

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЖИТТЄВОМУ ЦИКЛІ ОБ'ЄКТІВ ЖИТЛОВОГО БУДІВНИЦТВА

©2024 КОЗИК В. В., МАРУЩАК У. Д., МАРКО О. Й.

УДК 624.04:502
JEL: O18; Q01; Q32

Козик В. В., Марущак У. Д., Марко О. Й. Оцінка енергоефективності в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва

Будівлі споживають значну кількість енергії та ресурсів на всіх етапах свого життєвого циклу, спричиняючи величезний вплив на навколишнє середовище. Енергетичний аналіз життєвого циклу – це цілісний підхід до оцінки проектно-енергетичної ефективності будівель. Незважаючи на те, що нове будівництво пов'язане зі зведенням енергоефективних, стійких будівель, потреба в енергії в будівельному секторі буде збільшуватися через постійно зростаючий попит на житло. Тому житлове будівництво має значний потенціал для енергозбереження та потенціал для подальших досліджень. Метою статті є енергетичний аналіз життєвого циклу будівель для формування стратегічної основи для зменшення енергетичного сліду будівельного сектора. У статті досліджено енергоефективні рішення на стадії вибору будівельних систем для зведення зовнішніх стінових конструкцій. Критеріями оцінки обрано показники опору теплопередачі, втіленої енергії та викиди вуглекислого газу від виробництва будівельних матеріалів. Показано, що за теплотехнічними показниками конструкції з фасадною теплоізоляцією задовольняють вимоги чинного законодавства. Порівняння показників втіленої енергії показало, що для стінової конструкції з повнотілої цегли цей показник у 2,0–2,7 рази вищий, ніж для стін з використанням енергоефективних будівельних матеріалів, що зумовлено високою щільністю керамічної цегли та значними енерговитратами на її випал. Для газобетонних стін значення втіленої енергії становить 769 і 1019 МДж, а показник втіленого вуглекислого газу – 54 та 69 кг/м² при використанні пінополістиролу та мінеральної вати відповідно. Оцінка енергії життєвого циклу створює стратегічну основу для зменшення попиту на енергію в будівельному секторі для практичної реалізації забудовниками. Перспективами подальших досліджень у цьому напрямі є визначення втіленої енергії запропонованих рішень з урахуванням довговічності будівельних матеріалів.

Ключові слова: енергоефективність, життєвий цикл, житлове будівництво, втілена енергія, стіновий матеріал, теплоізоляційний матеріал, викиди CO₂.

Рис.: 3. **Табл.:** 2. **Бібл.:** 12.

Козик Василь Васильович – кандидат економічних наук, професор, професор кафедри економіки підприємства та інвестицій, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна)

E-mail: vasyk.v.kozyk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4204-6026>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/S-3628-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35758697100>

Марущак Уляна Дмитрівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельного виробництва, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна)

E-mail: uliana.d.marushchak@lpnu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3451-7521>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/Q-9466-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57192589055>

Марко Олександр Йосифович – аспірант кафедри економіки підприємства та інвестицій, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна)

E-mail: oleksandr.y.marko@lpnu.ua

UDC 624.04:502
JEL: O18; Q01; Q32

Kozyk V. V., Marushchak U. D., Marko O. Yo. Assessment of Energy Efficiency in the Life Cycle of Residential Building Objects

Buildings consume significant amounts of energy and resources at all stages of their life cycle, causing a huge impact on the environment. Life cycle energy analysis is a holistic approach to assessing the design energy efficiency of buildings. Although new construction involves the energy-efficient, sustainable buildings, the energy demand in the construction sector will increase due to the ever-increasing demand for housing. Therefore, housing construction has significant potential for energy saving and potential for further research. The aim of the article is an energy analysis of the life cycle of buildings to formulate a strategic framework for reducing the energy footprint of the construction sector. The article examines energy-efficient solutions at the stage of selection of building systems for the construction of external wall structures. The evaluation criteria were the indicators of heat transfer resistance, embodied energy and carbon dioxide emissions from the production of building materials. It is shown that in terms of thermal and technical indicators, structures with façade thermal insulation meet the requirements of the current legislation. Comparison of embodied energy indicators showed that for a wall structure made of solid bricks, this figure is 2.0–2.7 times higher than for walls using energy-efficient building materials, which is due to the high density of ceramic bricks and significant energy consumption for their firing. For aerated concrete walls, the value of embodied energy is 769 and 1019 MJ, and the embodied carbon dioxide value is 54 and 69 kg/m² when using expanded polystyrene and mineral wool, respectively. Life cycle energy assessment provides a strategic framework for reducing energy demand in the construction sector for practical implementation by developers. Prospects for further research in this direction are to determine the embodied energy of the proposed solutions, taking into account the durability of building materials.

