

ІНТЕНСИВНІСТЬ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ

Довготривала поведінка теплоізоляційних матеріалів визначає ефективність енергоощадних будівель. Попри нормативну орієнтацію на початкові значення теплопровідності, реальна експлуатація показує, що теплопровідність утеплювачів зростає з часом унаслідок вологопоглинання, механічної втоми, ультрафіолетового опромінення та природного старіння полімерної матриці. У зв'язку з цим особливого значення набуває оцінювання інтенсивності деградації теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі тривалої експлуатації фасадних систем будівель.

Метою роботи є визначення інтенсивності деградації теплопровідності теплоізоляційних матеріалів фасадних систем на основі експериментальних даних та побудова математичної моделі прогнозування їх теплофізичних характеристик у часі. Для опису зміни теплопровідності використано експоненційну модель $\lambda(t) = \lambda_0 e^{kt}$, де k характеризує швидкість (інтенсивність) деградації теплофізичних властивостей матеріалу.

На основі експериментальних даних, отриманих у період з 2013 по 2025 рік, досліджено зміну коефіцієнта теплопровідності для пінополістиролу густин 15, 25 та 35 кг/м³, екструдованого пінополістиролу, мінераловатних теплоізоляційних плит марок «Техноніколь» і «Rotys» та пінополіуретану. Для кожного матеріалу визначено коефіцієнт інтенсивності деградації k шляхом апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів.

Отримані результати показують, що швидкість деградації теплопровідності суттєво залежить від типу теплоізоляційного матеріалу та умов його експлуатації. Прогнозні розрахунки свідчать, що протягом 30 - 50 років експлуатації теплопровідність окремих утеплювачів може збільшуватися до 40 %, що призводить до відповідного зменшення теплового опору огорожувальних конструкцій.

Запропонована модель дозволяє прогнозувати зміну теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів упродовж життєвого циклу будівлі та враховувати інтенсивність деградації при оцінюванні енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Ключові слова: енергоефективність; тепла ізоляція; деградація теплопровідності, коефіцієнт теплопровідності, огорожувальна конструкція.

Вступ.

Підвищення рівня енергоефективності будівельного фонду є одним із ключових напрямів державної політики більшості країн світу в умовах обмеженості енергетичних ресурсів, зростання вартості енергоносіїв, геополітичної нестабільності та глобальних кліматичних змін. Будівельний сектор споживає значну частку первинної енергії, а огорожувальні конструкції (ОК) формують основну складову теплових втрат. Саме тому забезпечення нормативного рівня термічного опору ОК є визначальним чинником досягнення цільових показників енергозбереження.

В Україні проблема енергозбереження у будівлях має особливу актуальність у контексті післявоєнної відбудови та модернізації енергетичної інфраструктури. За аналітичними оцінками, питома енергоспоживання будівель в Україні у 2-3 рази перевищує відповідні показники країн Європейського Союзу, що свідчить про значний потенціал підвищення енергоефективності житлового та громадського фонду [1]. Середнє питома енергоспоживання житлових будівель в Україні становить близько 163 кВт·год/м² на рік [2], що значно перевищує показники сучасних енергоефективних будівель.

При цьому житловий сектор є одним з найбільших споживачів енергії в структурі кінцевого енергоспоживання країни. За даними енергетичного балансу, споживання енергії житловим сектором становить близько 13 601 тис. т н.е., що відповідає приблизно 28,5 % кінцевого енергоспоживання [2]. Значна частина цього споживання зумовлена недостатнім рівнем теплозахисту будівель та високими тепловтратами через ОК.

Водночас темпи термомодернізації будівель в Україні залишаються низькими. За оцінками експертів, щорічний рівень модернізації становить близько 0,1 % будівельного фонду, тоді як у країнах Європейського Союзу цей показник сягає близько 1 % на рік [2]. Така ситуація свідчить про необхідність масштабного впровадження програм термомодернізації та підвищення енергоефективності будівель.

Відповідно до довгострокової стратегії термомодернізації будівель, 85–90 % існуючих будівель, що не були суттєво пошкоджені внаслідок війни, продовжуватимуть експлуатуватися і у 2050 році [1]. Тому, підвищення енергоефективності наявного будівельного фонду є стратегічним завданням для забезпечення енергетичної стійкості країни.

