціях, порівняно з проектами з гравітаційною системою вентиляції. Варіант проекту низькоенергетичного індивідуального житлового будинку (рис. 2) із застосуванням системи фасадної теплоізоляції з товщиною теплоізоляційного шару $\delta_{із}=20$ см і вікон з коефіцієнтом теплопередачі $U_{вік}=1,7$ Вт/м²·К при заміні системи вентиляції на механічну з рекуперацією тепла характеризується низькими енергетичними ($q_{буд} = 17,83$ кВт·год/м²·рік) і екологіч-

ними (емісія CO₂=252 м³/рік) параметрами при терміні окупності T_{ок}= 21 рік (I=111,396 тис. грн.). Якщо ціни на енергоносії зростатимуть надалі, термін окупності термомодернізації відповідно буде зменшуватись, а отже, зменшиться і час повернення інвестицій.

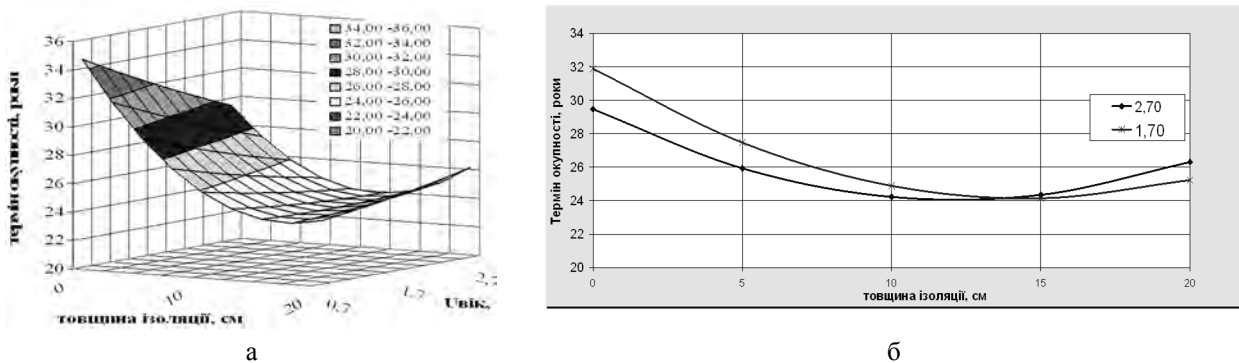


Рис. 2. Термін окупності інвестицій при реалізації варіантів проектів індивідуального будинку з механічною системою вентиляції залежно від теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій (а) та від товщини теплоізоляційного шару (б)

Висновки

Аналіз енергетичних, екологічних та економічних показників житлових будинків, дає можливість вибору раціональних варіантів, які стосуються зовнішніх огорожувальних конструкцій та системи вентиляції, розроблення проектних рішень енергоефективного житла та системи керування параметрами енергоощадності на всіх етапах життєвого циклу будинку при інтегрованому проектуванні низькоенергетичних будинків.

Встановлення механічної системи вентиляції з коефіцієнтом рекуперації понад 70% і оптимізація теплотехнічних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій забезпечує одержання енергетичних показників будинків, які в процесі експлуатації характеризуються низькою потребою в первинній енергії для забезпечення оптимальних умов мікроклімату, що сприяє зниженню емісії CO₂. Успішна реалізація проектів низькоенергетичних будинків ґрунтується на аналізі математичних моделей терміну повернення капіталовкладень і визначає їх інвестиційну привабливість.

1. *Zrównoważone budownictwo. Seria Dokumenty Unii Europejskiej dotyczące budownictwa.* – Warszawa: ITB, 2010.
2. Саницький М.А., *Енергозберігаючі технології в будівництві [Навч. посібник]* / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, У.Д. Маруцак. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 248 с.
3. Вуйцікевич М. Аналіз енергетичних показників індивідуальних будинків / М. Вуйцікевич, М. Саницький, Р. Секрет // *ЕКОінформ.* – 2011. – № 3 (263). – С. 50–51.
4. Фаренюк Г.Г. *Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій* / Фаренюк Г.Г. – К.: Гама-Принт, 2009. – 216 с.
5. *Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implantation* / J. Kurnitski, A. Saari, T. Kalamees et al. // *Energy and building.* – 2011. – № 43. – P. 3279-3288.
6. Гоц В.В. *Управління інформацією по фазам життєвого циклу девелоперського проекту* / В.В. Гоц // *Управління розвитком складних систем.* – 2012. – Вип. 9. – С. 30 – 35.
7. *Методи оцінки енергетично-екологічних показників будинків індивідуальної забудови* / М.А. Саницький, У.Д. Маруцак, Р. Секрет, М. Вуйцікевич, В.В. Гоц // *Міжвідомчий науково-технічний збірник “Будівельні конструкції”* – К.: НДІБК, 2013. – Вип. 77 – С. 323-327.
8. Уйма А. *Збалансована термомодернізація багатоквартирного будинку* / А. Уйма, А. Ліс // *ЕКОінформ.* – 2011. – № 4 (264). – С. 12–13.
9. *Sekret, R. Relation between energy characteristics and cost for single family buildings* / Sekret R., Sanytsky M., Wojcikewicz M. // *Proceedings of the 4th International conference on contemporary problems in architecture and construction, September 24-27, 2012.* – Czestochowa, 2012. – P. 220 – 226.