

Данішевський А. С., аспірант, ORCID 0000-0002-6166-0999,
наук. керівник: д-р техн. наук, член-кор. НАН України, професор Б. І. Басок,
ORCID 0000-0002-8935-4248,
«Інститут технічної теплофізики НАН України»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ VIP РУЙНІВНИМ МЕТОДОМ

EXPERIMENTAL STUDY OF VIP THERMAL PERFORMANCE DEGRADATION USING A DESTRUCTIVE METHOD

Анотація. У роботі наведено результати експериментального дослідження впливу втрати вакууму на теплоізоляційні властивості вакуумних ізоляційних панелей із використанням руйнівного методу. Дослідження проведено у натурних умовах за тепловим потоком і температурою. Встановлено, що ефективна теплопровідність одинарної цілісної (нерозгерметизованої) вакуумної панелі становить $0,0094\text{--}0,0105\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а для панелей у складі системи «VIP – повітря – VIP» (сендвіч) до яких був застосований руйнівний метод – $0,030\text{--}0,035\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Товщина одинарної панелі 30 мм, сендвічу 80 мм. Розгерметизація спричиняє стрибкоподібну деградацію теплопровідності, фактично прирівнюючи вакуумну ізоляційну панель до традиційних теплоізолюючих матеріалів. Отримані результати мають практичне значення для задач енергоаудиту, нормативного теплотехнічного розрахунку та проектування огорожувальних конструкцій будівель, оскільки обґрунтовують необхідність урахування втрати вакууму як фактору деградації теплофізичних характеристик вакуумних ізоляційних панелей. Встановлені закономірності можуть бути використані для уточнення та розвитку розрахункових моделей теплообміну в теплотехнічній та будівельній фізиці. Бібл. 5, рис. 1.

Ключові слова: вакуумна ізоляційна панель, коефіцієнт теплопровідності, огорожувальна конструкція, ефективна теплопровідність, енергоефективність.

Abstract. Results of an experimental study on the effect of vacuum loss on the thermal insulation properties of vacuum insulation panels, conducted using a destructive testing method, are presented in this paper. The study was conducted under field conditions with respect to heat flux and temperature. It was found that the effective thermal conductivity of a single-layer (undamaged) vacuum panel is $0.0094\text{--}0.0105\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, and for panels in a “VIP – air – VIP” (sandwich) system subjected to the destructive method – $0.030\text{--}0.035\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. The thickness of a single panel is 30 mm, and that of the sandwich panel is 80 mm. Depressurization causes a sudden degradation in thermal conductivity, effectively equating the vacuum insulation panel to traditional thermal insulation materials. The obtained results are of practical significance for energy audits, standard thermal engineering calculations, and the design of building envelopes, as they justify the need to account for vacuum loss as a factor in the degradation of the thermophysical characteristics of vacuum insulation panels. The established patterns can be used to refine and develop computational models of heat transfer in thermal engineering and building physics. Ref. 5, Fig. 1.

Keywords: vacuum insulation panel, thermal conductivity coefficient, building envelope, effective thermal conductivity, energy efficiency.

Вступ. Підвищення енергоефективності будівельного фонду є одним із ключових завдань сучасної технічної теплофізики та будівельної енергетики. У цьому контексті особливого значення набуває застосування високоефективних

теплоізоляційних матеріалів, зокрема вакуумних ізоляційних панелей (VIP), які завдяки наднизькій теплопровідності (0,003–0,008 Вт/(м·К)) дозволяють суттєво зменшити товщину огорожувальних конструкцій при збереженні нормативного опору теплопередачі [1].

Разом із тим, ефективність VIP критично залежить від герметичності бар'єрної оболонки та стабільності вакууму протягом експлуатації. Порушення герметичності внаслідок механічних пошкоджень або дифузії газів призводить до проникнення повітря в пористе середовище, що супроводжується різким зростанням ефективної теплопровідності та фактичною втратою теплоізоляційних переваг порівняно з традиційними матеріалами [2, 3].

Незважаючи на наявні дослідження довготривалої деградації VIP, питання їх поведінки при різкій втраті вакууму в реальних умовах експлуатації залишаються недостатньо вивченими. У зв'язку з цим актуальним є експериментальне дослідження деградації теплоізоляційної ефективності VIP із застосуванням руйнівного методу, що дозволяє кількісно оцінити зміну теплопровідності та уточнити підходи до теплотехнічного розрахунку огорожувальних конструкцій.