За оцінками експертів, реалізація програм енергоефективної реконструкції потребує значних фінансових ресурсів. Загальний обсяг інвестицій у програму підвищення енергоефективності будівель до 2030 року оцінюється у межах від 172,9 до 934,3 млрд грн, при цьому необхідний обсяг співфінансування з державного бюджету становить від 43,3 до 168,7 млрд грн [1].

У цьому контексті особливого значення набуває ефективність застосування теплоізоляційних матеріалів у конструкціях зовнішніх огорожень будівель. Проектні теплотехнічні розрахунки огорожувальних конструкцій будівель, як правило, ґрунтуються на використанні номінальних (декларованих) значень коефіцієнта теплопровідності матеріалів, визначених у стандартизованих лабораторних умовах. У більшості випадків ці значення приймаються сталими протягом усього розрахункового строку експлуатації конструкції. Водночас результати експериментальних та аналітичних досліджень свідчать, що теплофізичні характеристики теплоізоляційних матеріалів змінюються з часом під впливом комплексу фізичних чинників: циклічного зволоження та висушування, температурних коливань, структурної релаксації, а також дифузійних процесів у теплоізоляційному матеріалі. Такі процеси зумовлюють поступове зростання коефіцієнта теплопровідності λ та, відповідно, зниження фактичного опору теплопередачі R огорожувальних конструкцій.

Нехтування часовою динамікою теплопровідності призводить до систематичної переоцінки енергоефективності будівель, заниження прогнозованих тепловтрат та потенційно нераціонального використання фінансових і матеріальних ресурсів при плануванні заходів з термомодернізації. У довгостроковій перспективі це може спричинити невідповідність фактичних показників споживання енергії розрахунковим значенням.

Сучасні підходи до визначення опору теплопередачі, зокрема відповідно до [3], базуються на припущенні про сталість коефіцієнта теплопровідності матеріалів протягом усього строку служби конструкції. У реальних умовах експлуатації ОК зазнають багаторічного впливу кліматичних факторів, що спричиняє незворотні зміни мікроструктури пористих матеріалів і газового заповнення пор [4]. У результаті відбувається поступове зростання λ , яке може бути відносно незначним у перші роки, але набуває суттєвого значення в довгостроковій експлуатації.

З огляду на викладене, актуальним є розроблення уніфікованого підходу до кількісного врахування деградації теплопровідності теплоізоляційних матеріалів у процесі експлуатації. У статті досліджується довготривала зміна коефіцієнта теплопровідності традиційних утеплювачів та обґрунтовується введення узагальненого коефіцієнта деградації, який може бути використаний у теплотехнічних розрахунках для підвищення їх точності та прогностичної надійності та становити практичний інтерес для енергоаудиторів.

Мета роботи.

Для кількісного врахування зміни теплофізичних характеристик теплоізолюючих матеріалів у процесі експлуатації в попередній роботі [5] введено коефіцієнт деградації теплопровідності D_t , який визначається як відношення фактичної теплопровідності матеріалу на період експлуатації t до його номінального (декларованого) значення:

$$D_t = \frac{\lambda_t}{\lambda_n},$$

де λ_n – номінальна теплопровідність матеріалу, визначена у стандартних лабораторних умовах або взята з Технічних вимог виробника теплоізолюючого матеріалу; λ_t – фактична теплопровідність через t років експлуатації. Коефіцієнт D_t є безрозмірною величиною і характеризує ступінь погіршення теплоізоляційних властивостей матеріалу в часі.

Для подальшого дослідження та моделювання на основі аналізу фізичних механізмів старіння теплоізоляційних матеріалів прийнято експоненційну математичну модель зміни теплопровідності:

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{kt},$$

де λ_0 – початкова теплопровідність при $t = 0$ (на початок експлуатації); k – експоненційний коефіцієнт деградації (1/рік); t — період експлуатації, роки.

Параметри λ_0 та k визначалися методом найменших квадратів шляхом лінеаризації залежності у вигляді:

$$\ln \lambda(t) = \ln \lambda_0 + kt.$$

Експоненційний характер зростання теплопровідності узгоджується з дослідженнями довготривалого старіння полімерних утеплювачів, де деградація пов'язана з дифузією газів і вологісними процесами [4, 6-9].

