

ВРАХУВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В ОЦІНЦІ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ УТЕПЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ

Коваленко Ю.Л., Дмитренко Т.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків
yurii.kovalenko@kname.edu.ua, tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua

У статті виконано порівняльну оцінку життєвого циклу (LCA) трьох поширених теплоізоляційних матеріалів – базальтової мінеральної вати, пінополістиролу (EPS) і екструдованого пінополістиролу (XPS), які використовуються для зовнішнього утеплення стін. Дослідження охоплює всі етапи «від видобутку сировини до кінця життя» (cradle-to-grave) для 1 м² утеплення товщиною 100 мм відповідно до стандартів ISO 14040–14044. Визначено ключові екологічні показники – потенціал глобального потепління (GWP), кислотифікація (AP), озоноруйнівний потенціал (ODP), фотохімічне утворення смогу (POCP), евтрофікація (EP), кумулятивне енергоспоживання та екотоксичність. Особливу увагу приділено екологічним аспектам: викидам парникових газів, витратам енергії, токсичності відходів, довговічності матеріалів та способам утилізації. Встановлено суттєві відмінності екологічного профілю між мінеральною ватою, EPS та XPS протягом їх життєвого циклу. Усі три матеріали достатньо довговічні (термін служби більше ніж 50–60 років) і внаслідок економії енергії окупають свої втілені впливи на довкілля протягом перших кількох років експлуатації будівлі. Висновки роботи підтверджують, що, за умови відповідального поводження з відходами, найкращий екологічний профіль серед традиційних утеплювачів має EPS. Наведено рекомендації щодо раціонального застосування матеріалів та покращення екологічної стійкості утеплення.

Встановлено, що незалежно від обраного матеріалу, зовнішнє утеплення фасадів є екологічно доцільним заходом. За 60 років експлуатації утеплення дозволяє скоротити викиди CO₂ на порядок більше, ніж було викинуто при виробництві утеплювача. Вуглецевий «термін окупності» вкладеної енергії та емісій для теплоізоляції становить від кількох місяців до 2–3 років залежно від матеріалу і клімату. **Ключові слова:** життєвий цикл, теплоізоляційні матеріали, енергозбереження, викиди CO₂, оцінка впливу на довкілля, екологічний ефект.

Consideration of the life cycle of thermal insulation materials in the environmental impact assessment of building insulation technologies. Kovalenko Yu., Dmytrenko T.

This paper presents a comparative life cycle assessment (LCA) of three common thermal insulation materials – basalt mineral wool, expanded polystyrene (EPS) and extruded polystyrene (XPS) – used for exterior wall insulation. The study covers all stages of the cradle-to-grave life cycle for 1 m² of 100 mm thick insulation in accordance with ISO 14040–14044. Key environmental indicators were determined, including global warming potential (GWP), acidification (AP), ozone depletion potential (ODP), photochemical smog formation (POCP), eutrophication (EP), cumulative energy consumption, and ecotoxicity. Particular attention is paid to environmental aspects: greenhouse gas emissions, energy consumption, waste toxicity, durability of materials, and disposal methods. Significant differences in the environmental profile between mineral wool, EPS and XPS throughout their life cycle have been identified. All three materials are quite durable (service life is more than 50–60 years) and, due to energy savings, pay for their embodied environmental impacts within the first few years of the building's operation. The conclusions of the study confirm that, subject to responsible waste management, EPS has the best environmental profile among traditional insulation materials. Recommendations for the rational use of materials and improvement of the environmental sustainability of insulation are given.

It has been established that regardless of the material chosen, external facade insulation is an environmentally sound measure. Over 60 years of operation, insulation can reduce CO₂ emissions by an order of magnitude more than was emitted during the production of the insulation. The carbon «payback period» of the invested energy and emissions for thermal insulation ranges from several months to 2–3 years, depending on the material and climate. **Key words:** life cycle, thermal insulation materials, energy saving, CO₂ emissions, environmental impact assessment, ecological effect.