Методика експерименту та обробка даних. Експериментальні дослідження виконано в натурних умовах із використанням одного VIP та сендвіч-системи «VIP – повітря – VIP». Розміри одиночної панелі становили 600×400×30 мм, товщина сендвічу – приблизно 80 мм. Вимірювання теплового потоку та температурного напору проводились у нічний період, щоб мінімізувати вплив сонячної радіації, з дискретністю 10 хв. Для обробки вимірів застосовано медіанну фільтрацію, що дозволило знизити шум та виділити квазістаціонарні режими. Ефективну теплопровідність розраховано за формулою

$$\lambda_{eff} = \frac{q \cdot \delta}{\Delta t}, \quad (1)$$

де q – густина теплового потоку, δ – товщина конструкції, Δt – температурний напір. Термічний опір визначався як

$$R = \delta / \lambda_{eff}. \quad (2)$$

Результати. Експериментально-розрахунковим шляхом отримано ефективний коефіцієнт теплопровідності одиночної VIP λ_{eff} у межах 0,0094 – 0,0105 Вт/(м·К). Відповідно термічний опір R становить близько 3 м² К/Вт. Для розвакуумованих VIP у складі сендвіч-конструкції «VIP – повітря – VIP» λ_{dest} становить 0,030–0,035 Вт/(м·К), що відповідає традиційним ізоляційним матеріалам; термічний опір системи сягає лише 1,7 м² К/Вт. Така різниця обумовлена пошкодженою оболонкою VIP руйнівним шляхом та наявністю повітряного прошарку, який ініціює конвективні процеси.

Згідно з рис. 1, перехід від інтактного до розгерметизованого стану супроводжується кратним зростанням ефективної теплопровідності, що свідчить про стрибкоподібний характер деградації теплоізоляційних властивостей VIP.

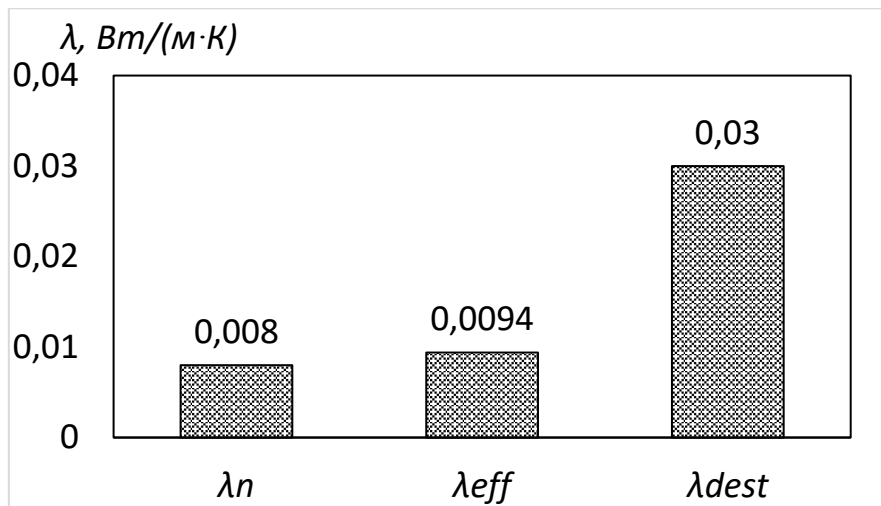


Рисунок 1. Порівняння коефіцієнта теплопровідності VIP у номінальному, інтактному та розгерметизованому станах (λ_n – номінальне значення коефіцієнта теплопровідності VIP)

Висновок. Ефективна теплопровідність вакуумної ізоляційної панелі в інтактному стані становить 0,0094 Вт/(м·К), що перевищує номінальне значення ($\approx 0,008$ Вт/(м·К)) на 17,5 %, що може бути обумовлено реальними умовами експлуатації та недосконалістю вакууму. Для панелей які піддались руйнівному методу у складі сендвіч-системи «VIP – повітря – VIP» встановлено зростання значення ефективної теплопровідності до 0,030 – 0,035 Вт/(м·К), що відповідає рівню традиційних теплоізоляційних матеріалів. Показано, що втрата вакууму супроводжується стрибкоподібною деградацією теплоізоляційних властивостей VIP, що підтверджує критичну роль герметичності оболонки у забезпеченні їх ефективності. Така поведінка свідчить про необхідність розглядати VIP не як матеріал із постійними характеристиками, а як систему з *потенційними сценаріями відмови*.