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є теплоізоляційні матеріали, що широко застосовуються у фасадних системах термомодернізації будівель. Аналіз виконано на основі довготривалих експериментальних спостережень за зміною коефіцієнта теплопровідності утеплювачів у реальних умовах експлуатації огорожувальних конструкцій. Дослідження охоплює період з 2013 по 2025 рік та базується на експериментально-розрахункових даних, отриманих шляхом вимірювання температурних полів та теплових потоків у шарах фасадних систем [5, 10].

Експериментальні значення коефіцієнта теплопровідності для досліджуваних матеріалів наведено у таблиці 1. Вказані значення характеризують фактичну теплопровідність матеріалів у різні роки експлуатації та використовуються як вихідні дані для подальшого аналізу деградації теплофізичних властивостей. Отримані результати дозволяють оцінити динаміку зміни теплопровідності утеплювачів у реальних кліматичних умовах та застосовуються для подальшого математичного моделювання процесів деградації теплоізоляційних матеріалів.

Таблиця 1 - Вихідні експериментальні значення λ (Вт/м·К) [5, 10]

Матеріал	2013	2019	2022	2024
ППС-15	0,055	0,060	0,057	0,057
ППС-25	0,050	0,057	0,057	0,054
ППС-35	0,047	0,049	0,053	0,042
Екстр. ППС	0,049	0,055	0,054	0,056
Техноніколь	0,042	0,048	0,048	0,048
Rotys	0,047	0,049	0,051	0,046
Пінополіуретан	0,022	0,030	0,030	0,030

Для більшості досліджуваних матеріалів спостерігається тенденція до збільшення коефіцієнта теплопровідності з часом експлуатації. Таке зростання може бути пов'язане з рядом фізичних процесів, зокрема накопиченням вологи у пористій структурі матеріалу, дифузиею газів у комірках полімерних утеплювачів, а також структурними змінами пористого середовища внаслідок тривалого температурно-вологісного впливу.

До дослідження включено як полімерні теплоізоляційні матеріали (пінополістирол різної густини, екструдований пінополістирол та пінополіуретан), так і мінераловатні теплоізоляційні плити. Такий вибір дозволяє порівняти поведінку різних типів утеплювачів у процесі довготривалої експлуатації, оскільки механізми зміни їх теплофізичних характеристик суттєво відрізняються.

Полімерні утеплювачі характеризуються пористою структурою із замкненими газонаповненими комірками, що забезпечує низькі значення теплопровідності, однак з часом можливе проникнення атмосферного повітря в пори та зміна складу газової фази. Мінераловатні матеріали мають волокнисту структуру, у якій теплоперенос відбувається через тверду фазу волокон і повітряні пори, а їх теплофізичні характеристики значною мірою залежать від рівня зволоження матеріалу.

Таким чином, досліджуваний набір матеріалів охоплює основні типи теплоізоляційних матеріалів, що використовуються у сучасних фасадних системах термомодернізації будівель, що дозволяє комплексно оцінити вплив тривалої експлуатації на зміну коефіцієнта теплопровідності та подальше визначення коефіцієнта деградації теплофізичних характеристик.

Методика.

Апроксимація експериментальних даних зміни коефіцієнта теплопровідності виконувалась на основі припущення про експоненційний характер його еволюції в часі, що описується залежністю

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{kt},$$

яка була приведена вище. З метою застосування методу найменших квадратів зазначену залежність було лінеаризовано шляхом логарифмування, у результаті чого отримано рівняння

$$\ln \lambda(t) = \ln \lambda_0 + kt,$$

яке відповідає лінійній функції відносно часу. Для кожного матеріалу формувалась масив експериментальних точок у координатах $(t_i, \ln \lambda_i)$, де значення t_i визначались як кількість років експлуатації відносно базового моменту спостереження, а λ_i - відповідні експериментально-розрахунково визначені коефіцієнти теплопровідності. На основі цих даних виконувалась лінійна регресія, в якій коефіцієнт k визначався як кутовий коефіцієнт апроксимуючої прямої. Обчислення параметрів регресії здійснювалось за стандартними формулами методу найменших квадратів із використанням сумарних характеристик вибірки.

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2},$$

де n - кількість точок; $x_i = t_i$; $y_i = \ln \lambda_i$.

Наступним кроком виконано зворотне перетворення шляхом експонування для отримання значення λ_0 . Адекватність апроксимації оцінювалась за коефіцієнтом детермінації R^2 , що характеризує ступінь узгодження моделі з експериментальними даними. Отримані параметри λ_0 та k використовувались для побудови аналітичної залежності $\lambda(t)$, яка застосовувалась для подальшого прогнозування зміни теплофізичних властивостей матеріалів та їх використання у теплотехнічних розрахунках огорожувальних конструкцій.