Keywords: energy efficiency, life cycle, residential construction, embodied energy, wall material, thermal insulation material, CO₂ emissions.

Fig.: 3. **Tabl.:** 2. **Bibl.:** 12.

Kozyk Vasyl V. – PhD (Economics), Professor, Professor of the Department of Economics and Business Investment, National University «Lviv Polytechnic» (12 Stepana Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine)

E-mail: vasyk.v.kozyk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4204-6026>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/S-3628-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=35758697100>

Marushchak Uliana D. – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Construction Production, National University «Lviv Polytechnic» (12 Stepana Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine)

E-mail: uliana.d.marushchak@lpnu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3451-7521>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/Q-9466-2017>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57192589055>

Marko Oleksandr Yo. – Postgraduate Student of the Department of Economics and Business Investment, National University «Lviv Polytechnic» (12 Stepana Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine)

E-mail: oleksandr.y.marko@lpnu.ua

Енергоефективність будівельного сектора, який є споживачем значної кількості енергетичних і сировинних ресурсів, є визначальним вектором державної економіки країн світу та України зокрема, оскільки створює умови надійного енергозабезпечення, забезпечує енергетичну безпеку держави, її низьковуглецевий інноваційний розвиток. Принципи енергоефективності в будівництві повинні враховувати соціальну, економічну та екологічну спрямованість на всіх етапах життєвого циклу будівель, починаючи з низькоенергоємних будівельних матеріалів і до мінімізації енергоспоживання на етапі експлуатації. Житлові будівлі, маючи емоційну та архітектурну цінність, вимагають значної кількості енергії для забезпечення показників комфорту, що зумовлює значне навантаження на довкілля та вимагає впровадження енергоефективних заходів. Зведення нових будівель дає змогу повною мірою реалізувати всі інноваційні технологічні рішення з метою підвищення енергоефективності за реалізації проектів нульенергетичних і «розумних» будинків.

Будівельний сектор є одним із найбільш енергота ресурсоємних секторів світової економіки. На будівлі в США і Європейському Союзі припадає близько 65% і 42% загального енергоспоживання відповідно. Викиди парникових газів у будівельному секторі становлять 35–40% загальних викидів як у США, так і в ЄС [1]. Споживання енергії та природних ресурсів підвищуватиметься в подальшому, що пов'язано зі зростанням населення та урбанізацією. За даними Міжнародної фінансової корпорації (IFC), більше половини населення світу проживає в містах, і, за прогнозами, до 2050 р. ця кількість зросте до 68 %, а до 2060 р. попит на розширення простору приведе до зростання площі будівель удвічі, причому більша частина припадає на житлові будинки [2]. Слід зазначити, що, незважаючи на повномасштабну війну, ринок житла в

Україні продовжує працювати, проте з меншою інтенсивністю порівняно з 2021 р. Найбільші обсяги нового будівництва у 2023 р. зафіксовані в Києві, Київській, Вінницькій, Львівській та Івано-Франківській областях, що пов'язано з безпековими чинниками [3]. У структурі сучасного будівельного фонду в Європі житлові будинки становлять 75% загальної площі, а нежитлові будівлі – 25% [4].

Особливістю енергоспоживання житлових будівель є витрата значної кількості енергії для забезпечення необхідного рівня комфорту. Тому розвиток будівельної галузі базується на принципах сталого розвитку, циркулярної економіки з урахуванням оцінки життєвого циклу (*Life Cycle Assessments – LCA*). При цьому будівництво споживає енергію на кожному етапі життєвого циклу, включно з виробництвом будівельних матеріалів, їх транспортуванням, зведенням будівель, їх експлуатацією та кінцем життєвого циклу (циклічна економіка) [5]. Наявні методи оцінки енергії життєвого циклу є об'ємними та ресурсомісткими, що вимагає розроблення комплексної та інтегрованої бази знань і стандартів для аналізу енергії життєвого циклу будівель, починаючи з ранньої стадії проектування, з використанням інформаційного моделювання будівель (BIM) [6].

