УДК 691.32:666.9:620.9

Ю. В. Волошина
К. В. Мащук
Ю. С. Бікс

КОНОПЛЯНИЙ БЕТОН ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто конопляний бетон (hempcrete, hemp-lime) як біокомпозитний матеріал на основі костриці технічних конопель та вапняного в'яжучого, призначений для застосування в енергоефективних огороджувальних конструкціях. Систематизовано дані щодо складу, технології виготовлення та ключових експлуатаційних характеристик матеріалу. Наведено порівняльну таблицю властивостей конопляного бетону та традиційних стінових матеріалів (керамічної цегли, газобетону, мінеральної вати). Проаналізовано практичні аспекти застосування конопляного бетону в огороджувальних конструкціях: формування одношарових стін без додаткового утеплення, забезпечення теплової інерції, регулювання вологості внутрішнього повітря. Наведено результати теплових розрахунків, які підтверджують необхідність товщини стін 400 мм і більше для досягнення нормативних значень опору теплопередачі в кліматичних умовах України. Визначено бар'єри впровадження (відсутність нормативної бази, нерозвиненість сировинної бази) та перспективні напрями подальших досліджень.

Ключові слова: конопляний бетон, костробетон, костриця конопель, вапняне в'яжуче, енергоефективність, огороджувальні конструкції, теплопровідність, опір теплопередачі, стале будівництво.

Abstract

Hemp concrete (hempcrete, hemp-lime) is considered as a bio-composite material based on hemp shiv and lime binder, intended for use in energy-efficient building envelope constructions. This paper systematises data on the material's composition, manufacturing technology, and key operational characteristics. The paper presents a comparative table of hemp concrete properties versus traditional wall materials (ceramic brick, aerated concrete, mineral wool). The study analyses practical aspects of hemp concrete application in envelope constructions: forming single-layer walls without additional insulation, providing thermal inertia, and regulating indoor humidity. The thermal calculations confirm the need for a wall thickness of 400 mm or more to achieve normative heat transfer resistance values under Ukrainian climatic conditions. The paper identifies barriers to implementation (lack of a regulatory framework, underdeveloped raw material base) and promising directions for further research.

Keywords: hemp concrete, hemp shiv, lime binder, energy efficiency, building envelope, thermal conductivity, heat transfer resistance, sustainable construction.

Вступ

Скорочення енергоспоживання в будівельному секторі є одним із пріоритетних завдань сучасної інженерії. На будівлі припадає понад 40 % первинного енергоспоживання в США та країнах ЄС [1], тому нові будівлі необхідно проєктувати з низьким споживанням енергії, зокрема за рахунок підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій [2]. Звідси зростає інтерес до біопозитивних матеріалів, які можуть одночасно знижувати енергоспоживання будівлі та зменшувати її вуглецевий слід.

Конопляний бетон, також відомий як хемпкріт (hempcrete) або костробетон, - це біокомпозит на основі костриці технічних конопель і вапняного в'яжучого [3]. Матеріал активно досліджується, зокрема у Франції та Великій Британії [4-7], завдяки поєднанню теплоізоляційних, гігроскопічних і екологічних властивостей.

Актуальність теми для України зумовлена потребою у матеріалах, які одночасно забезпечують високий опір теплопередачі, регулювання вологості, довговічність та мінімальний екологічний вплив, особливо в контексті післявоєнної відбудови. На відміну від мінеральної вати чи пінополістиролу, які

лише утеплюють, конопляний бетон у поєднанні з каркасом дає змогу формувати монолітні стіни без шаруватості, що зменшує кількість стиків між шарами та ризик теплових мостів.

Метою цієї роботи є систематизація та узагальнення наукових даних щодо конопляного бетону як перспективного матеріалу для енергоефективних огороджувальних конструкцій. Для досягнення мети поставлено такі завдання: охарактеризувати склад і технологію виготовлення; проаналізувати теплофізичні, механічні та гігроскопічні властивості; навести порівняльну таблицю з традиційними матеріалами; проаналізувати практичне застосування в огороджувальних конструкціях; визначити бар'єри та перспективи впровадження.

