

УДК 691.175

М. В. Русецька*

аспірантка, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7168-7552>

Кафедра будівництва

Київський національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

Є. А. Бакулін

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5384>

Кафедра будівництва

Київський національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

*автор-кореспондент, e-mail: m.rusetska@nubip.edu.ua

Експериментально-моделююче дослідження процесів вологоперенесення у сендвіч-панелях із базальтовим утеплювачем у помірному кліматі України

Цитувати як:

Русецька М. В., Бакулін Є. А. (2025). Експериментально-моделююче дослідження процесів вологоперенесення у сендвіч-панелях із базальтовим утеплювачем у помірному кліматі України. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 375-383. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-32)

© 2025, Русецька М. В., Бакулін Є. А.

Забезпечення довговічності та енергоефективності огорожувальних конструкцій є одним із головних завдань сучасного будівництва. Сучасні вимоги до енергоефективності будівель зумовлюють необхідність застосування теплоізоляційних матеріалів із стабільними характеристиками протягом усього періоду експлуатації [1,2]. Одним із найпоширеніших матеріалів для зовнішніх огорожувальних конструкцій є мінеральна вата на основі базальтових волокон, яка поєднує низьку теплопровідність, негорючість та екологічну безпечність [3,4]. Одним із факторів, що впливає на втрату теплоізоляційних властивостей, є накопичення вологи та конденсатоутворення у товщі панелі. Базальтовий утеплювач, маючи високий рівень паропроникності, може ефективно працювати лише за умови можливості видалення вологи [5,6].

Проте численні дослідження показують, що під впливом вологи та температурних коливань відбувається суттєва зміна теплотехнічних і механічних властивостей волокнистих утеплювачів. У процесі експлуатації матеріали накопичують вологу внаслідок конденсації та утворення інею, що знижує їхню ефективність, викликає деформації та прискорює деградацію структури. Тому актуальним є пошук раціональної конструкції панелей, яка б забезпечувала ефективне видалення вологи без зниження теплоізоляційних характеристик.

У роботі досліджено вплив конструктивних особливостей сендвіч-панелей із базальтовим утеплювачем на інтенсивність вологоперенесення та процеси висихання за умов помірного клімату України. Моделювання проведено для трьох

типів панелей із різною будовою внутрішніх шарів: без вентиляційного шару, з мікровентиляційними каналами та з дренажним шаром. За допомогою числового експерименту отримано залежності вологовмісту від часу, виконано порівняльний аналіз та розрахунок інтегрального показника (AUC). Встановлено, що наявність вентиляційних і дренажних елементів суттєво прискорює процес видалення вологи, підвищуючи експлуатаційну довговічність панелей.

Ключові слова: сендвіч-панель, базальтовий утеплювач, вологоперенесення, конденсат, моделювання, теплозахист.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Як показує будівельна практика, температура, відносна вологість та процеси утворення інею істотно впливають на теплотехнічні та механічні властивості ізоляційних матеріалів, що застосовуються у дахових системах, фасадах і фундаментах [7]. Накопичення вологи у волокнистих структурах призводить до зростання теплопровідності, втрати пружності та поступової деградації матеріалу, що, у свою чергу, знижує довговічність огороджувальних елементів будівлі.

Дослідження Vrána та Björk [7] показали, що в ізоляційних матеріалах з меншою щільністю відбувається підвищення вологості у 2,5–3 рази порівняно з очікуваними значеннями. Це підтверджує важливу роль щільності та мікроструктури матеріалу у формуванні його вологостійкості. У подальших дослідженнях Vrána і Gudmundsson [8] було проведено порівняння целюлозних і кам'яноволоконних утеплювачів у контексті процесів конденсації та утворення інею. Автори виявили, що зміни проникності водяної пари у різних типах волокнистих матеріалів є незначними, однак загальна тенденція до накопичення вологи при зміні температури залишається вираженою.

Особливу увагу приділено теплотехнічній стабільності мінераловатних матеріалів. За результатами експериментів Jerman та ін. [9], теплопровідність мінеральної вати різко зростає із підвищенням вологості — від 0,041 Вт/(м·К) у сухому стані до 0,900 Вт/(м·К) при насиченні водою. Це свідчить, що навіть незначне зволоження може істотно погіршити енергоефективність конструкції.