Промисловість будівельних матеріалів, особливо виробництво цементу, вапна, арматури, стінових і теплоізоляційних матеріалів потребує значних затрат енергії. Разом із тим, на стадії експлуатації будівля, спроектована щонайменше на п'ятдесятирічний термін служби, використовує принаймні в п'ять разів більше енергії, ніж для виробництва матеріалів, транспортування та будівництва [7]. На цьому етапі життєвого циклу більшість енергії використовується для опалення, кондиціонування, вентиляції та штучного освітлення, що зумовлює значний вуглецевий слід, оскільки

приблизно дві третини глобального попиту на енергію в будівельному секторі задовольняється за рахунок викопного палива. Найбільш енергоємним кінцевим споживанням у будинках ЄС є опалення приміщень, на яке припадає близько 70% енергоспоживання [2]. Зважаючи, що трансмісійні втрати зумовляють значну частку енерговтрат, а останні на пряму залежать від теплотехнічних характеристик теплоізоляційної оболонки будинку, то вибір будівельних матеріалів при проектуванні зовнішніх огорожувальних конструкцій має визначальне значення. Це зумовлює потребу в тристоронній стратегії – інтенсивного зниження попиту на енергію в будівництві, її декарбонізації та впровадження технологій для будівельних матеріалів, які зменшують викиди CO₂ протягом життєвого циклу, що приводить як до зниження попиту на енергію, так і до скорочення викидів.

Вплив будівельної діяльності на навколишнє середовище постійно зростає. У зв'язку з цим у нове будівництво все частіше впроваджуються проекти енергоефективного, «зеленого» та «розумного» житла. «Зелене» будівництво максимально економить ресурси, включно з енергозбереженням, економією землі, економією води та економією матеріалів, щоб захистити навколишнє середовище та зменшити забруднення протягом усього життєвого циклу будівлі [8]. Високотехнологічні рішення «розумного» будинку дають змогу максимально оптимізувати параметри життя людини, розраховані на певні потреби мешканців та ситуації, пов'язані зі зміною середовища або безпекою, а також характеристики енергоспоживання, виходячи з цих потреб [9].

Зменшення енергоємності в нових будівлях зумовлено запровадженням енергетичних нормативів для будівель; мінімальних стандартів енергоефективності для приладів; та переходом на високоефективні технології теплопостачання. Незважаючи на норми, прийняті в європейських країнах, будівлі не відповідають плану досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 р., що передбачено Європейською стратегією European Green Deal. Згідно зі звітом International Energy Agency за 2022 р., відповідно до сценарію чистих нульових викидів до 2050 р. усі нові будівлі та 20% наявного будівельного фонду повинні бути без вуглецевого сліду до 2030 р. Тотальний підхід до нульових викидів в Європі до 2050 р. передбачає зниження попиту на викопне паливо, зокрема на вугілля – на 90%, нафту – на 75% і природний газ – на 55%.

Зведення будівель відповідно до високих стандартів ефективності означає амбітні дії щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та поліп-

шення якості життя. Разом із тим, вимоги щодо показників енергоефективності суттєво відрізняються в Україні та Європейському Союзі. З метою підвищення енергетичної ефективності будівель у Європейському Союзі у 2010 р. були прийняті поправки до Директиви 2002/91/ЕС, згідно з якими з 31 грудня 2020 року всі нові будівлі мають бути будівлями з майже нульовим енергоспоживанням (Near-Zero Energy Building – nZEB). Проектування та зведення будівель з майже нульовим енергоспоживанням базується на п'яти принципах: суперізолявані зовнішні оболонки; повітронепроникність конструкцій; високоефективні світлопрозорі конструкції; усунення теплопровідних включень у теплоізоляційній оболонці, а також вентиляція з рекуперацією тепла [10]. Крім цього, в таких будівлях передбачається обов'язкове використання відновлювальних джерел енергії, що визначає екологічність проектів. Вимоги щодо енергоефективності будівель у Європейському Союзі базуються на показнику споживання первинної енергії, який визначає питому річну потребу будівлі в невідновлюваній первинній енергії для опалення, охолодження, гарячого водопостачання, вентиляції та освітлення. Так, у Польщі для житлових будівель, які споруджуються, значення цього показника не повинно перевищувати 70 кВт·год/(м²·рік).

