УДК 699.86:69.05

О. О. Горюн

КОМПЛЕКСНІ ПРИНЦИПИ ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ 3D-ДРУКОВАНИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ В УМОВАХ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто особливості комплексного проєктування енергоефективних житлових будівель із застосуванням технології 3D-друку в умовах України. Проаналізовано вплив пошарової структури, внутрішньої геометрії та порожнин друкованих огороджувальних конструкцій на їхні теплотехнічні характеристики. Розглянуто нормативні вимоги до теплозахисту будівель і необхідність урахування тепловологісного режиму конструкцій. Систематизовано основні принципи узгодження архітектурно-планувальних, конструктивних, теплотехнічних рішень та інженерних систем на етапі цифрового моделювання. Запропоновано концептуальний підхід до комплексного проєктування 3D-друкованих житлових будівель, орієнтований на забезпечення їхньої енергоефективності та експлуатаційної надійності.

Ключові слова: 3D-друк, адитивні технології, житлові будівлі, енергоефективність, огороджувальні конструкції, теплотехнічні характеристики, комплексне проєктування.

Abstract

The paper examines the integrated design of energy-efficient residential buildings using 3D printing technology under the climatic and regulatory conditions of Ukraine. The influence of the layered structure, internal geometry and cavities of printed building envelope components on their thermal performance is analyzed. Regulatory requirements for building thermal protection and the need to consider the hygrothermal performance of building envelopes are discussed. The main principles for coordinating architectural and planning, structural, thermal and building services solutions at the digital modeling stage are systematized. A conceptual approach to the integrated design of 3D-printed residential buildings is proposed, aimed at ensuring their energy efficiency and operational reliability.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, residential buildings, energy efficiency, building envelope, thermal performance, integrated design.

Вступ

Застосування технології 3D-друку в житловому будівництві відкриває можливості для автоматизації зведення конструкцій, реалізації складних геометричних форм, оптимізації витрат матеріалів та створення нових конструктивних рішень. Загальні перспективи застосування технології 3D-друку в малоповерховому будівництві України вже розглядалися в попередній роботі [1], тоді як у цьому дослідженні основну увагу зосереджено на питаннях енергоефективності та комплексного проєктування таких будівель. Водночас технологічні переваги адитивного виробництва не гарантують автоматичного забезпечення належних енергетичних та експлуатаційних характеристик будівлі.

Особливої уваги потребує проєктування огороджувальних конструкцій, оскільки їхня геометрія, матеріальна структура, наявність порожнин, способи теплоізоляції та конструктивні вузли безпосередньо впливають на теплозахисні характеристики будівлі.

В умовах кліматичних викликів та необхідності відбудови житлового фонду України відповідно до принципів сталого розвитку актуальним є пошук технологій, що дають змогу скорочувати тривалість будівництва та оптимізувати використання матеріальних і трудових ресурсів. Впровадження адитивних технологій (3D-друку) дозволяє оптимізувати витрати бетону, реалізувати складні просторові форми та пришвидшити зведення об'єктів. Проте на практиці показники енергоефективності таких будівель часто залишаються поза увагою на етапі проєктування. Формування огороджувальних конструкцій шляхом пошарового екструдування суміші створює специфічну внутрішню геометрію з порожнинами, теплотехнічна ефективність яких залежить від їхньої конфігурації та конструктивного виконання. Отже, розробка комплексних принципів проєктування 3D-друкованих житлових будівель є нагальною науково-технічною задачею.

Результати дослідження

Однією з визначальних особливостей технології будівельного 3D-друку є пошарове формування конструктивних елементів шляхом послідовного екструдування будівельної суміші відповідно до попередньо розробленої цифрової моделі. На відміну від традиційних технологій бетонування із застосуванням опалубки, надруковані елементи характеризуються специфічною шаруватою структурою, у якій можуть формуватися контактні зони між окремими шарами матеріалу. Особливості зчеплення цих шарів, технологічні параметри друку та властивості суміші зумовлюють можливу анізотропію механічних характеристик конструкції. Крім того, внутрішня пористість і геометрія друкованих елементів можуть впливати на їхні теплотехнічні властивості. Зокрема, у дослідженні [2] наголошується на впливі анізотропії, пористості й шаруватої структури 3D-друкованого бетону на його теплові характеристики.

Важливою перевагою адитивних технологій є можливість формування складної внутрішньої геометрії огороджувальних конструкцій без використання традиційної опалубки. Зокрема, під час друку стін можуть передбачатися внутрішні порожнини, комірчасті, решітчасті та багаторядні структури, конфігурація яких визначається на етапі цифрового моделювання. Такі рішення дають змогу змінювати співвідношення між об'ємом конструкційного матеріалу та повітряними порожнинами, а також передбачати інтеграцію теплоізоляційних матеріалів. Як зазначають автори наукової роботи [3], одним із перспективних напрямів підвищення теплотехнічної ефективності 3D-друкованих огороджувальних конструкцій є оптимізація їхньої внутрішньої геометрії та застосування матеріалів із відповідними теплофізичними властивостями. Зокрема, у науковій літературі розглядаються варіанти заповнення порожнин теплоізоляційними матеріалами, що дає змогу поєднувати конструктивну функцію друкованого елемента із забезпеченням необхідного теплозахисту будівлі [3, 4].