Результати досліджень

Конопляний бетон за своєю природою є композитним матеріалом, що складається з трьох основних компонентів: костриці технічних конопель, вапняного в'яжучого та води. Костриця виступає легким пористим заповнювачем, тоді як вапняне в'яжуче - гідратоване, природне гідравлічне або їх комбінації з пуцолановими добавками - забезпечує зв'язування та поступову карбонізацію матеріалу [3]. На відміну від традиційного бетонування, суміш укладається методом набризкування в опалубку (форму) [8] або ручного трамбування, а надмірне ущільнення призводить до зростання щільності, а отже й теплопровідності [7], внаслідок зменшення об'єму повітряних порожнин. Саме ця пориста структура, сформована кострицею та вапном, визначає подальші унікальні властивості матеріалу.



Рис. 1 – Загальний вигляд блоків з костриці конопель (Взято з [9])

Першою і, мабуть, найважливішою характеристикою, що випливає з такої будови, є низька теплопровідність. За даними досліджень, коефіцієнт теплопровідності λ конопляного бетону становить 0,06-0,17 Вт/(м·К) залежно від щільності, складу суміші та вологості [7, 8, 10]. Для порівняння: теплопровідність керамічної цегли становить 0,56-1,5 Вт/(м·К), газобетону - 0,18-0,28 Вт/(м·К), а мінеральної вати - 0,048-0,07 Вт/(м·К) [10]. Таким чином, конопляний бетон поступається спеціалізованим утеплювачам, однак перевершує традиційні конструкційні матеріали, а головне - поєднує теплоізоляційну функцію з функцією огородження, чого не може жоден з наведених аналогів. Щільність матеріалу при цьому коливається в межах 200-500 кг/м³ [7, 8, 10], що дозволяє варіювати склади від суто ізоляційних до складів підвищеної щільності. Завдяки низькій щільності та високій пористості стіни з конопляного бетону мають значну теплоінерційність: питома теплоємність матеріалу становить 1500-1700 Дж/(кг·К) [8], що сприяє акумулюванню та вивільненню тепла під час змін температури [6].

Зворотний бік високої пористості - це низька міцність. Міцність на стиск конопляного бетону становить, за літературними даними, лише близько 0,1-0,3 МПа, тому матеріал не використовують як несучий [4]. Навантаження сприймає дерев'яний або металевий каркас, а конопляний бетон виконує функції утеплення та заповнення. Водночас дослідження показують, що механічні властивості можна покращити шляхом ущільнення свіжої суміші під час формування [4], проте разом із міцністю зростають щільність і теплопровідність [7]; використання природного гідравлічного вапна замість повітряного та додавання пуцоланових добавок сприяють підвищенню міцності та довговічності.

Наступна властивість, яка логічно випливає з пористої структури та хімії вапна, - це здатність активно регулювати вологість внутрішнього повітря. Завдяки високій відкритій пористості костриці та гігроскопічності вапна матеріал здатен поглинати надлишкову вологу з повітря за підвищення

відносної вологості та вивільняти її за зниження [3, 6]. Це створює ефект паропроникної («дихаючої») стіни, допомагає підтримувати комфортний мікроклімат (зазвичай 40-60% відносної вологості) і знижує ризик конденсації та розвитку плісняви [3, 6], хоча й не замінює вентиляції.