Зметою сприяння підвищенню енергоефективності будівель та досягнення національної мети енергоефективності щодо зменшення енергоспоживання будівель у 2017 р. прийнято Закон України «Про енергетичну ефективність будівель», який передбачає зміни в енергоспоживанні при проведенні заходів з підвищення енергоефективності з метою розвитку будівництва із нульовим споживанням енергоресурсів. Законом передбачена обов'язкова енергетична сертифікація на об'єкти нового будівництва та вже побудовані будівлі з метою визначення фактичних її показників, проведення оцінки відповідності зазначених показників встановленим мінімальним вимогам до енергетичної ефективності будівель. На відміну від європейських вимог мінімальні вимоги енергоефективності при новому будівництві в Україні полягають у забезпеченні показників будинку класу енергетичної ефективності не нижче С. В основу класифікації покладено показник відносного відхилення питомого енергоспоживання на опалення та охолодження від граничного значення, при цьому не враховується енергоспоживання на гаряче водопостачання, вентиляцію та освітлення. Згідно з ДБН В.Б.2.6-31:2021 для житлових будівель граничне питоме енергоспоживання на опалення та

охладження не повинно перевищувати 65–120 кВт·год/м² залежно від поверховості та температурної зони, що значно перевищує європейські показники.

Використання будівельних матеріалів для проектування конструкцій базується на комплексному багатоцільовому аналізі, який включає забезпечення несучої здатності, довговічності, енергетичної та економічної ефективності. Авторами [11] запропоновано оптимізаційну модель вибору будівельних матеріалів у рейтинговій системі LEED, яка є основою для створення економічних «зелених» будівель. Одним із критеріїв оцінки матеріалу конструкції є втілена енергія, яка є важливим показником для оптимізації енергії всього будинку. *Втілена енергія* – це загальна енергія, необхідна для видобутку, обробки, виробництва та доставки будівельних матеріалів на будівельний майданчик, тому вона вважається показником загального впливу будівельних матеріалів на навколишнє середовище. Енергія виробництва матеріалів є найбільшою частиною загального життєвого циклу втіленої енергії будівлі та включає всю енергію, що споживається прямо чи опосередковано в основних виробничих процесах. Встановлено, що вартість будівлі має кореляцію з втіленою в ній енергією. Для комплексного зниження енергоспоживання будівлі необхідно вести облік енергії всього життєвого циклу, включно з не тільки експлуатаційною, але й втіленою.

Тому *метою* дослідження є оцінка технічних рішень зовнішніх стінових конструкцій за теплотехнічними та екологічними показниками.

Матеріали та методи. Вибір будівельного матеріалу може багаторазово впливати на енергоспоживання будівлі на різних етапах її життєвого циклу – на стадії будівництва, експлуатації та ремонту чи реконструкції. У дослідженні розглядається повнотіла керамічна цегла, пустотіла керамічна цегла, блоки керамічні та газобетонні – як найбільш використовувані матеріали в новому будівництві стінових конструкцій [12]. Товщину стін з керамічних матеріалів приймали рівною 380 мм, з газобетонних блоків – 300 мм. Як теплоізоляційні матеріали вибрано плити зі спіненого полістиролу (EPS) і мінеральної вати (МВ) з коефіцієнтом теплопровідності в умовах експлуатації $B \lambda = 0,044 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. Для утеплення зовнішніх стін розглянуто систему фасадної теплоізоляції класу А. Розрахунок теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій проведено за допомогою програмного комплексу Cadeepro.

Для порівняння втіленої енергії та викидів вуглекислого газу різних видами типів стін нових

будівель розглядали 1 м² стінової конструкції. Виробничі потреби в енергії та викиди CO₂ застосованих матеріалів у зовнішніх стінових конструкціях наведено в *табл. 1*. Втілену енергію матеріалів розраховано без урахування відходів кожного матеріалу, що утворюється під час зведення стіни.

Таблиця 1

Енергія виробництва та викиди CO₂ будівельних матеріалів

Матеріал	Енергія виробництва, МДж/кг	Викиди CO ₂ , кг/кг
Цегла керамічна	3,00	0,23
Газобетон	3,50	0,28
Розчин будівельний	1,11	0,16
Спінений полістирол	86,40	2,71
Мінеральна вата	28,00	1,35
Скломітка	28,00	1,54

Розрахунок товщини теплоізоляційного матеріалу розраховано з умови забезпечення мінімального опору теплопередачі стінових конструкцій згідно з вимогами ДБН В. 2.6-31:2021 для першої температурної зони. На *рис. 1* наведені схеми типових стін та результати розрахунку їх теплотехнічних показників.