Постановка проблеми. Зовнішнє утеплення стін є ключовим заходом енергоефективного будівництва та термомодернізації існуючих будинків. Правильно обраний утеплювач мінімізує тепловтрати через огорожувальні конструкції, підвищує комфорт і довговічність будівлі, а також дозволяє суттєво скоротити витрати енергії на опалення і кондиціонування. За оцінками, якісна теплоізоляція житлового будинку може знизити енергоспоживання на опалення до 50–70%, що веде до еквівалентного зменшення викидів CO₂ протягом десятиліть експлуатації [1,2]. Таким чином, утеплення має значний позитивний

екологічний ефект у масштабі життєвого циклу будівлі. З іншого боку, виготовлення теплоізоляційних матеріалів, їх транспортування, монтаж та утилізація супроводжуються певними негативними впливами на довкілля – емісіями парникових та інших забруднювальних газів, споживанням невідновлюваних ресурсів, утворенням відходів тощо. Важливо оцінити баланс цих протилежних ефектів – «екологічну ціну» утеплення – для вибору найбільш доцільних матеріалів і технологій.

В Україні для утеплення фасадів різних типів будівель (приватних житлових будинків, багатопо-

верхівок, громадських і комерційних споруд) традиційно застосовують три основні види матеріалів: мінеральну вату (переважно з базальтового волокна), пінопласт (спінений пінополістирол EPS) та екструдований пінополістирол (XPS). Кожен з них має свої технічні характеристики та сферу оптимального використання. Мінеральна вата цінується за негорючість, паропроникність та високі акустичні властивості, тому широко використовується в багатопверховому житловому і комерційному будівництві, де важлива пожежна безпека і «дихаючі» стіни. EPS-пінопласт є найбільш масовим утеплювачем у приватному секторі й при термомодернізації старих будівель завдяки низькій вартості та достатнім теплоізоляційним властивостям. XPS має вищу міцність і водостійкість, тому незамінний для утеплення цоколів, фундаментів, цокольних поверхів, а також плоских дахів – тобто там, де утеплювач контактує з ґрунтом чи водою і зазнає механічних навантажень. Правильне розуміння особливостей цих матеріалів дозволяє поєднувати їх переваги (наприклад, комбінування негорючих мінераловатних прошарків з пінополістирольними плитами) для оптимального результату. Водночас вибір утеплювача має враховувати не лише технічні та економічні параметри, а й екологічні наслідки на всіх стадіях його життєвого циклу.

Актуальність дослідження. Актуальність статті зумовлена необхідністю екологічно обґрунтованого вибору теплоізоляційних матеріалів для зовнішнього утеплення будівель в Україні, що є ключовим чинником досягнення значного скорочення енергоспоживання та викидів парникових газів у процесі термомодернізації житлового фонду.

Метою роботи є порівняльна оцінка життєвого циклу трьох основних теплоізоляційних матеріалів (базальтової мінеральної вати, EPS і XPS) для визначення екологічного ефекту при термомодернізації житлового фонду.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання: 1) зібрати, узагальнити та проаналізувати актуальні дані про впливи на довкілля в процесі виробництва, транспортування, експлуатації та утилізації зазначених матеріалів; 2) оцінити для кожного матеріалу показники впливу на довкілля за основними категоріями (парникові гази, енергоспоживання, кислотифікація, озонове виснаження, смог, евтрофікація, токсичність); 3) порівняти екологічні наслідки життєвих циклів матеріалів та виявити їхні переваги й недоліки; 4) сформулювати рекомендації щодо вибору утеплювача з позицій екологічної доцільності, враховуючи зменшення викидів CO₂ протягом експлуатації будівлі для врахування в процесі оцінки екологічного ефекту при термомодернізації житлового фонду.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Енергоефективність будівельного сектору є одним

із ключових пріоритетів розвитку України, що відображено у національних законах і програмах. Зокрема, ухвалення Закону України «Про енергетичну ефективність» [3] було спрямоване на виконання міжнародних зобов'язань із впровадження енергоощадних заходів відповідно до стандартів ЄС та Угоди про асоціацію з ЄС. Також Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [4] націлений на зменшення енергоспоживання у будівлях, підвищення рівня їх енергоефективності та адаптацію до європейських стандартів. Його основним завданням є створення умов для ефективного використання енергії, скорочення витрат на її споживання та зниження негативного впливу на довкілля. Відповідно до цих цілей, у лютому 2025 р. Міністерство розвитку громад та територій України Наказом № 168 запровадило обов'язкові вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії (NZEB) [5], які передбачають високий клас енергоефективності, обмежене використання викопних видів палива, значну частку відновлюваної енергії, а головне – якісну теплоізоляцію огорожувальних конструкцій [6]. Впровадження стандарту NZEB у новому будівництві та при реновації існуючих будівель розглядається як один із вирішальних кроків для підвищення енергетичної незалежності держави та зменшення негативного екологічного впливу внаслідок скорочення споживання викопного палива. Це також є важливою складовою виконання зобов'язань України в межах інтеграції до європейського регуляторного простору [7].