Не менш важливим є вплив вологи на механічну міцність утеплювачів. Ivanič та співавт. [10] встановили, що у зразках мінеральної вати з базальтових волокон, вилучених із зволжених ділянок покрівель, міцність на стиск знижувалась на 93 % порівняно з номінальним значенням. Підвищена вологість та температурні коливання, які влітку можуть сягати 70 °С на поверхні даху, сприяють руйнуванню міжволоконних зв'язків і прискоренню деградаційних процесів у структурі матеріалу.

Узагальнюючи результати попередніх досліджень, можна зазначити, що вплив вологості на теплові та механічні характеристики

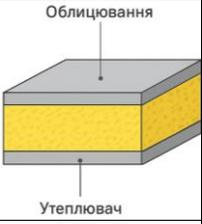
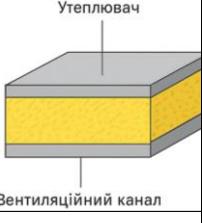
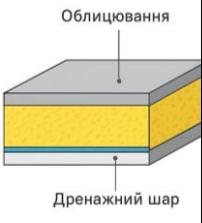
мінераловатних утеплювачів, особливо виготовлених на основі базальтових волокон, має комплексний характер.

Мета і завдання дослідження. Метою даного етапу дослідження є вивчення особливостей процесів накопичення та видалення вологи в тришарових сендвіч-панелях із базальтовим утеплювачем при впливі змінних кліматичних умов, характерних для помірного клімату України.

Матеріали та методи

У цьому дослідженні розглянуто три конструктивні варіанти сендвіч-панелей із базальтовим утеплювачем.

Таблиця 1. Зразки сендвіч-панелей

Позначення зразка	Конструктивна схема панелі	Характеристика	Конструктивні розрізи
Зразок 1	Стандартна панель без вентиляційного шару	Базовий тип, що використовується у більшості стінових систем	
Зразок 2	Панель з мікровентиляційними каналами	Модифікована конструкція, що дозволяє циркуляцію повітря вздовж утеплювача	
Зразок 3	Панель із дренажним шаром і паропроникним внутрішнім облицюванням	Рациональна конструкція, що забезпечує виведення вологи через дренаж і паропроникність внутрішнього шару	

Облицювальні шари — тонколистовий оцинкований метал товщиною 0,6 мм; утеплювач — базальтова мінеральна вата щільністю 100 кг/м³; загальна товщина панелі — 100 мм (Таблиця 1).

Для оцінки впливу конструктивних рішень на процеси вологоперенесення в тришарових сендвіч-панелях із базальтовим утеплювачем було проведено числове (моделююче) експериментальне дослідження. Моделювання виконано з використанням чисельного

експерименту протягом 24-годинного добового циклу, який репрезентує умови помірного клімату України (зовнішня температура від -10 до $+25$ °C, відносна вологість 40–95 %). Експериментальне моделювання виконано у Python середовищі із врахуванням рівнянь Фур'є та Фіка для теплового й вологісного перенесення, сформовано модель, яка дозволяє розраховувати зміну середнього вологовмісту утеплювача $W(t)$ (% від маси сухої речовини) у часі. Всі результати оброблено статистично (метод ANOVA, $\alpha = 0,05$).

Результати та обговорення

Результати симуляцій свідчать про важливий вплив конструктивних рішень на процес вологоперенесення. Початкові та кінцеві значення вологовмісту, а також інші показники наведено в Таблиці 2. Так, у панелі типу 1 W_{final} становив 2,8 %, у типу 2 — 2,1 %, у типу 3 — 1,7 %. Інтегральний показник AUC зменшувався від 52,4 %·год (тип 1) до 28,5 %·год (тип 3), що вказує на майже 45 % покращення при оптимізованій конструкції.

Таблиця 2. Основні результати моделювання процесу вологоперенесення

Параметр	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Початковий вологовміст W_0 , %	4,2	4,3	4,1
Кінцевий вологовміст W_{final} , %	2,8	2,1	1,7
Час напіввисихання t_{50} , год	8,5	6,2	4,7
Час повного видалення вологи T_{0W} , год	19,3	15,1	11,8
Інтегральний показник (AUC)	52,4	39,7	28,5

Аналіз ANOVA дав $F=11,50$, $p=0,0089$, що підтверджує статистично значущу різницю між групами. Подальші парні тести показали, що тип 3 суттєво кращий від типу 1 ($p<0,05$).