При використанні ефективних стінових матеріалів – керамічних та газобетонних блоків – товщина теплоізоляційного матеріалу зменшується до 100 мм, тоді як для стіни з повнотілої та пустотілої цегли товщина теплоізоляційного шару становить 150 мм.

Значення опорів теплопередачі зовнішніх стін коливаються в межах 4,06–4,76 м²К/Вт, що визначає співрозмірні трансмісійні тепловтрати в опалювальний період та теплонадходження в період охолодження (*табл. 2*). Показники теплової інерції D для всіх варіантів зовнішніх стін перевищують 4, що визначає необхідну теплостійкість конструкцій у літній період згідно з ДБН В.2.6-31:2021.

Враховуючи енергію на виробництво матеріалів, а також їх потребу на зведення 1 м² зовнішніх стінових конструкцій різних варіантів, розраховано їх втілену енергію (*рис. 2*). Показник втіленої енергії стіни при використанні у фасадній системі теплоізоляції мінеральної вати на 17–32% більший порівняно із системами, у яких використано спінений полістирол. Зовнішні стіни з ефективних стінових матеріалів характеризуються нижчими значеннями втіленої енергії порівняно з повнотілою керамічною цеглою. Так, для 1 м² стіни з керамічної цегли виробничий енергетичний показник становить 2105 та 2478 МДж у випадку застосування