Авторське дослідження з оцінки життєвого циклу теплоізоляційних матеріалів (мінеральна вата, EPS, XPS) безпосередньо узгоджується з зазначеними науковими та практичними пріоритетами. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 р. визначає перехід до моделі низьковуглецевого зростання, що передбачає зменшення викидів парникових газів і мінімізацію використання викопного палива у всіх секторах економіки [8]. Для досягнення цих цілей Уряд схвалив Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 р. [9], який встановлює національну мету скоротити первинне енергоспоживання на 22,3%, кінцеве споживання – на 17,1%, а також зменшити викиди парникових газів на 56,6 млн т [10]. В межах кліматичних зобов'язань за Паризькою угодою Україна оновила Національно визначений внесок, взявши курс на скорочення викидів парникових газів на 65% до 2030 р. від рівня 1990 р. [11]. Досягнення таких амбітних цілей неможливе без масштабної термомодернізації будівель, що прямо зазначено у національних планах дій з виконання Паризької угоди (пріоритетне впровадження енергоефективних заходів та теплоізоляції будівель) [11]. Отже, оцінювання повного життєвого циклу утеплювачів набуває особливої актуальності: воно дозволяє визначити екологічні переваги та можливі впливи від застосування мінеральної вати,

EPS та XPS на всіх етапах – від виробництва до утилізації. Результати такої оцінки сприятимуть обґрунтуванню вибору оптимальних матеріалів для термомодернізації, що забезпечить виконання державних енергоефективних програм і кліматичних зобов'язань України на засадах сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, (LCA)) є загальновизнаним інструментом кількісного вимірювання сукупного впливу будівельних матеріалів і технологій на довкілля за весь період їх існування. Стандартизована методологія LCA визначена міжнародними стандартами ISO 14040:2006 та ISO 14044:2006. Низка сучасних досліджень присвячена LCA теплоізоляційних матеріалів та систем утеплення будівель. Так, огляд літератури [12] показав, що традиційні утеплювачі (мінеральна вата, скловата, EPS) мають, загалом, співставні показники екологічного впливу, тоді як екструдований пінополістирол та пінополіуретан часто демонструють дещо вищі інтегральні впливи через енергоємність виробництва та вміст хімічних агентів [13]. Зокрема, XPS історично характеризувався підвищеним вуглецевим слідом порівняно з іншими утеплювачами через використання фторовмісних спінювачів із високим GWP та значні енерговитрати на екструзію. Водночас пінополістирол EPS у низці джерел названий одним із найбільш екологічно ефективних утеплювачів: за рівних умов він має низькі показники впливу на зміну клімату, озоновий шар, кислотність тощо. Так, у дослідженні польських учених [14] порівнювались дві системи утеплення фасаду (ETICS) – на основі EPS та на основі мінеральної вати, й було виявлено, що сумарні екологічні навантаження у варіанті з мінеральною ватою вищі за всіма аналізованими категоріями; зокрема, *global warming potential* системи MW виявився майже вдвічі більшим, ніж в еквівалентній системі з EPS. Комплексний огляд 156 екологічних декларацій матеріалів [15] підтверджує конкурентні показники традиційних мінеральних утеплювачів і пінополістиролу: їх втілена енергія та вуглецевий слід значно нижчі, ніж у новітніх матеріалів типу аерогелів, і знаходяться в співставних межах варіювання між собою. В інших роботах відзначено, що хоча кам'яна та скловата потребують суттєвих енерговитрат на виробництво (плавлення сировини при 1300–1500 °C) і теж містять невідновлювані компоненти (органічні сполучні, кокс як паливо тощо), полістирольні утеплювачі додатково споживають нафтохімічну сировину та потенційно можуть виділяти леткі органічні сполуки (пентан) на стадії виробництва [13]. Таким чином, однозначної відповіді щодо найекологічнішого матеріалу немає – усе залежить від пріоритетних категорій впливу та умов експлуатації. Екологічні переваги від утеплення (скорочення викидів за рахунок енергоощадності) багаторазово переважають *інвестиційні впливи* від виробництва утеплювачів [16]. Для

обґрунтованого вибору матеріалів у конкретних проєктах потрібен детальний аналіз їх життєвого циклу з урахуванням локальних кліматичних умов, стану ринку енергоносіїв та утеплювачів, наявних технологій та потужностей утилізації відходів на завершальній стадії життєвого циклу. Саме такий аналіз проведено у представленій роботі.