Для панелей із замкненим контуром (Зразок 1) накопичення вологи відбувається у внутрішніх шарах, процес видалення вологи є уповільненим через відсутність паропроникності та повітрообміну. Панель із мікрорентильційними каналами (Зразок 2) створює умови для часткового повітрообміну, що прискорює видалення вологи приблизно на 20–25 % порівняно зі стандартною. Панель з дренажним шаром (Зразок 3) дозволяє створити керований шлях виведення конденсату та зменшити час повного висихання на понад 35%, тому має найменший залишковий вологовміст та найшвидше видалення вологи.

Найефективніше видалення вологи відбувається у панелях із дренажним шаром і паропроникним внутрішнім облицюванням, де час повного висихання зменшується на 35–40 % (Рис. 1).

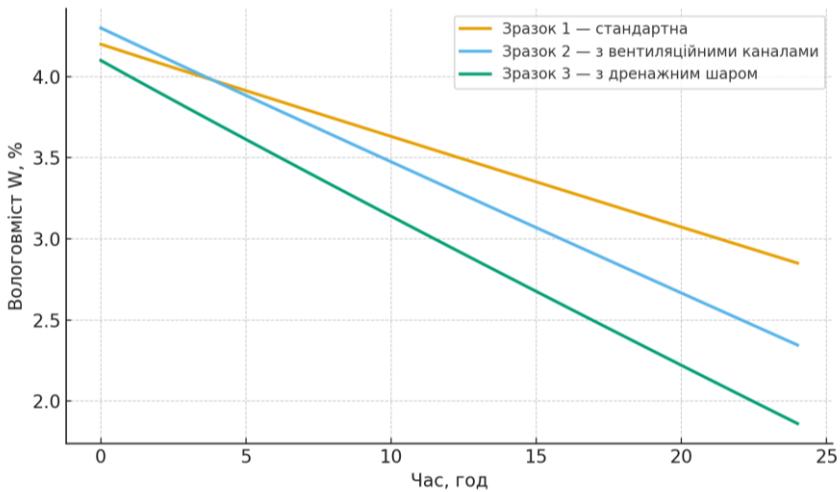


Рис.1. Динаміка зміни вологовмісту у трьох типах панелей

На основі отриманих даних встановлено, що інтегральний показник AUC зменшується у 1,8 раза для оптимізованої конструкції порівняно з базовою (Рис.2).

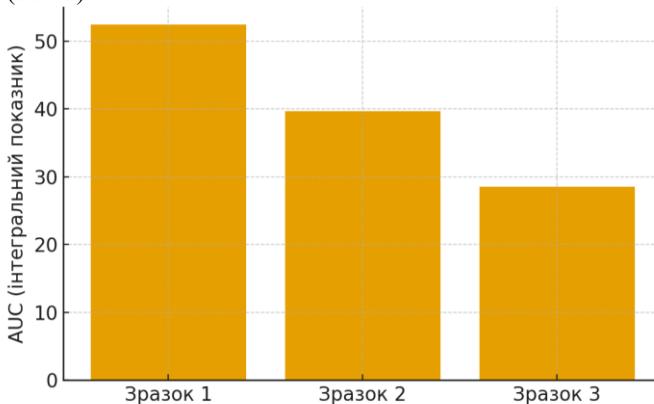


Рис.2. Порівняння інтегрального показника вологоперенесення (AUC)

Таким чином, дренажна конструкція є найбільш раціональним рішенням серед досліджених варіантів.

Отримані дані узгоджуються з результатами літератури. Наприклад, К. Kalbe та співавт. (2020) досліджували панелі зі сталевими обшивками і мінеральною ватою і виявили, що здатність до висихання обмежена, а застосування паропроникної стрічки може зменшувати «Time of Wetness» з

~5500 год/рік до ~2000 год/рік [11].

Так само дослідження Т. Vgána (2007) показали, що підвищена вологість суттєво погіршує довгострокові характеристики панелей із мінеральною ватою [12].

У нашій моделі прискорене видалення вологи у типі 3 пояснюється двома механізмами: наявністю дренажного шару, що забезпечує шлях для рідкої фази, та внутрішньою паропроникною облицюванням, що зменшує опір дифузії пари. Це знижує накопичення вологи, скорочує ToW і зменшує ризик корозії та зниження теплоізоляційної ефективності.

Однак слід зазначити обмеження: модель одновимірна, не враховує вплив країв і стиків панелей, реальні параметри коефіцієнта дифузії могли варіюватися (а не були вимірянні), а симуляція охоплює лише добовий цикл. В реальних умовах накопичення вологи може відбуватися протягом тривалого часу. У майбутньому доцільно провести лабораторні випробування для валідації моделі.