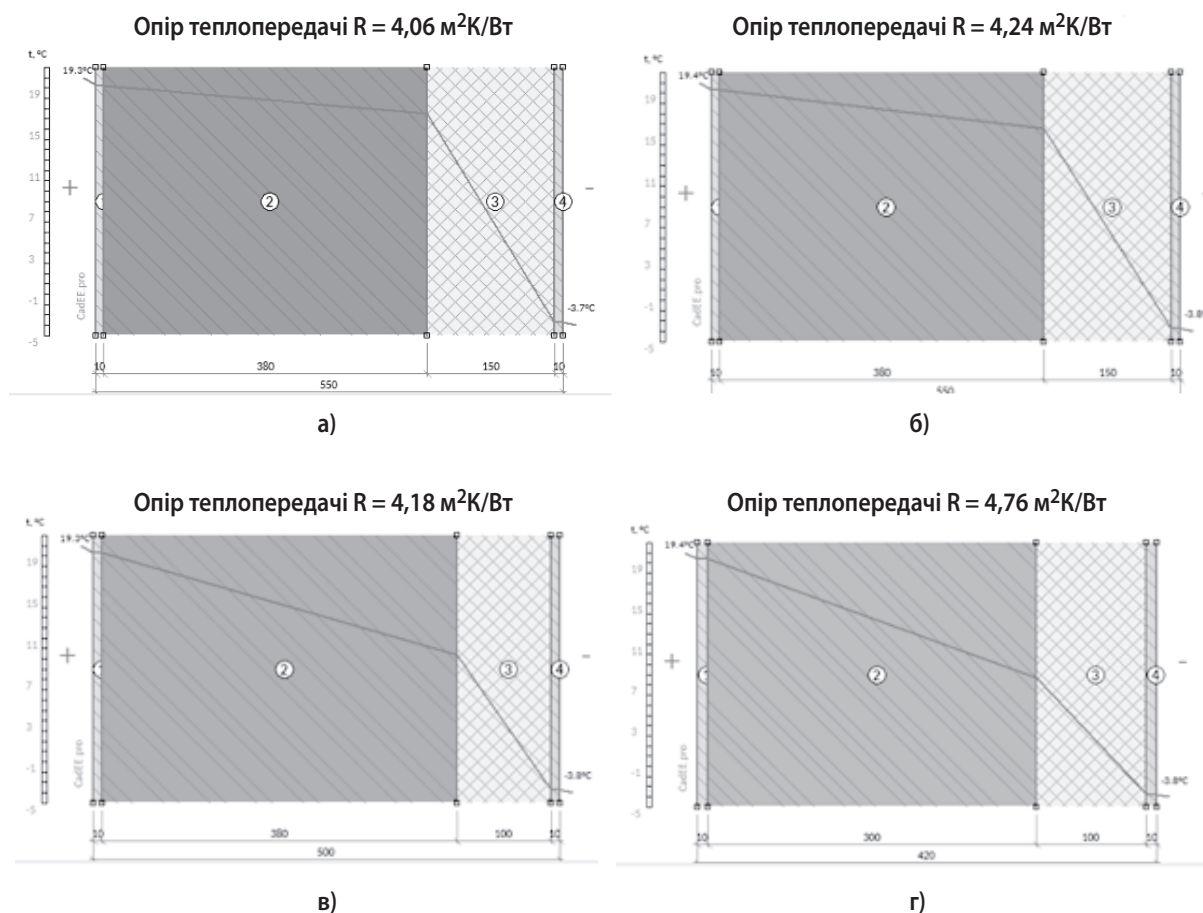


Рис. 1. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією класу А: з повнотілої керамічної цегли (а), з повнотілої керамічної цегли (б), керамічних блоків (в) і газобетонних блоків (г)

Примітка: 1 – внутрішня штукатурка, 2 – стіновий матеріал, 3 – теплоізоляційний шар, 4 – зовнішня штукатурка.

Таблиця 2

Теплотехнічні показники конструкцій зовнішніх стін

Система утеплення	Товщина теплоізоляційного шару, мм	Опір теплопередачі, R, м²К/Вт	Показник теплової інерції, D
Цегла керамічна повнотіла + EPS	150	4,06	6,18
Цегла керамічна пустотіла + EPS	150	4,24	6,31
Керамічні блоки + EPS	100	4,18	6,05
Газобетон + EPS	100	4,76	5,89
Цегла керамічна повнотіла + MB	150	4,06	6,20
Цегла керамічна пустотіла + MB	150	4,24	6,32
Керамічні блоки + MB	100	4,18	6,01
Газобетон + MB	100	4,76	5,90

пінополістиролу та мінеральної вати відповідно. Тоді як газобетонна стіна характеризується втіленою енергією на рівні 769–1019 МДж залежно від теплоізоляційного матеріалу.

Аналіз викидів втіленого CO₂ зовнішніх стін свідчить про пряму залежність від показника втіленої енергії (рис. 3).

Вищими показниками викидів CO₂ характеризуються конструкції зовнішніх стін із системою фасадної теплоізоляції з використанням мінеральної вати. Так, для стіни з повнотілої керамічної цегли, утепленої мінераловатними плитами, емісія CO₂ становить 189 кг/м², що на 13,8% більше, ніж для стіни, утепленої плитами спіненого полісти-