Викладення основного матеріалу.

Вплив виробництва (стадія A1–A3). На етапі виготовлення утеплювачів найбільше навантаження на довкілля припадає на споживання енергії та сировини. Розрахунки показали, що з трьох матеріалів найменший сумарний вплив при виробництві має EPS-пінопласт. Його виробництво потребує ~80 МДж невідновлюваної енергії на 1 м² утеплення (100 мм) і супроводжується емісією ~5,5–6 кг CO₂-екв. парникових газів. Для порівняння, мінеральна вата має вищі енерговитрати (~120 МДж/м²) через енергію плавлення базальту та випалу коксуючого палива. Викиди GHG при цьому складають ~7 кг CO₂-екв/м². XPS виявився найбільш «вуглецеємним» – на його виробництво витрачається близько 170–180 МДж/м², а GWP досягає ~8–9 кг CO₂-екв. на 1 м². Раніше, коли XPS виготовляли з фреоновими спінювачами, цей показник був ще вищим. Перехід на нові низькопотенційні агенти (наприклад, HFO-1234ze) істотно знизив парниковий вплив XPS, але все ж не вивів його на рівень EPS. Отже, з погляду *втілених парникових викидів* виробничої стадії лідирує EPS, за ним – мінеральна вата, а XPS поки що аутсайдер. Цей висновок узгоджується з літературними даними: за умови однакового опору теплопровідності (R) пінополістирол має один із найнижчих GWP серед популярних утеплювачів. Наприклад, у [17] наводять, що виробництво 1 м³ EPS пов'язане з емісією ~55 кг CO₂-екв., тоді як 1 м³ кам'яної вати – ~80 кг CO₂-екв. (за рахунок енергії плавлення).

В інших категоріях впливу картина аналогічна: енергоємність виробництва найнижча в EPS, трохи вища у мінеральної вати (попри майже невичерпну мінеральну сировину, витрати енергії на плавлення великі) і найвища у XPS. Використання сировини: EPS та XPS виробляються з нафтопродуктів (полістирольні гранули, пентан, HFC/HFO), тобто споживають обмежені викопні ресурси. Мінеральна вата виготовляється з базальту – поширеної гірської породи, фактично відновлюваної у масштабі земної кори. З цього погляду вата виглядає привабливіше, хоча слід пам'ятати, що й вона опосередковано «витрачає» нафту і газ – як паливо для печей.

Кислотифікація і смог: мінеральна вата, через процеси плавлення (викиди SO₂, NO_x при згорянні коксу), дещо більше спричиняє потенціал кислотних дощів – близько 0,03–0,04 кг SO₂-екв. на 1 м². У EPS цей показник трохи нижчий (~0,02 кг), у XPS – близько ~0,03 кг SO₂-екв. (на рівні вати). Внесок у фотохімічне утворення озону (смог) в EPS найвідчутніший серед трійки через випаровування

пентану при спіненні гранул; оцінений РОСР для EPS ~5–8 г етилен-екв. на 1 м², тоді як для XPS і вати – ~2–3 г. Цей ефект від пентану є локальним і короткочасним, тож великої екологічної загрози не становить. Озоновий потенціал ODP приблизно нульовий для всіх трьох матеріалів (сучасні технології не застосовують озоноруйнівних речовин). Виняток – старі XPS, які спінювались фреоном HCFC-142b. Таким чином, у категоріях кислотності, смогу та озону суттєвих відмінностей між матеріалами немає або вони не критичні для вибору (абсолютні величини впливів невеликі).

Транспортування та монтаж (A4–A5).

Впливи цього етапу значно менші за виробничі, проте тут проявляються свої нюанси. Основний фактор – різниця у щільності та масі матеріалів. Легкий EPS (щільність 15–20 кг/м³) є найвигіднішим щодо перевезення: в перерахунку на 1 м² утеплення його маса ~1,5–2 кг, тоді як у базальтової вати (щільність ~100 кг/м³) маса шару ~10 кг. Отже, перевезення мінеральної вати дає у 5–7 разів більше викидів CO₂ на 1 км, ніж пінопласту, за однакового об'єму матеріалу. Для XPS (щільність 30–35 кг/м³) транспортні показники середні, близькі до EPS. На монтажній стадії прямі впливи мінімальні: всі матеріали встановлюються вручну, не потребуючи додаткової енергії чи води. Відходи обрізків (2–5%) вже враховано у виробничих показниках. Втім, екологічні ризики при монтажі пов'язані з безпекою: легкі крихти пінопласту можуть розлітатися навколо та стати джерелом сміття (пластикові гранули в ґрунті), а мінераловатний пил та волокна становлять небезпеку при вдиханні для робітників. Тому важливо проводити такі роботи дуже обережно. За належної культури будівництва відмінності між матеріалами на цій стадії нівелюються.