Усі ці експлуатаційні якості органічно доповнюються екологічними характеристиками, які виводять конопляний бетон на принципово інший рівень порівняно з традиційними матеріалами. Технічні коноплі поглинають CO_2 під час росту, а вапняне в'яжуче додатково зв'язує його при карбонізації [3, 5]. За оцінками, 1 м³ конопляного бетону може акумулювати 110-180 кг CO_2 [11]. Для 1 м² стіни завтовшки 300 мм із дерев'яним каркасом сумарне поглинання за 100 років життєвого циклу становить близько 82,7 кг CO_2, а чисте зниження викидів - 36,08 кг CO_2 [5]. За результатами LCA-дослідження [12], конопляно-вапняний матеріал також має нижчу вбудовану енергію порівняно з традиційними матеріалами (для умов посушливого клімату). Таким чином, конопляний бетон за показниками життєвого циклу порівнюється з традиційними матеріалами вигідно, а з точки зору циркулярної економіки - може виготовлятися з відходів сільськогосподарського виробництва (костриця є побічним продуктом переробки конопель на волокно).

Порівняння характеристик конопляного бетону з низкою інших будівельних матеріалів, призначених для огороджувальних конструкцій [7, 8, 10], наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика конопляного бетону та традиційних стінових матеріалів

Параметр	Конопляний бетон	Керамічна цегла	Газобетон	Мінеральна вата
Теплопровідність λ, Вт/(м·К)	0,06-0,17	0,56-1,5	0,18-0,28	0,048-0,07
Щільність, кг/м³	200-500	1550-1900	600-800	50-100
Міцність на стиск, МПа	0,1-0,3	10-30	2,87-10,38	-
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1500-1700	840	840	840-880
Регулювання вологості	Висока	Низька	Середня	Відсутня
Вуглецевий слід	Від'ємний	Високий	Високий	Середній
Теплові мости	Мінімізовані	Присутні	Присутні	Присутні

Як видно з таблиці, конопляний бетон не є абсолютним лідером за жодним окремим показником, однак за сукупністю властивостей він не має прямих аналогів серед традиційних матеріалів. Саме ця сукупність і визначає його перспективність для енергоефективних огороджувальних конструкцій, де важлива не окрема характеристика, а комплексний результат - теплоізоляція, теплоінерція, вологорегулювання та екологічність в одному матеріалі. Розглянемо, як цей потенціал реалізується на практиці.

Ключова перевага конопляного бетону як матеріалу для огороджувальних конструкцій полягає у можливості зведення монолітних стін без шаруватості, що зменшує ризик теплових мостів, типових для каркасних систем із мінеральною ватою чи пінополістиролом.

Практичний досвід в Україні підтверджує цей потенціал і водночас виявляє важливі обмеження. Результати теплового розрахунку реального одноквартирного житлового будинку в Чернігівській кліматичній зоні [14] показали, що технологія формування стін з конопляного бетону з однією стійкою товщиною 150-250 мм не відповідає українським нормативним вимогам. Термічний опір таких стін не перевищує 2,5-3,717 м²·К/Вт. Для забезпечення достатнього рівня теплової ефективності необхідна технологія внутрішнього каркаса з товщиною стін з конопляного бетону 400 мм і більше. Розрахунки показали, що термічний опір таких стін сягає 5,601 м²·К/Вт, що забезпечує високий рівень енергоефективності. Згідно з ДБН В.2.6-31:2021, мінімально допустиме значення опору теплопередачі для зовнішніх стінових огороджувальних конструкцій становить 4,00 м²·К/Вт для I температурної зони та 3,50 м²·К/Вт для II зони [13], тож стіни з конопляного бетону товщиною 400 мм забезпечують виконання нормативних вимог із суттєвим запасом.

Ефективність конопляного бетону як огороджувального матеріалу значною мірою зумовлена його підвищеною теплоінерційністю. Дослідження показують, що в умовах імітації переривчастого опалення панель, яка поєднує деревне волокно та конопляно-вапняну суміш, продемонструвала найвищу здатність до акумулювання та вивільнення тепла порівняно з панелями з мінеральної вати та деревного волокна [6]. Водночас важливо враховувати кліматичну залежність: у м'якому та холодному кліматі підвищена теплова маса може дещо збільшувати енергоспоживання на опалення, оскільки

матеріал повільніше нагрівається сонячною радіацією, але це компенсується зниженням потреби в охолодженні. Таким чином, конопляний бетон є особливо перспективним для регіонів із переважанням охолоджувальних навантажень або зі змішаним кліматом.