Висновки

Розроблена методика моделюючого експерименту дозволила кількісно оцінити динаміку вологоперенесення у сендвіч-панелях з базальтовим утеплювачем. Процес вологоперенесення в базальтовому утеплювачі підпорядковується закономірностям дифузійного перенесення, але значно залежить від умов конденсації утворення на межах шарів. Результати підтверджують доцільність використання комбінованих схем повітряно-дренажного відведення вологи при проектуванні сучасних сендвіч-панелей для умов помірного клімату України.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Yakovenko, I. A., & Bakulin, Y. A. (2023). Directions of scientific research at the Department of Construction of NULES of Ukraine. In *Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference "Kramarov Readings" dedicated to the 116th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of VASKhNIL, Vice President of UASN V. S. Kramarov (1906–1987) and the 125th anniversary of NULES of Ukraine* (Kyiv, February 24–25, 2023, pp. 488–491). Kyiv: NULES of Ukraine.
2. Rusetska, M. V., & Bakulin, Y. A. (2024). Basalt insulation: A natural "green material" for modern constructions. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, (22), 5–15. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-01)
3. Bakulin, Y. A., & Rusetska, M. V. (2024). Innovation, efficiency, and sustainability of sandwich wall panels with basalt insulation. In *Proceedings of the 23rd International Conference of Scientific and Pedagogical Staff, Researchers, and Postgraduates "Problems and Prospects for the Development of Technical and Bioenergy Systems of Nature Management, Design and Engineering"* (Kyiv, April 11–12, 2024, pp. 78–80). Kyiv: NULES of Ukraine.
4. Bakulin, Y. A. (2013). Deformations as indicators of hazards and risks of damage in operated buildings. *Construction of Ukraine*, (5), 2–5.
5. Bakulin Y.A. Engineering protection and preparation of territories : study guide; under the editorship of cand tech. science Ye.A. Bakulin / Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina. – Kyiv : NULES of Ukraine, 2022. – 205 p.
6. Yakovenko I., Bakulin Y. & Bakulina V. (2020) Classification methods of civil buildings reconstruction // Theoretical and scientific foundations of engineering : collective monograph / Apostolova R., Shembel E., Aurbach D., Markovsky B., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2020. 180 p., pp. 70–96. <https://doi.org/10.46299/isg.2020.MONO.TECH.II>
7. Vrána, T., & Björk, F. (2009). Frost formation and condensation in stone-wool insulations. *Construction and Building Materials*, 23, 1775–1787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.027>
8. Vrána, T., & Gudmundsson, K. (2010). Comparison of fibrous insulations – Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation. *Construction and Building Materials*, 24, 1151–1157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.020>
9. Jerman, M., & Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, 53, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.004>
10. Ivanič, A., Kravanja, G., Kidess, W., Rudolf, R., & Lubej, S. (2020). The influences of moisture on the mechanical, morphological and thermogravimetric properties of mineral wool made from basalt glass fibers. *Materials*, 13, 2392. <https://doi.org/10.3390/ma13102392>
11. Kalbe, K.; Piikov, H.; Kalamees, T. Moisture Dry-Out Capability of Steel-Faced Mineral Wool Insulated Sandwich Panels. *Sustainability* 2020, 12, 9020. <https://doi.org/10.3390/su12219020>
12. Vrána T. Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool : дис. ... д-ра філос. (PhD) / Technical University in Brno. Brno, 2007.