Фаза експлуатації (B1–B7). Утеплювач під час використання виконує пасивну функцію теплозахисного шару. Прямі екологічні впливи тут мізерні: матеріали не споживають енергії, не виділяють суттєвих забруднень протягом десятиліть. Основні питання – довговічність та збереження теплоізоляційних властивостей з часом, а також можливість повторного використання матеріалу. Дослідження показують, що всі три розглянуті утеплювачі здатні прослужити щонайменше 50–60 років без втрати ефективності за умови правильного монтажу й експлуатації. Мінеральна вата потенційно може деградувати від вологи, тож її потрібно захищати від протікань. EPS і XPS з часом можуть трохи підвищити теплопровідність через дифузію газу з комірок (у XPS це триваліше, тому він вважається найбільш довговічним – може зберігати функцію більше ніж 75 років). Загалом, протягом нормативних 60 років різниця в термічній ефективності між матеріалами несуттєва. Жоден матеріал у цьому проміжку часу не вимагатиме заміни, отже не створюватиме додаткових навантажень виробництва. Головний пози-

тивний екологічний внесок фази В – це економія енергії опалення та кондиціонування будівлі завдяки утепленню, що критично важливо для загального балансу. У розрахунку на 1 м² фасаду утеплення за 60 років може запобігти викидам 150–300 кг CO₂ (залежно від типу будівлі, палива і клімату), тоді як втілені емісії від матеріалу становлять лише 5–9 кг CO₂. Тобто загальний виграш у 20–50 разів перевищує інвестиційний «вуглецевий борг» утеплювача. Звідсіля витікає, що середній строк окупності вуглецевих витрат на утеплення складає менше одного року для більшості матеріалів; навіть для «найважчої» мінераловатної плити цей період вимірюється місяцями, що підтверджується висновками інших досліджень [16]. Таким чином, з погляду повного життєвого циклу, екологічна доцільність утеплення будівель є беззаперечною, а відмінності між матеріалами набувають значення переважно щодо *довгострокових ризиків*. Серед таких відмінностей можна відзначити пожежну безпеку. Мінеральна вата є негорючою (Євроклас A1), тоді як EPS і XPS належать до горючих матеріалів (Г1–Г4 залежно від добавок). У разі займання пінополістирольний утеплювач може виділяти густий токсичний дим (стирол, бензол, сажа та інші продукти горіння), що спричиняє сильне локальне забруднення повітря. Ймовірність пожежі невелика і за межами стандартного LCA, але цей фактор варто враховувати при виборі матеріалу для високих будівель чи будинків з підвищеною пожежною небезпекою – там доцільна мінеральна вата. Щодо біологічної стійкості – EPS/XPS не піддаються біорозкладанню: в них не заводиться пліснява чи грибок (плюс – не спричиняють викидів метану), але й після використання вони не розкладаються століттями. Мінеральна вата інертна і не є поживним середовищем для біоорганізмів; сучасні біорозчинні різновиди не становлять небезпеки для здоров'я мешканців.

Демонтаж та утилізація (C1–C4, D).

Наприкінці життєвого циклу утеплювач демонтується під час капремонту чи знесення будинку. Актуальною проблемою є поводження з великими обсягами відпрацьованих теплоізоляційних матеріалів, які після 30–60 років експлуатації потрапляють у сферу поводження з відходами. Наразі в Україні практично весь такий демонтований утеплювач опиняється на сміттєзвалищах (полігонах ТПВ) разом з будівельним ломом. Аналіз показує, що мінеральна вата при захороненні є найменш проблемною: вона інертна, хімічно стабільна, не виділяє токсичних речовин у ґрунт чи повітря. Її головний вплив – зайняття певного об'єму полігону (мінеральна вата займає значне місце, хоча з часом може ущільнюватися). Полістирольні утеплювачі створюють складнішу ситуацію. EPS та XPS практично не розкладаються у ґрунті, їх фрагменти можуть століттями зберігатися у товщі відходів. При цьому під