Окремий і дуже важливий напрям застосування - реконструкція та реставрація. Завдяки високій паропроникності та гігроскопічності конопляний бетон є сумісним із традиційними стіновими матеріалами, зокрема цеглою та вапняними штукатурками. Це робить його придатним для утеплення старих будівель методом набризкування або заливки, де використання паронепроникних утеплювачів (пінополістирол, мінеральна вата з пароізоляцією) може призводити до накопичення вологи та руйнування конструкцій.

Водночас слід враховувати обмеження. Ефективність конопляного бетону як огороджувального матеріалу суттєво залежить від вологісного режиму та щільності. За даними [7], у діапазоні від сухого стану до 90 % відносної вологості теплопровідність зростає приблизно на 15-25 %, тоді як збільшення щільності на дві третини підвищує її приблизно на 54 %, тому ігнорування цих залежностей під час розрахунків може призводити до заниження прогнозованих тепловтрат. Крім того, для нормативного опору теплопередачі в холодних зонах товщина стін може сягати 40-50 см, що потрібно закладати на етапі архітектурного проєктування.

Перспективні напрями вдосконалення застосування конопляного бетону в огороджувальних конструкціях: (1) армовані або попередньо напружені елементи з конопляного бетону підвищеної щільності для сприйняття навантажень зі збереженням теплоізоляційних властивостей; (2) поєднання з матеріалами зі зміною фазового стану (PCM) для підвищення теплоакумулюючої здатності; (3) 3D-друк стін із диференційованою щільністю: міцний зовнішній шар і низькощільний теплоізоляційний внутрішній.

Попри переваги, поширенню конопляного бетону в Україні заважають три чинники. По-перше, національна нормативна база щодо складу, методів випробувань і розрахунку конструкцій з конопляного бетону не сформована [3, 10]. По-друге, сировинна база обмежена: за даними [10], площі посівів технічних конопель в Україні скоротилися з 966 тис. га у 1928 р. до 1,5 тис. га у 2022 р., тож промислове вирощування потребує відновлення, хоча історично країна мала в цій галузі значний потенціал. По-третє, слабо розвинена переробна інфраструктура: костриця переробляється лише приблизно на восьми підприємствах, переважно у Полтавській та Чернігівській областях і в м. Глухів [10]. Для подолання цих бар'єрів потрібні національні дослідження з адаптації складів до місцевої сировини, розроблення стандартів, підготовка фахівців і популяризація технології серед забудовників. Перспективно також поєднувати конопляний бетон з іншими біопозитивними матеріалами (дерев'яний каркас, глиняні штукатурки) для створення огороджувальних систем із переважно природних і відновлюваних матеріалів.

Висновок

Конопляний бетон є перспективним матеріалом для енергоефективних огороджувальних конструкцій: він поєднує властивості, які в сукупності недосяжні для традиційних матеріалів. Низька теплопровідність (0,06-0,17 Вт/(м·К)) разом із каркасом дозволяє зводити монолітні стіни без додаткового утеплення та зменшувати ризик теплових мостів. Висока паропроникність і гігроскопічність забезпечують природне регулювання вологості внутрішнього повітря, сприяючи створенню здорового мікроклімату. За результатами LCA-досліджень, матеріал має від'ємний баланс CO_2 за життєвий цикл [5] та нижчу вбудовану енергію порівняно з традиційними матеріалами [12], тобто сприяє пом'якшенню зміни клімату.