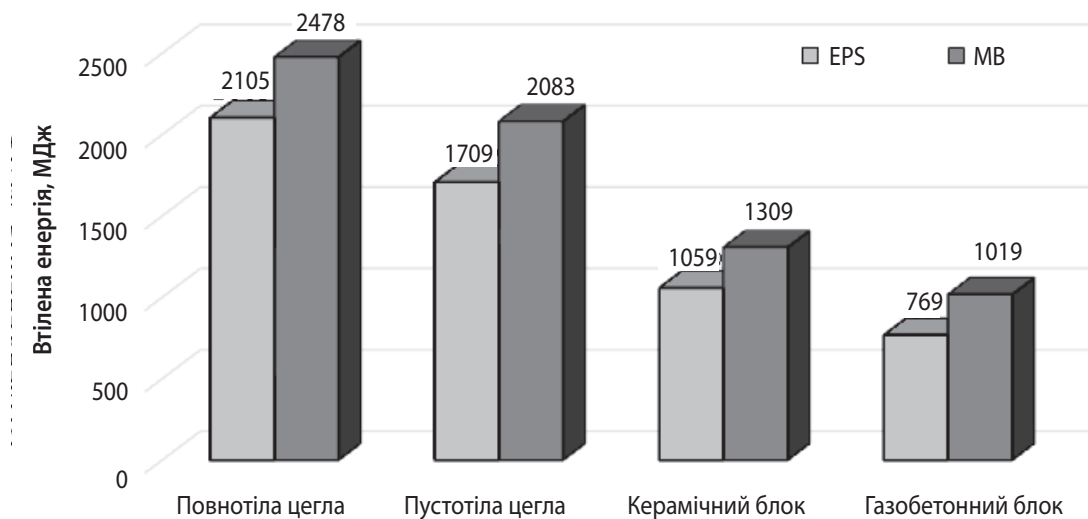


Рис. 2. Втілена енергія зовнішніх стінових конструкцій

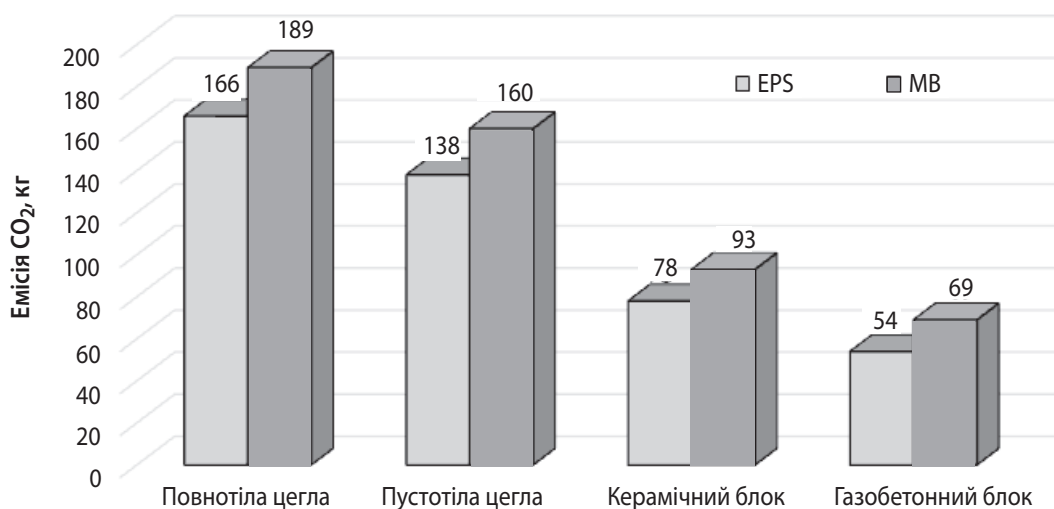


Рис. 3. Викиди CO₂ при виготовленні матеріалів для 1 м² стінових конструкцій

ролу. Для газобетонних стін значення втіленого вуглекислого газу становить 54 та 69 кг/м² при використанні пінополістиролу та мінеральної вати відповідно.

ВИСНОВКИ

Потенціал підвищення енергоефективності будівельного фонду визначається зниженням енергоспоживання і викидів CO₂, а також економічними та суспільними перевагами. Одним із методів оцінки енергоефективності є аналіз енергоспоживання будівель протягом їх життєвого циклу (LCA), що дає змогу визначати фази найбільшого споживання енергії та розробки стратегій для її зменшення. На етапі проектування будівель важливе значення має вибір матеріалів, що ґрунтується на

показниках, які забезпечують високі теплотехнічні показники конструкцій і мінімальне споживання енергії на стадії їх виробництва (початкова втілена енергія).

Порівняння стінових конструкцій показує, що стіна з повнотілої керамічної цегли, а також стіни, утеплені мінеральною ватою, характеризуються вищими значеннями втіленої енергії та викидів CO₂. З точки зору енергоефективності й екологічності газобетонні блоки та пінополістирольний утеплювач розглядаються як стійкі матеріали для зовнішніх стін будівель, оскільки вони характеризуються найнижчими показниками втіленої енергії та викидів вуглецю. Для газобетонних стін значення втіленої енергії становить 769 та 1019 МДж, а показник втіленого вуглекислого газу – 54 та