Водночас складна геометрія друкованих стін потребує особливої уваги до формування теплових вузлів і можливих містків холоду. Зокрема, з'єднання зовнішніх та внутрішніх стінок друкованого елемента за допомогою поперечних перемичок може створювати локальні ділянки підвищеної теплопередачі. Їхній вплив залежить від геометрії порожнин, матеріалів конструкції, розташування теплоізоляційного шару та особливостей з'єднання окремих елементів. Тому проєктування внутрішньої структури стін доцільно здійснювати із застосуванням цифрового моделювання та методів чисельного аналізу, зокрема методу скінченних елементів, що дає змогу оцінювати розподіл температурних полів і виявляти потенційно проблемні ділянки огороджувальних конструкцій. Отже, геометрія 3D-друкованої стіни має визначатися не лише умовами технологічності друку та забезпеченням конструктивної міцності, а й вимогами до її теплотехнічної ефективності.

Проєктування 3D-друкованих житлових та громадських будівель в Україні має здійснюватися відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 [5], що встановлює мінімально допустимі теплотехнічні показники огороджувальних конструкцій залежно від температурної зони експлуатації будівлі. Зокрема, мінімально допустиме значення приведеного опору теплопередачі зовнішніх стін житлових будівель становить 4,00 м²·К/Вт для I температурної зони та 3,50 м²·К/Вт для II температурної зони [5]. При цьому під час оцінювання теплозахисних властивостей 3D-друкованих стін необхідно враховувати не лише характеристики основного матеріалу та теплоізоляційного шару, а й вплив конструктивних неоднорідностей, зокрема перемичок, стиків і теплопровідних включень. Отже, геометрія друкованої конструкції та розташування теплоізоляції мають визначатися з урахуванням забезпечення нормативного приведеного опору теплопередачі.

Не менш важливим аспектом є забезпечення належного тепловологісного режиму огороджувальних конструкцій. Пористість матеріалу, капілярне водопоглинання, паропроникність та зміна теплопровідності залежно від вологості можуть суттєво впливати на експлуатаційні характеристики 3D-друкованих стін. У дослідженні [6] експериментально визначено теплофізичні та вологісні властивості спеціально розробленої цементної суміші для 3D-друку, зокрема її пористість, капілярне водопоглинання, паропроникність і теплопровідність за різного ступеня зволоження. У цьому контексті під час проєктування багатошарових огороджувальних конструкцій необхідно передбачати перевірку їхнього тепловологісного стану, зокрема оцінювання ризику міжшарової конденсації та накопичення вологи. У роботі [7] розглянуто питання розподілу вологості, ризику виникнення конденсації та впливу теплоізоляційних шарів у 3D-друкованих бетонних стінах, зокрема в умовах холодного клімату. Таким чином, забезпечення енергоефективності таких будівель потребує

одночасного врахування теплотехнічних і вологісних характеристик конструкцій на етапі проєктування.

Забезпечення належних експлуатаційних характеристик 3D-друкованих житлових будівель потребує комплексного підходу до їх проєктування, за якого архітектурно-планувальні, конструктивні, теплотехнічні та інженерні рішення розглядаються у взаємозв'язку. На етапі цифрового моделювання доцільно узгоджувати геометрію друкованих елементів, розташування теплоізоляції, формування конструктивних вузлів і прокладання інженерних комунікацій з урахуванням технологічних можливостей обладнання та нормативних вимог. Узагальнена схема такого підходу наведена на рис. 1.



Рисунок 1 — Концептуальна схема комплексного проєктування енергоефективних 3D-друкованих будівель

Як видно з наведеної схеми, результативність проєктування визначається не окремими характеристиками конструкцій, а узгодженістю всіх складових на етапі формування цифрової моделі будівлі.

Архітектурно-планувальні рішення мають передбачати раціональну орієнтацію будівлі за сторонами світу, компактність її об'ємно-просторової композиції та врахування природно-кліматичних умов ділянки. Водночас архітектурна форма повинна узгоджуватися з технологічними можливостями будівельного 3D-принтера, зокрема його робочою зоною, траєкторією переміщення друкувальної головки та можливістю формування окремих конструктивних елементів. Такий підхід дає змогу поєднати архітектурну виразність будівлі з технологічністю реалізації проєктних рішень.

Конструктивні рішення повинні враховувати особливості пошарового формування стін, їхню внутрішню геометрію та взаємодію з іншими елементами будівлі. Під час розроблення цифрової моделі доцільно визначати конфігурацію порожнин, товщину та кількість друкованих контурів, розташування перемичок, а також конструктивні вузли примикання стін до фундаментів і перекриттів. Практичні можливості формування складних внутрішніх структур і конструктивно оптимізованих елементів підтверджуються результатами експериментального дослідження залізобетонної плити перекриття, виготовленої за технологією 3DCP [8]. Особливу увагу слід приділяти поєднанню конструктивної міцності з можливістю інтеграції теплоізоляційних матеріалів та забезпеченням необхідних теплотехнічних характеристик [3, 4].

Теплотехнічні рішення передбачають забезпечення нормативного приведеного опору теплопередачі огороджувальних конструкцій, мінімізацію лінійних і точкових теплових мостів та перевірку тепловологісного режиму багатошарових стін. При цьому геометрію друкованих елементів і розташування теплоізоляції необхідно узгоджувати ще на стадії розроблення цифрової моделі, а не

розглядати теплозахист як окремий етап після формування конструктивної схеми. Перспективним інструментом такого узгодження є чисельне моделювання теплопередачі, яке дає змогу оцінювати ефективність різних конфігурацій огороджувальних конструкцій [2, 3].

Інтеграція інженерних систем має передбачатися на початкових етапах проєктування з урахуванням геометрії та конструктивних особливостей друкованих стін. Зокрема, цифрове моделювання дає змогу заздалегідь визначати місця прокладання інженерних комунікацій, вентиляційних каналів, монтажних отворів і технологічних ніш. У разі необхідності їх інтеграції в порожнини стін потрібно передбачати доступ для обслуговування та ремонту, не допускаючи погіршення несучої здатності й теплозахисних властивостей конструкцій. Узгодження систем опалення, вентиляції та рекуперації з архітектурно-конструктивними рішеннями дає змогу розглядати будівлю як єдину цифрову модель, у якій технологія друку та інженерне забезпечення формуються взаємопов'язано.

Таким чином, запропонований комплексний підхід передбачає перехід від ізольованого проєктування окремих друкованих конструкцій до системного формування архітектурно-будівельного об'єкта. Його реалізація дає змогу враховувати не лише технологічні можливості адитивного виробництва, а й вимоги до енергоефективності, комфорту та експлуатаційної надійності житлової будівлі.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування технології 3D-друку в житловому будівництві потребує комплексного підходу до проєктування, який виходить за межі суто архітектурних або конструктивних рішень. Обґрунтовано доцільність узгодженого врахування архітектурно-планувальних, конструктивних, теплотехнічних та інженерних параметрів на початкових етапах проєктування. Запропонований підхід створює передумови для підвищення енергоефективності, забезпечення нормативних показників теплозахисту та належного мікроклімату в 3D-друкованих житлових будівлях. Перспективи подальших досліджень полягають у розрахунковому оцінюванні теплотехнічних характеристик різних типів друкованих огороджувальних конструкцій та їх адаптації до кліматичних умов України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Повзун А. Є., Сидоренко В. Ф., Горюн О. О. Перспективи використання 3D-друку в будівництві малоповерхових споруд. Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (м. Вінниця, 15–16 черв. 2025 р.). Вінниця : ВНТУ, 2025. С. 2056–2059.
2. Sovetova M., Calautit J. K. Thermal and energy efficiency in 3D-printed buildings: Review of geometric design, materials and printing processes. Energy and Buildings. 2024. Vol. 323. Art. 114731. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114731.
3. de Rubeis T., Ciccozzi A., Giusti L., Ambrosini D. On the use of 3D printing to enhance the thermal performance of building envelope – A review. Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 95. Art. 110284. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110284.
4. Pessoa S., Guimarães A. S., Lucas S. S., Simões N. 3D printing in the construction industry – A systematic review of the thermal performance in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 141. Art. 110794. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110794.
5. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2022. 23 с.
6. Pessoa S., Jesus M., Guimarães A. S., Lucas S. S., Simões N. Experimental characterisation of hygrothermal properties of a 3D printed cementitious mortar. Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. Art. e02355. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02355.
7. Chen A. A., Memari A. M. Building Science Performance of 3D-Printed Concrete Walls: A Review of Thermal and Hygrothermal Properties. Buildings. 2026. Vol. 16, Issue 18. Art. 3656. DOI: 10.3390/buildings16183656.
8. Калмиков О. О., Резнік П. А., Фурман І. В., Дем'яненко І. С. Експериментальне випробування плити перекриття складної геометрії, виконаної за допомогою технології 3DCP. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2025. № 17. С. 102–118. DOI: 10.32347/2522-4182.17.2025.102-118.

Горюн Олег Олегович *– PhD, старший викладач кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет ORCID: 0000-0001-5678-835X, e-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua.*

Oleh Horiun *— PhD, senior lecturer of the department of engineering systems in construction, faculty of construction, civil and environmental engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, ORCID: 0000-0001-5678-835X, e-mail : oleggoriun@vntu.edu.ua.*