Результати.

Наведені графічні залежності на рисунку 1 підтверджують коректність прийнятої експоненційної моделі зміни коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів у часі. Лінеаризовані графіки у координатах $\ln(\lambda) - t$ демонструють близькість експериментальних точок до прямих ліній для більшості досліджуваних матеріалів, що свідчить про адекватність апроксимації та дозволяє інтерпретувати параметр k як сталу характеристику швидкості деградації. Найвищі значення нахилу спостерігаються для пінополіуретану та екструдованого пінополістиролу, що вказує на інтенсивні процеси зміни структури та газонаповнення, тоді як для мінеральних плит (зокрема «Rotys») і окремих марок пінополістиролу залежність є менш вираженою, що може свідчити про вищу стабільність або наявність розкиду експериментальних даних.

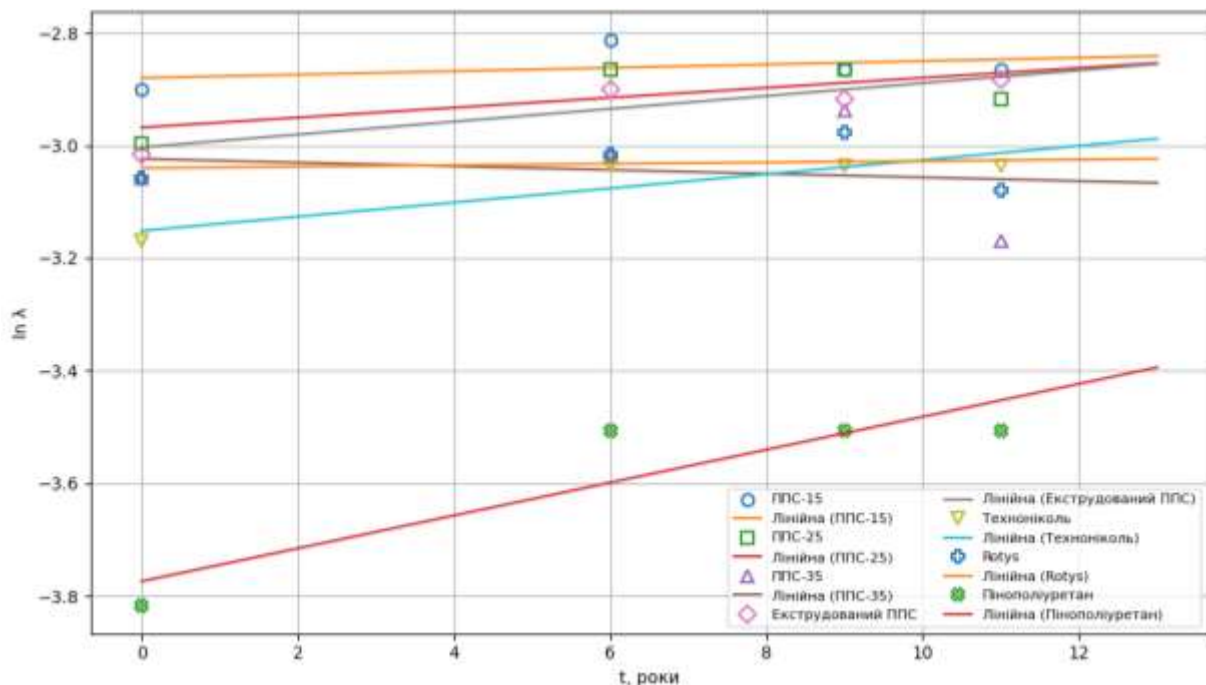


Рисунок 1 – Лінеаризована залежність $\ln(\lambda)$ від часу

Розрахунки показали, що для більшості матеріалів значення коефіцієнта швидкості деградації k є додатним, тобто в процесі експлуатації спостерігається зростання теплопровідності. Найбільш інтенсивне зростання в межах досліджуваної вибірки характерне для екструдованого пінополістиролу, мінераловатних плит типу «Техноніколь» та пінополіуретану. Для окремих матеріалів, зокрема ППС-35 та Rotys, отримані залежності виявилися менш стійкими, що може бути пов'язано з розкидом експериментальних значень, впливом умов зволоження або обмеженою кількістю часових точок спостереження. Одержані значення коефіцієнта k наведено в таблиці 2.