Література

1. Яковенко І.А. Напрями наукових досліджень кафедри будівництва НУБіП України / І.А. Яковенко, Є.А. Бакулін // 36. тез доп. X Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження д.т.н., проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ, віцепрез. УАСГН В.С. Крамарова (1906–1987) та 125 річниці НУБіП України (24–25 лютого 2023 р., м. Київ). – К. : НУБіП України, 2023. – С. 488–491.
2. Русецька М.В. Базальтовий утеплювач – природний «зелений матеріал» для сучасних конструкцій / М.В. Русецька, Є.А. Бакулін // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2024. – № 22. – С. 5–15. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-01)
3. Бакулін Є.А. Інноваційність, ефективність, сталість стінових сендвіч-панелей з базальтовим утеплювачем / Є.А. Бакулін, М.В. Русецька // 36. тез доп. XXIII Міжн. конф. наук.-педаг. працівників, наук. співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування конструювання та дизайн» (11–12 квітня 2024 р.), – К. : НУБіП України, 2024.– С. 78–80.
4. Бакулін Є.А. Деформації як індикатори небезпек та ризику руйнування експлуатованих будівель / Є.А. Бакулін // Будівництво України. –2013. – №5. – С. 2–5.
5. Bakulin, Y. A., Yakovenko, I. A., & Bakulina, V. M. (2022). *Engineering protection and preparation of territories: Study guide* (Ye. A. Bakulin, Ed.). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 205 p.
6. Yakovenko, I., Bakulin, Y., & Bakulina, V. (2020). Classification methods of civil buildings reconstruction. In R. Apostolova, E. Shembel, D. Aurbach, B. Markovsky et al. (Eds.), *Theoretical and scientific foundations of engineering: Collective monograph* (pp. 70–96). Boston: Primedia eLaunch. <https://doi.org/10.46299/iscg.2020.MONO.TECH.II>
7. Vrána, T., & Björk, F. (2009). Frost formation and condensation in stone–wool insulations. *Construction and Building Materials*, 23, 1775–1787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.027>
8. Vrána, T., & Gudmundsson, K. (2010). Comparison of fibrous insulations – Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation. *Construction and Building Materials*, 24, 1151–1157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.020>
9. Jerman, M., & Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, 53, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.004>
10. Ivanič, A., Kravanja, G., Kidess, W., Rudolf, R., & Lubej, S. (2020). The influences of moisture on the mechanical, morphological and thermogravimetric properties of mineral wool made from basalt glass fibers. *Materials*, 13, 2392. <https://doi.org/10.3390/ma13102392>
11. Kalbe, K.; Piikov, H.; Kalamees, T. Moisture Dry-Out Capability of Steel-Faced Mineral Wool Insulated Sandwich Panels. *Sustainability* 2020, 12, 9020. <https://doi.org/10.3390/su12219020>
12. Vrána T. Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool : дис. ... д-ра філос. (PhD) / Technical University in Brno. Brno, 2007.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.11.2025	Received 14.11.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 14.11.2025	Received in revised form 14.11.2025
Прийнято 20.11.2025	Accepted 20.11.2025
Опубліковано 25.12.2025	Published 25.12.2025

M. V. Rusetska*

PhD Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7168-7552>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

Ye. A. Bakulin

PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5384>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

*corresponding author, e-mail: m.rusetska@nubip.edu.ua

Experimental and modeling study of moisture transfer processes in sandwich panels with basalt insulation under moderate climate conditions of Ukraine

How to Cite:

Rusetska, M. V., & Bakulin, Ye. A. (2025). Experimental and Modeling Study of Moisture Transfer Processes in Sandwich Panels with Basalt Insulation under Moderate Climate Conditions of Ukraine. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 24, 375-383. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-32)

Abstract. Ensuring the durability and energy efficiency of building envelope structures is one of the key tasks of modern construction. Current requirements for the energy performance of buildings necessitate the use of thermal insulation materials with stable characteristics throughout their service life [1,2]. One of the most common materials used for external envelope structures is mineral wool based on basalt fibers, which combines low thermal conductivity, non-combustibility, and environmental safety [3,4]. One of the factors influencing the loss of thermal insulation properties is the accumulation of moisture and condensation within the panel thickness. Basalt insulation, having a high level of vapor permeability, can perform effectively only when adequate moisture removal is ensured [5,6].

However, numerous studies indicate that under the influence of moisture and temperature fluctuations, significant changes occur in the thermal and mechanical properties of fibrous insulations. During operation, these materials accumulate moisture due to condensation and frost formation, which reduces their efficiency, causes deformations, and accelerates structural degradation. Therefore, the search for a rational panel design that ensures effective moisture removal without reducing thermal insulation performance remains an urgent task.

This paper investigates the influence of the structural features of sandwich panels with basalt insulation on the intensity of moisture transfer and drying processes under the conditions of Ukraine's temperate climate. Modeling was performed for three types of panels with different internal layer configurations: without a ventilation layer, with micro-ventilation channels, and with a drainage layer. Using numerical simulation, the dependence of moisture content on time was obtained, followed by a comparative analysis and calculation of the integral indicator (AUC). It was established that the presence of ventilation and drainage elements significantly accelerates the process of moisture removal, thereby increasing the operational durability of the panels.

Keywords: sandwich panel, basalt insulation, moisture transfer, condensation, modeling, thermal protection.