Встановлено, що наявність повітряного прошарку в багатошаровій системі не забезпечує підвищення теплоізоляційних характеристик, а призводить до додаткових теплових втрат, зумовлених розвитком конвективного теплообміну. Отримані результати мають прикладне значення для задач енергоаудиту та проектування огорожувальних конструкцій, оскільки обґрунтовують необхідність урахування можливих сценаріїв деградації VIP при оцінці їх довготривалої ефективності.

Список використаних джерел

1. Офіційний сайт виробника Zibo Jucos Co.,Ltd.
URL: <https://www.jucosrefractory.com/insulation-thermal-material/vacuum-insulation-panel.html> (дата звернення 13.04.2026)
2. Wang J., Wang Z., Chen D., Pei Z., Shen J., Zhou N. Degradation mechanisms in metallized barrier films for vacuum insulation panels subjected to flanging-induced stress. *Nanomaterials*, 2025, 15(16): 1231. DOI:10.3390/nano15161231.
3. Baetens, Ruben & Jelle, Bjørn & Thue, Jan & Tenpierik, Martin & Grynning, Steinar & Uvsløkk, Sivert & Gustavsens, Arild. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*. 42. P. 147–172.
URL: 10.1016/j.enbuild.2009.09.005.

References

1. Official manufacturer website Zibo Jucos Co.,Ltd.
URL: <https://www.jucosrefractory.com/insulation-thermal-material/vacuum-insulation-panel.html> (дата звернення 13.04.2026)
2. Wang J., Wang Z., Chen D., Pei Z., Shen J., Zhou N. Degradation mechanisms in metallized barrier films for vacuum insulation panels subjected to flanging-induced stress. *Nanomaterials*, 2025, 15(16): 1231. DOI:10.3390/nano15161231.
3. Baetens, Ruben & Jelle, Bjørn & Thue, Jan & Tenpierik, Martin & Grynning, Steinar & Uvsløkk, Sivert & Gustavsen, Arild. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*. 42. P. 147–172.
URL: 10.1016/j.enbuild.2009.09.005.

УДК 631.311

Лугін Д. М., магістрант, ORCID 0009-0009-8814-5944,
наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Т. Л. Кацадзе,
ORCID 0000-0002-8365-0046

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ ЗА НАПРУГОЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ІЄРАРХІЧНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІТИЧНИХ ІНДЕКСІВ

EVALUATION OF THE STATIC STABILITY OF POWER SYSTEMS BASED ON VOLTAGE USING A HIERARCHICAL SYSTEM OF ANALYTICAL INDICES

Анотація. У статті розглянуто проблему оперативного моніторингу стійкості енергосистем за напругою в умовах наближення до точок біфуркації. Обґрунтовано доцільність використання аналітичних індексів стійкості (VSIs) як ефективного інструменту для швидкого оцінювання стану мережі в реальному часі, що є критично важливим для диспетчерського керування. Основним результатом роботи є розробка та програмна реалізація ієрархічного підходу до оцінювання стабільності на основі трьох рівнів аналізу: локального (лінійний індекс L_{mn}), вузлового (вузловий індекс $VCPI$) та загальносистемного (мережевий індекс L). Такий підхід дозволяє не лише констатувати факт наближення до межі колапсу напруги, а й точно ідентифікувати критичні лінії та слабкі вузли системи. Практична реалізація алгоритму виконана мовою Python із використанням вбудованого API програмного комплексу DIgSILENT PowerFactory. Апробація розробленого скрипта проведена на 24-вузловій тестовій схемі IEEE (RTS-24), що підтвердило високу швидкість обчислень та надійність отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути впроваджені в сучасні системи підтримки прийняття рішень для оперативного персоналу енергосистем. Бібл. 10, рис. 2., табл. 1.

Ключові слова. стійкість за напругою, колапс напруги, індекси стійкості, DIgSILENT PowerFactory, моніторинг у реальному часі.

Abstract. This article examines the problem of real-time monitoring of the stability of power systems based on voltage as they approach bifurcation points. The feasibility of using analytical stability indices (VSIs) as an effective tool for rapid real-time assessment of the grid's state,