На рисунку 2 приведено прогнозні криві $\lambda(t)$ до 50 років експлуатації, які демонструють системне зростання теплопровідності для більшості матеріалів. Характер цього зростання є нелінійним і прискорюється з часом відповідно до експоненційного закону.

Аналіз прогнозних залежностей показує, що в процесі довготривалої експлуатації теплоізоляційні матеріали поступово втрачають теплозахисні властивості. Для більшості досліджуваних утеплювачів відносний тепловий опір через 50 років експлуатації може зменшуватися до 0,4–0,8 від початкового значення, що відповідає зростанню теплопровідності матеріалів.

Найбільша інтенсивність деградації спостерігається для пінополіуретану та екструдованого пінополістиролу, що пов'язано з дифузією газів у пористій структурі матеріалів. Для мінераловатних матеріалів зміна теплового опору є менш вираженою та значною мірою визначається рівнем зволоження волокнистої структури.

Отримані результати свідчать про необхідність врахування часової деградації теплофізичних властивостей при енергетичному моделюванні будівель та обґрунтуванні проектних рішень, а також, підтверджують доцільність використання експоненційної моделі деградації теплопровідності.

Таблиця 2 - Розраховані значення коефіцієнта швидкості деградації

Матеріал	k , 1/рік
ППС-15	0,00299
ППС-25	0,00882
ППС-35	-0,00328
Екстр. ППС	0,01139
Техноніколь	0,01258
Rotys	0,00126
Пінополіуретан	0,02922

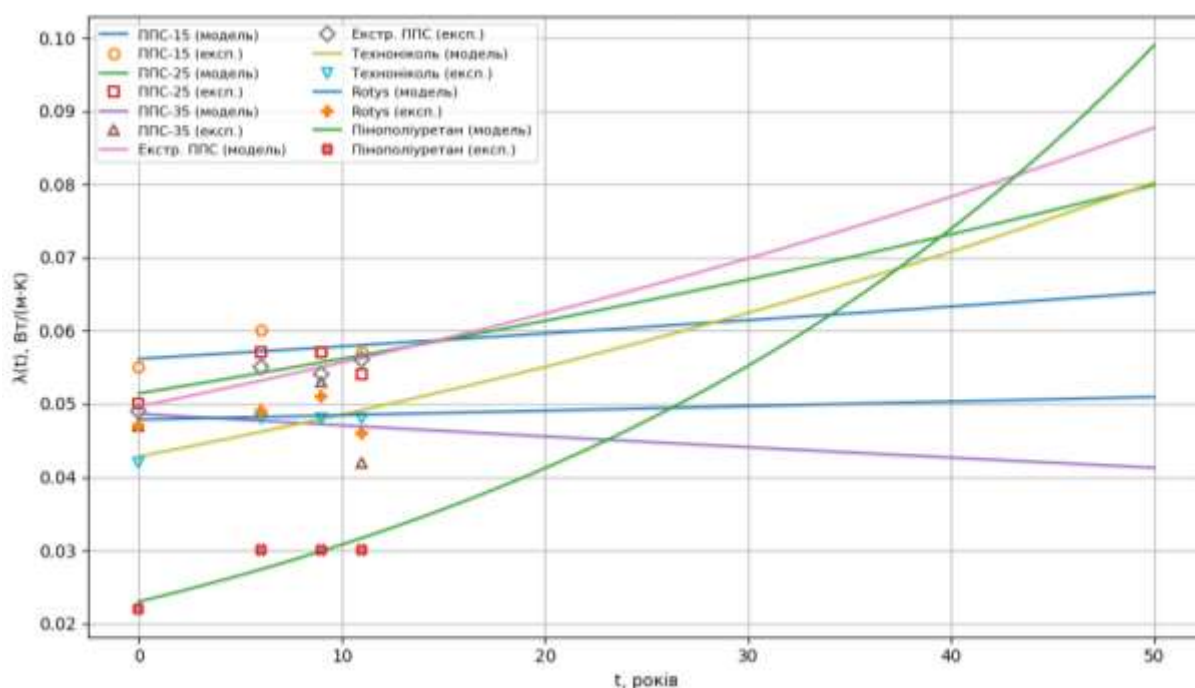


Рисунок 2 – Прогноз зміни коефіцієнта теплопровідності $\lambda(t)$ до 50 років експлуатації на основі експоненційної моделі з нанесенням експериментальних значень

Висновок.