Результати теплових розрахунків [14] для кліматичних умов України підтверджують, що стіни з конопляного бетону товщиною 400 мм і більше забезпечують термічний опір до 5,601 м²·К/Вт, що перевищує нормативні вимоги ДБН В.2.6-31:2021 [13] . Це свідчить про високу енергоефективність конструкцій із цього матеріалу в умовах помірно-континентального клімату.

Подальше впровадження потребує оптимізації складів під конкретні кліматичні умови, підвищення міцності без втрати теплоізоляційних властивостей, а також розроблення національних стандартів і методик розрахунку [3, 10]. Розвиток сировинної бази технічних конопель може стати додатковим стимулом, особливо в контексті післявоєнної відбудови та переходу до сталого будівництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Xiaodong C., Dai X., Junjie L., 2016. Building energy-consumption status worldwide and the state-ofthe-art technologies for zero-energy buildings during the past decade.Energy and Buildings,vol.128:198-213.https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
2. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. та ін. Потенціал енергоефективності огороджувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2022. 133 с.
3. Григорчук О. М., Тарасевич В. І., Лютий В. О. Конопляний бетон як інноваційний матеріал для сталого будівництва в Україні. *Інноваційні матеріали та інноваційні технології: біотехнологія, прикладна хімія та екологія*: зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 95-річчю КНУТД, Київ, 30–31 жовт. 2025 р. Київ: КНУТД, 2025. С. 209. URL: https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/33224 (дата звернення: 03.11.2026).
4. Arnaud L., Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28, No. 1. P. 50–56. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.
5. Ip K., Miller A. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 69. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.09.001.
6. Latif E., Lawrence R. M. H., Shea A. D., Walker P. An experimental investigation into the comparative hygrothermal performance of wall panels incorporating wood fibre, mineral wool and hemp-lime. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 165. P. 76–91. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.01.028.
7. Collet F., Prétot S. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65. P. 612–619. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
8. Komsi J. Thermal Properties of Hempcrete, a Case Study: bachelor's thesis. Helsinki: Metropolia University of Applied Sciences, 2018. 29 p. URL: https://www.theseus.fi/handle/10024/149515 (дата звернення: 03.11.2026).
9. Примаков О. А. Аналіз деревинної частини стебел конопель як наповнювача для виробництва будівельних блоків. http://znp.ibc-naas.com/wp-content/uploads/2020/02/n_5_23.pdf
10. Ratushniak O., Biks Y., Kavetskyi V. Organisational and economic principles of the technical hemp use in construction as one of Ukraine's innovative and ecological development directions. *Innovation and Sustainability*. 2024. No. 2. P. 44–52. DOI: 10.31649/ins.2024.2.44.52.
11. Memari A. M., Mirzai N., Hashemi M., Lu X., Gracie-Griffin C., Yi H., Lowe S. K. In-situ measurement of residential buildings with hempcrete walls: a case study. *Frontiers in Sustainability*. 2025. Vol. 5. Art. 1508940. DOI: 10.3389/frsus.2024.1508940.
12. Florentin Y., Pearlmutter D., Givoni B., Gal E. A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 156. P. 293–305.
13. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.
14. Bolotov M., Novomlynets O., Prybytko I. A case study on the construction technology and energy efficiency of residential housing made of bio-composite materials. *Technical sciences and technologies*. 2026. № 2(44). P. 499–510. DOI: 10.25140/2411-5363-2026-2(44)-499-510. URL: https://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/36333

Волошина Юлія Володимирівна - студентка групи СМ-24б, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: yulkapechalka85@gmail.com

Мащук Крістіна Вадимівна - студентка групи БМ-24б, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, e-mail: kristinaastudy@gmail.com

Бікс Юрій Семенович - к. т. н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Voloshyna Yulia Volodymyrivna - student of group SM-24b, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: yulkapechalka85@gmail.com

Mashchuk Krystina Vadymivna - student of Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kristinaastudy@gmail.com

Biks Yury Semenovich - PhD, Associate Professor of the Department of Construction, Urban economy and architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.