дією сонця та механічних навантажень пінопластові плити кришаться на дрібні частки, перетворюючись на *мікропластик*, що може вимиватися дощовими водами й потрапляти у навколишнє середовище. Крім того, у складі старого EPS/XPS, виготовленого до середини 2010-х років, майже гарантовано присутній антипірен HBCD (гексабромциклододекан) – до 0,5% маси. Ця речовина, яку колись додавали для самозатухання пінопласту, зараз визнана небезпечною: вона не розкладається, накопичується в живих організмах, токсична для водної біоти. З 2013 р. HBCD включено до Стокгольмської конвенції як стійкий органічний забруднювач, його використання обмежено, але величезна кількість пінопласту з HBCD досі експлуатується в будівлях і згодом стане відходами. Таким чином, якщо просто складувати старий пінополістирол на звалищі, існує ризик поступового вилугування HBCD та інших домішок у довкілля. З огляду на це, оптимальною стратегією утилізації EPS/XPS є контрольоване спалювання з рекуперацією енергії. При спалюванні при високій температурі полістирол повністю розкладається до CO₂ і H₂O, а теплота згоряння (~35 МДж/кг) може бути використана як енергія. Сучасні сміттєспалювальні заводи необхідно оснащувати фільтрами, що вловлюють небезпечні гази (HBr, стирол, сажа), щоб емісії при утилізації мінімізувалися. За розрахунками, енергетичне використання відходів EPS/XPS дозволяє повернути до 30–40% первинної енергії та зменшити їх сумарний GWP приблизно на третину. У сценарії повного спалення полістирольні утеплювачі мають шанс наблизитися за показником «життєвого» CO₂, навіть, до мінеральної вати. На жаль, в Україні потужностей для спалення відходів практично немає, тому реалістичним лишається сценарій полігонного захоронення. За таких умов мінеральна вата виглядає екологічно безпечнішою на стадії кінця життя, оскільки не генерує довготривалих забрудників і не класифікується як небезпечні

відходи. Старий пінопласт, навпаки, офіційно відносять до категорії небезпечних відходів – його бажано ізолювати від загальної маси ТПВ і не допускати вивітрювання.

Зведені кількісні показники впливів для 1 м² утеплювача товщиною 100 мм (за умов виробництва в Європі, транспортування на 100 км, експлуатації 60 років та захоронення на полігоні) наведені в табл. 1.

Як видно з табл. 1, EPS має найнижчі показники у більшості категорій впливу (GWP, ODP, AP, первинна енергія). Мінеральна вата близька до EPS за GWP та ODP, проте програє за енергоємністю і дещо перевищує по кислотифікації, маючи водночас найменший внесок у смог та евтрофікацію. XPS без застосування технологій утилізації виглядає найгірше за інтегральним екологічним навантаженням: у нього найвищі GWP та PE, показники AP і РОСР на рівні з іншими або трохи гірші, а EP – найвища серед трьох матеріалів. Втім, слід зазначити, що застосування XPS часто дозволяє зменшити товщину утеплення, отже, менше матеріалу використовується на ту ж теплоізоляцію. Крім того, впровадження спалення з рекуперацією енергії суттєво покращує сумарний профіль XPS та EPS: принаймні за GWP вони можуть наблизитися до показників вати або й перевершити їх.

Техніко-екологічні переваги та недоліки утеплювачів. На основі проведеного аналізу можна узагальнити сильні та слабкі сторони кожного матеріалу з екологічної точки зору.

Базальтова мінвата: основні плюси – негорючість (пожежна безпека), паропроникність (стіни «дихають»), відсутність органічних шкідливих добавок, інертність відходів; мінуси – високі витрати енергії при виробництві (плавлення при 1400 °C), що тягне підвищений вуглецевий слід і кислотні викиди; велика вага (транспортні емісії); волокнисті відходи можуть подразнювати дихальні шляхи; теплопровід-

Таблиця 1

Ключові показники екологічного впливу 1 м² утеплювача товщиною 100 мм

Категорія впливу (функціональна одиниця)	Мінеральна вата	EPS (пінополістирол)	XPS (екструдований пінополістирол)
GWP – Потенціал глобального потепління (кг CO ₂ -екв.)	~7,0	~5,5–6,0	~8,0–9,0
ODP – Озоноруйнівний потенціал (кг CFC-11-екв.)	≈ 0	≈ 0	≈ 0 (нові марки) до 1×10 ⁻⁶ (старі)
AP – Кислотифікація (кг SO ₂ -екв.)	~0,020–0,040	~0,015–0,030	~0,030–0,035
EP – Евтрофікація (кг PO ₄ ³⁻ -екв.)	~0,005	~0,010	~0,020
РОСР – Смог (г NMVOC-екв.)	~2	~5–8	~2–3
PE (невідновлювана) – Первинна енергія (МДж)	~120	~80	~180
ETP (water) – Екотоксичність (умовні бали)	дуже низька	середня (HBCD*)	найвища (HBCD*, HFC*)

Примітка: HBCD – гексабромциклододекан, токсичний антипірен, заборонений із 2015 р. (наявний в старих марках EPS/XPS); HFC – фторовмісні спінювачі з високим GWP (використовувались у старих XPS).