У цій роботі досліджено інтенсивність деградації теплопровідності семи традиційних теплоізоляційних матеріалів, що використовуються при оздобленні фасадів огорожувальних конструкцій будівель. На основі багаторічних польових випробувань (2013–2024 рр.) побудовано експоненційну модель зміни теплопровідності $\lambda(t) = \lambda_0 e^{kt}$, і визначено коефіцієнти швидкості деградації k .

Отримані результати свідчать, що, для екструдованого пінополістиролу теплопровідність може збільшитись у 2–3,5 рази протягом 50 років, що становить суттєвий вплив на теплові втрати та економічну ефективність термомодернізації.

Пінополістирол марки 35 і мінерально-полімерні плити Rotys демонструють стабільність або навіть деяке покращення теплопровідності з часом, тоді як екструдованого пінополістиролу характеризуються високою швидкістю старіння.

В рамках подальших досліджень, доцільно розширити базу експериментальних спостережень, охопивши інші регіони з різними кліматичними умовами та випробувавши додаткові типи утеплювачів (пінополіізоціанурат, піноскло, вакуумні ізоляційні панелі, тощо). Потрібні також моделі, що враховують дію температурно-вологісних циклів та механічних навантажень, а також створення конструктивних рішень, які мінімізують газо- та волого дифузію.

Впровадження отриманих результатів у практику проектування та енергомодернізації будівель сприятиме підвищенню їхньої енергоефективності, зниженню викидів CO₂ та досягненню цілей сталого розвитку.

Отримані результати в частині апроксимації коефіцієнта теплопровідності при різних варіантах облаштування термоізоляції поверхні дотичні до виконання проекту №2025.06/0054 «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

Список використаної літератури

1. DiXi Group. Покроковий план енергоефективної відбудови України. <https://dixigroup.org/analytic/pokrokovyj-plan-energoefektyvnoyi-vidbudovy-v-ukrayini/> (дата звернення 28.02.2026)
2. ДОВГОСТРОКОВА СТРАТЕГІЯ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬ на період до 2050 року. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. 1314/39/63-23 від 23.12.2023. https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/66bb575f1e1d2.pdf (дата звернення 05.03.2026)
3. ДСТУ EN ISO 6946:2022 Будівельні компоненти. Термічний опір і теплопроникність. Методи розрахунку (EN ISO 6946:2017, IDT; ISO 6946:2017, IDT). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Чинний з 31.12.2023
4. Schumacher, Daniel & Guevara-Carrion, Gabriela & Kasper, Tina & Paul, Andreas & Elsner, Andreas & Peters, Bettina & Wollny, Wenke & Bluemel, Marcus & Hoelscher, Heike & Brzoska-Steinhaus, Nicola & Heil, Klaus & Schleelein, Lukas & Becker, Wolfgang & Gries, Ulrich & Vrabec, Jadran. (2026). Aging of polyurethane foam: Experimental analysis and modeling of cell gas composition and thermal conductivity. Applied Thermal Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129850>.
5. Басок Б., Гончарук С., Данішевський А., & Гоман Є. (2025). ДИНАМІКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ФАСАДІВ БУДІВЛІ. Енерготехнології та ресурсозбереження, 84(3), 119-128. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2025.09>
6. Kim, J.-H.; Kim, S.-M.; Kim, J.-T. Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard. *Energies* 2024, 17, 6105. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236105>
7. Berardi, Umberto. (2019). The impact of aging and environmental conditions on the effective thermal conductivity of several foam materials. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.022> .
8. BS EN 13165:2012. Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Rigid Polyurethane Foam (PU) Products - Specification. BSI Standard Publication: London, UK, 2016.
9. BS EN 13166:2012. Thermal Insulation Products for Building - Factory Made Phenolic Foam (PF) Products - Specification. BSI Standard Publication: London, UK, 2016.
10. Басок Б., Данішевський А. ДИНАМІКА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПІНОПОЛІУРЕТАНОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЛІ. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2025. 80(2), с.30-34. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327137>

A. Danishevskiy¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0002-6166-0999

¹**Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine**

INTENSITY OF THERMAL CONDUCTIVITY DEGRADATION IN THERMAL INSULATION MATERIALS FOR BUILDING FACADES

The long-term performance of thermal insulation materials determines the energy efficiency of buildings. Despite regulatory focus on initial thermal conductivity values, real-world operation shows that the thermal conductivity of insulation materials increases over time due to moisture absorption, mechanical fatigue, ultraviolet radiation, and natural aging of the polymer matrix. In this regard, assessing the rate of degradation of the thermophysical properties of thermal insulation materials during the long-term operation of building facade systems is of particular importance.