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Wang H. et al. Application of Wall and Insulation Materials on Green Building: A Review. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Iss. 9. Art. 3331.
DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093331>
2. Green Buildings. IFC. URL: <https://www.ifc.org/en/what-we-do/sector-expertise/climate-business/promoting-sustainable-innovation/green-buildings>
3. Залозних К. Будівництво в Україні у 2023 р. *GMK Center*. URL: <https://gmk.center.ua/infographic/obsiah-budivnytstva-v-ukraini-u-2023-r-napolovnyu-menshyj-za-dovoiennyj-riven/>
4. Boermans T. et al. Principles for nearly Zero-Energy Buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements. *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*, 2011.
5. Tsai W.-H., et al. Incorporating Life Cycle Assessments into Building Project Decision-Making: An Energy Consumption and CO₂ Emission Perspective. *Energy*. 2011. Vol. 36. No. 5. P. 3022–3029.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.046>
6. Devender D., Boeing L. Life cycle energy analysis of buildings: A systematic review. *Building and Environment*. 2024. Vol. 252. Art. 111160.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111160>
6. Decorte Y., Van Den Bossche N., Steeman M. Importance of technical installations in whole-building LCA: Single-family case study in Flanders. *Building and Environment*. 2024. Vol. 250. Art. 111209.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111209>
7. Mahboob M., Ali M., Rashid T., Hassan R. Assessment of embodied energy and environmental impact of sustainable building materials and technologies for residential sector. *Engineering Proceedings*. 2021. Vol. 12. Iss. 1. Art. 62.
DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2021012062>
8. Ashok A. D., Sujitha E. Greenhouse structures, construction and design. *International Journal of Chemical Studies*. 2020. SP-9(1). P. 40–45.
DOI: <https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1a.11417>
9. Chakraborty A. et al. Smart Home System: A Comprehensive Review. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. Vol. 2. Art. 7616683.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/7616683>
10. Sanytsky M., Sekret R., Wojcikiewicz M. Energetic and ecological analysis of energy-saving and passive houses. *SSP-Journal of Civil Engineering*. 2012. Vol. 7. Iss. 1. P. 71–78.
DOI: <https://doi.org/10.2478/v10299-012-0020-3>
11. Chi B. et al. Construction waste minimization in green building: A comparative analysis of LEED-NC 2009 certified projects in the US and China. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 256. Art. 120749.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120749>
12. Marushchak U., Pozniak O. Analysis of wall materials according to thermal parameters. *Theory and*

REFERENCES

- Ashok, A. D., and Sujitha, E. "Greenhouse structures, construction and design". *International Journal of Chemical Studies*, SP-9(1) (2020): 40-45.
DOI: <https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1a.11417>
- Boermans, T. Principles for nearly Zero-Energy Buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements. *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)*, 2011.
- Chakraborty, A. et al. "Smart Home System: A Comprehensive Review". *Journal of Electrical and Computer Engineering*, art. 7616683, vol. 2 (2023).
DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/7616683>
- Chi, B. et al. "Construction waste minimization in green building: A comparative analysis of LEED-NC 2009 certified projects in the US and China". *Journal of Cleaner Production*, art. 120749, vol. 256 (2020).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120749>
- Decorte, Y., Van Den Bossche, N., and Steeman, M. "Importance of technical installations in whole-building LCA: Single-family case study in Flanders". *Building and Environment*, art. 111209, vol. 250 (2024).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111209>
- Devender, D., and Boeing, L. "Life cycle energy analysis of buildings: A systematic review". *Building and Environment*, art. 111160, vol. 252 (2024).
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111160>
- "Green Buildings". IFC. <https://www.ifc.org/en/what-we-do/sector-expertise/climate-business/promoting-sustainable-innovation/green-buildings>
- Mahboob, M. et al. "Assessment of embodied energy and environmental impact of sustainable building materials and technologies for residential sector". *Engineering Proceedings*, art. 62, vol. 12, no. 1 (2021).
DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2021012062>
- Marushchak, U., and Pozniak, O. "Analysis of wall materials according to thermal parameters". *Theory and Building Practice*, vol. 4, no. 1 (2022): 63-70.
DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.01.063>
- Sanytsky, M., Sekret, R., and Wojcikiewicz, M. "Energetic and ecological analysis of energy-saving and passive houses". *SSP-Journal of Civil Engineering*, vol. 7, no. 1 (2012): 71-78.
DOI: <https://doi.org/10.2478/v10299-012-0020-3>
- Tsai, W.-H. et al. "Incorporating Life Cycle Assessments into Building Project Decision-Making: An Energy Consumption and CO₂ Emission Perspective". *Energy*, vol. 36, no. 5 (2011): 3022-3029.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.046>
- Wang, H. et al. "Application of Wall and Insulation Materials on Green Building: A Review". *Sustainability*, art. 3331, vol. 10, no. 9 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093331>
- Zaloznykh, K. "Budivnytstvo v Ukraini u 2023 r." [Construction in Ukraine in 2023]. *GMK Center*. <https://gmk.center.ua/infographic/obsiah-budivnytstva-v-ukraini-u-2023-r-napolovnyu-menshyj-za-dovoiennyj-riven/>