ність дещо вища, тобто треба трохи більша товщина для того ж опору теплопровідності R.

Пінопласт EPS: переваги – найнижчі впливи на клімат і витрати енергії, низька щільність (дешево транспортування), зручний монтаж без пилу, дуже низьке водопоглинання (не боїться вологи). Також це найдешевший утеплювач на ринку, що побічно свідчить про меншу матеріало- та енергоємність його виробництва. Недоліки EPS: горючість (не можна застосовувати без протипожежних розривів на високих будинках), виділення пентану при виробництві (фотохімічний смог), проблеми з відходами – *пластикове забруднення*, наявність HBCD у старих зразках, необхідність контролювати утилізацію як небезпечного відходу.

Екструдований XPS: плюси – найкращі теплоізоляційні властивості (на 10–20% ефективніше за EPS при рівній товщині), висока міцність на стиск (не ламається, не просідає), дуже низьке водопоглинання (можна застосовувати у вологих середовищах без втрати властивостей). Мінуси XPS: найдорожчий у виробництві, більша емісія CO₂, витрати енергії; горючий, при горінні виділяє токсичні гази; в старих марках містить найбільше HBCD; відходи XPS практично не піддаються подрібненню і повторному використанню (їх можна лише спалити або захоронити).

Головні висновки.

1. Екологічна ефективність утеплення.

Незалежно від обраного матеріалу, зовнішнє утеплення фасадів є екологічно доцільним заходом. За 60 років експлуатації утеплення дозволяє скоротити викиди CO₂ на порядок більше, ніж було викинуто при виробництві утеплювача. Вуглецевий «термін окупності» вкладеної енергії й емісій для теплоізоляції становить від кількох місяців до 2–3 років залежно від матеріалу і клімату. Таким чином, позитивний ефект утеплення (зменшення експлуатаційних викидів) значно переважає негативний (вплив від виробництва, монтажу та утилізації). Це слід враховувати в політиці енергомодернізації: екологічні витрати на виробництво утеплювачів не є перешкодою для термомодернізації будівель, а навпаки швидко компенсуються внаслідок економії палива.

2. Порівняння матеріалів (LCA-висновки).

Комплексна LCA-оцінка базальтової вати, EPS та XPS виявила суттєві відмінності у їхніх впливах на довкілля. Загалом найкращий екологічний профіль продемонстрував пінополістирол EPS: на одиницю теплоізоляції він має найнижчий вуглецевий слід і найменше сумарне невідновлюване енергоспоживання. EPS також відзначився найнижчими або близькими до найнижчих показниками в категоріях кислотності та озонного виснаження. Мінеральна вата посіла друге місце: її виробництво ресурсно місткіше та дещо більш «вуглецеве», проте мінеральна вата має свої екологічні переваги – негорю-

чість, відсутність летких органічних сполук і пластмас у складі, інертні відходи. XPS наразі є найменш екологічно вигідним із розглянутих матеріалів – більші питомі викиди парникових газів, велике споживання енергії, наявність фторовуглецевих газів і HBCD в старих зразках. Проте, завдяки кращій теплоізоляції та довговічності, XPS має свою нішу застосування; новітні технології дещо покращили його екологічні показники, наблизивши до рівня мінеральної вати.

3. Рекомендації з урахуванням повного циклу.