The aim of this work is to determine the rate of thermal conductivity degradation in facade system insulation materials based on experimental data and to develop a mathematical model for predicting their thermophysical properties over time. To describe the change in thermal conductivity, the exponential model $\lambda(t) = \lambda_0 e^{kt}$ is used, where k characterizes the rate (intensity) of degradation of the material's thermophysical properties.

Based on experimental data obtained between 2013 and 2025, changes in the thermal conductivity coefficient were investigated for expanded polystyrene with densities of 15, 25, and 35 kg/m³, extruded polystyrene foam, mineral wool insulation boards of the “Technicol” and “Rotys” brands, and polyurethane foam. For each material, the degradation intensity coefficient *k* was determined by approximating the experimental data using the least squares method.

The results obtained show that the rate of thermal conductivity degradation depends significantly on the type of thermal insulation material and its operating conditions. Predictive calculations indicate that over 30–50 years of operation, the thermal conductivity of certain insulation materials may increase by up to 40%, leading to a corresponding decrease in the thermal resistance of building envelopes.

The proposed model allows for predicting changes in the thermophysical characteristics of thermal insulation materials throughout a building’s life cycle and for accounting for the rate of degradation when assessing the energy efficiency of building envelope structures.

Keywords: energy efficiency; thermal insulation; thermal conductivity degradation; thermal conductivity coefficient; building envelope.

References

1. DiXi Group. *A roadmap for the energy-efficient reconstruction of Ukraine*. <https://dixigroup.org/analytic/pokrokovyj-plan-energoefektyvnoyi-vidbudovy-v-ukrayini/> (Accessed: 28.02.2026) (Ukr.)
2. LONG-TERM STRATEGY FOR THE THERMAL RETROFIT OF BUILDINGS for the period up to 2050. Ministry for Development of Communities and Territories of Ukraine. No. 1314/39/63-23, dated December 23, 2023. https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/66bb575f1e1d2.pdf (date of inquiry 05.03.2026)
3. DSTU EN ISO 6946:2022 Building components. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (EN ISO 6946:2017, IDT; ISO 6946:2017, IDT). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Чинний з 31.12.2023
4. Schumacher, Daniel & Guevara-Carrion, Gabriela & Kasper, Tina & Paul, Andreas & Elsner, Andreas & Peters, Bettina & Wollny, Wenke & Bluemel, Marcus & Hoelscher, Heike & Brzoska-Steinhaus, Nicola & Heil, Klaus & Schleelein, Lukas & Becker, Wolfgang & Gries, Ulrich & Vrabec, Jadran. (2026). Aging of polyurethane foam: Experimental analysis and modeling of cell gas composition and thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129850>.
5. Basok, B., Goncharuk, S., Danishevskiy, A., & Goman, Y. (2025). THERMAL PHYSICAL CHARACTERISTICS DYNAMICS IN THERMAL INSULATION MATERIALS OF BUILDINGS FACADE. *Energy Technologies & Resource Saving*, 84(3), 119-128. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2025.09>
6. Kim, J.-H.; Kim, S.-M.; Kim, J.-T. Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard. *Energies* 2024, 17, 6105. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236105>
7. Berardi, Umberto. (2019). The impact of aging and environmental conditions on the effective thermal conductivity of several foam materials. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.022> .
8. BS EN 13165:2012. Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Rigid Polyurethane Foam (PU) Products - Specification. BSI Standard Publication: London, UK, 2016.
9. BS EN 13166:2012. Thermal Insulation Products for Building - Factory Made Phenolic Foam (PF) Products - Specification. BSI Standard Publication: London, UK, 2016.
10. Basok, B., Danishevskiy, A., DYNAMICS OF THERMAL CONDUCTIVITY IN POLYURETHANE INSULATION OF THE BUILDING ENCLOSING STRUCTURE. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*. 2025. 80(2), pp.30-34. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327137>

Надійшла: 23.02.2026
Received: 23.02.2026

Прийнята: 24.03.2026
Accepted: 24.03.2026