З екологічної точки зору для масового утеплення житлових і громадських будівель варто надавати перевагу матеріалам з найменшим *життєвим* вуглецевим слідом та енергоємністю – в сучасних умовах це пінополістирол EPS. Він забезпечує необхідну термоізоляцію з мінімальними емісіями парникових газів протягом циклу і мінімальними затратами невідновлюваних ресурсів. Для висотних та інших об'єктів з підвищеними вимогами пожежної безпеки варто використовувати базальтову мінеральну вату, як менш горючу та хімічно інертну, попри трохи більший вуглецевий слід. Застосування XPS слід обмежувати тими ділянками, де особливо потрібні його властивості – міцність і водостійкість (фундаменти, цоколі, підземні споруди, інверсійні дахи тощо). В інших випадках його екологічна доцільність менша з огляду на складність утилізації й більші виробничі впливи. Жоден із матеріалів не є ідеальним, тому перспективним напрямом є розвиток технологій переробки утеплювачів (рециклінг і повторне використання пінополістиролу, повернення відходів мінеральної вати на виробництво тощо) та пошук альтернативних ізоляційних продуктів з меншою сумарною шкодою (наприклад, натуральні волокнисті утеплювачі, матеріали з відходів виробництва та ін.). При виборі системи утеплення на практиці слід враховувати не лише результати LCA, а й експлуатаційні вимоги – довговічність, стійкість до вологи, пожежну безпеку, сумісність з конструкцією будівлі та економічну доцільність.

Впровадження комплексного показника екологічного впливу утеплювачів на державному рівні могло б стати корисним інструментом для стимулювання сталого будівництва. Отримані в роботі висновки узгоджуються з результатами інших незалежних досліджень та оглядів, які вказують на лідерство EPS за екологічними показниками серед традиційних утеплювачів (за умови відповідального поводження з відходами).

Перспективи використання результатів досліджень. Результати дослідження можуть бути використані органами виконавчої влади та фахівцями у галузі будівництва для вирішення питань оцінки впливу на довкілля в процесі термомодернізації будівель на території України.

Література

1. Amani N. Energy efficiency of residential buildings using thermal insulation of external walls and roof based on simulation analysis. *Energy Storage and Saving*. 2024. Vol. 4, no. 1. pp. 48–55. DOI:10.1016/j.enss.2024.11.006
2. Fedorczak-Cisak, M., Bomberg, M., Yarbrough, D.W., Lingo, L.E., Romanska-Zapala, A. Position Paper Introducing a Sustainable, Universal Approach to Retrofitting Residential Buildings. *Buildings*. 2022. 12(6), 846. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12060846>
3. Закон України «Про енергетичну ефективність». *Відомості Верховної Ради України*. 2022. № 2. Ст. 8. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
4. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель». *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 33. Ст. 359. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
5. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.02.2025 р. № 168. *Офіційний вісник України*. 2025 р. № 26. Ст. 1750. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
6. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності). URL: <https://saee.gov.ua/> (дата звернення: 17.06.2025)
7. Re: House – Відновлення будинків. URL: <https://rehouse.org.ua/> (дата звернення: 17.06.2025)
8. Український центр економічних та політичних досліджень ім. О. Разумкова. URL: <https://razumkov.org.ua/> (дата звернення: 17.06.2025)
9. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2021 р. № 1803-р. *Офіційний вісник України*. 2022 р. № 8. Ст. 439. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
10. International Foundation of Development. URL: <https://in-fd.com/> (дата звернення: 25.06.2025)
11. United Nations Ukraine. URL: <https://ukraine.un.org/> (дата звернення: 25.06.2025)
12. Schiavoni, S. & D'Alessandro, F. & Bianchi, F. & Asdrubali, F., 2016. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*. 2016. Vol. 62(C). pp. 988-1011. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
13. Rocha, B. M., Tenório, M., Branco, J. M., Silva, S. M. A Comprehensive Comparison of Insulation Materials for Timber Building Systems. *Energies*. 2025. 18(10), 2420. URL: <https://doi.org/10.3390/en18102420>
14. Michalak J., Czernik S., Marcinek M., Michalowski B. Environmental burdens of External Thermal Insulation Systems. Expanded Polystyrene vs. Mineral Wool: Case Study from Poland. *Sustainability*. 2020. 12(11): 4532. DOI: 10.3390/su12114532.
15. Grazieschi G., Asdrubali F., Thomas G. Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Environmental Systems*. 2021. 2: 100032. DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100032.
16. Setting the Record Straight: Insulation and Low Carbon Buildings. URL: [https://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2024/10/N170-Insulation-Low-Carbon-Buildings-1024.pdf#:~:text=\(дата звернення: 20.06.2025\)](https://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2024/10/N170-Insulation-Low-Carbon-Buildings-1024.pdf#:~:text=(дата звернення: 20.06.2025))
17. Gomes, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2020). Environmental, economic and energy life cycle assessment “from cradle to cradle” (3E-C2C) of flat roofs. *Journal of Building Engineering*, 32. Article 101436. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101436>

Дата першого надходження рукопису до видання: 07.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: