

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА АРХІТЕКТУРА ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ ЧЕРЕЗ БІОМОРФНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ СИНТЕЗ

Олійник Т.П., Маковецька О.О., Романюта Є.В.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

вул. Дідріхсона, 4, 65029, м. Одеса

oleynik_himek@odaba.edu.ua, makoveckaya_himek@odaba.edu.ua,

romaniutayelyzaveta@gmail.com

У період післявоєнної відбудови України приморські зони розглядаються як стратегічний ресурс економічного зростання та розвитку інноваційних проєктів, що зумовлює необхідність формування стратегій розвитку міст на засадах блакитної економіки, узгоджених із європейським курсом. Показано, що впровадження сучасних архітектурних рішень на засадах «зеленого» будівництва сприяє підвищенню екологічної стійкості прибережних територій та якості міського середовища. У статті розкрито потенціал біоморфно-алгоритмічного синтезу як одного з актуальних підходів до проєктування енергоефективних громадських будівель у контексті сталого розвитку. Особливу увагу зосереджено на поєднанні принципів біомімітики, параметричного формоутворення, «зеленого» будівництва, екологічної сертифікації та інтеграції відновлюваних джерел енергії в архітектурну оболонку. На основі узагальнення сучасних наукових досліджень у галузі зеленої архітектури, цифрового проєктування та BIPV-систем встановлено, що енергоефективність громадських об'єктів досягається не лише завдяки інженерним системам, але й визначається архітектурною формою, орієнтацією будівлі, характеристиками фасадної оболонки, а також взаємодією з природним освітленням і вітровим режимом ділянки. Як приклад практичної апробації такого підходу розглянуто проєкт культурного центру, розміщений у структурі прибережної зони. Показано, що для такого об'єкта біоморфна пластика оболонки може працювати одночасно як композиційний, кліматичний і енергетичний інструмент, забезпечуючи адаптацію об'єкта до складних природно-кліматичних умов приморських територій. Окрему увагу приділено ролі цифрових технологій у процесі проєктування. Розглянуто застосування параметричного моделювання, алгоритмічного керування геометрією, BIM-координації, інсоляційного та енергетичного аналізу, CFD-моделювання повітряних потоків, а також оптимізації інтеграції напівпрозорих BIPV-модулів. Доведено, що поєднання біоморфної морфології, цифрових методів формоутворення та енергоефективних фасадних рішень формує перспективний напрям розвитку сучасної архітектури громадських будівель у прибережних міських середовищах. *Ключові слова:* біоморфно-алгоритмічний синтез, сталий розвиток, зелене будівництво, енергоефективність, громадські об'єкти, BIPV, цифрові технології.

Energy-efficient architecture of public buildings through biomorphic-algorithmic synthesis. Oliinyk T., Makovetska O., Romaniuta Ye.

During the post-war reconstruction of Ukraine, coastal zones are increasingly regarded as a strategic resource for economic growth and the development of innovative projects. This necessitates the formation of urban development strategies based on the principles of the blue economy and aligned with the European integration course. It is demonstrated that the implementation of contemporary architectural solutions based on green building principles contributes to enhancing the ecological resilience of coastal territories and improving the quality of the urban environment. The article reveals the potential of biomorpho-algorithmic synthesis as one of the relevant approaches to the design of energy-efficient public buildings within the context of sustainable development. Particular attention is paid to the integration of principles of biomimicry, parametric form-finding, green building practices, environmental certification, and the incorporation of renewable energy sources into the architectural envelope. Based on the synthesis of contemporary scientific research in the fields of green architecture, digital design, and Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) systems, it is established that the energy efficiency of public buildings is determined not only by engineering systems but also by architectural form, building orientation, characteristics of the façade envelope, as well as interaction with natural daylight and the wind regime of the site. As an example of the practical application of this approach, the project of a cultural center located within a coastal zone structure is examined. It is shown that for such an object the biomorphic plasticity of the envelope can function simultaneously as a compositional, climatic, and energy-related instrument, ensuring the adaptation of the building to the complex natural and climatic conditions of coastal territories. Special attention is given to the role of digital technologies in the design process. The study considers the application of parametric modeling, algorithmic geometry control, BIM coordination, solar and energy analysis, CFD modeling of air flows, and optimization of the integration of semi-transparent BIPV modules. It is demonstrated that the combination of biomorphic morphology, digital form-generation methods, and energy-efficient façade solutions forms a promising direction for the development of contemporary public architecture in coastal urban environments. *Key words:* biomorpho-algorithmic synthesis, sustainable development, green building, energy efficiency, public buildings, BIPV, digital technologies.



Постановка проблеми. Будівельний сектор є одним із найбільших споживачів енергії, на нього припадає ~34–36% світового енергоспоживання, включно з виробництвом будівельних матеріалів та експлуатацією будівель [1]. Цей сектор також відповідає за значну частку викидів парникових газів, що робить його ключовим у питаннях енергоефективності.

Євросоюз прагне досягти кліматичної нейтральності до 2050 року, що включає декарбонізацію будівельного сектору. Ключові заходи передбачають масштабну реновацію громадських об'єктів для високої енергоефективності, використання відновлюваних джерел енергії та скорочення викидів CO₂ до нуля, що є частиною стратегії європейського «Зеленого курсу» [2]. Для України, як кандидата в члени ЄС, ці підходи стають визначальними орієнтирами післявоєнної відбудови. Це означає, що нові громадські об'єкти вже зараз варто проектувати відповідно до європейських стандартів енергонезалежності.

Особливо актуальними стають енергоефективні громадські об'єкти, що поєднують пасивні рішення (теплоізоляція, природне освітлення та вентиляція) із активними технологіями (BIPV-фасади, системи рекуперації енергії, розумне управління), що забезпечує зниження експлуатаційних витрат і скорочення вуглецевого сліду [3].

Водночас сучасна практика свідчить про домінування інженерно-технологічного підходу до забезпечення енергоефективності, тоді як потенціал архітектурно-планувальних рішень часто залишається недостатньо реалізованим. У цьому контексті енергоефективність будівель доцільно розглядати як інтегральну характеристику, що формується не лише за рахунок інженерних систем, але й на рівні архітектурного проектування.

Недостатньо дослідженими залишаються можливості інтеграції біоморфних принципів формування з алгоритмічним моделюванням, що потенційно дозволяє оптимізувати енергетичні, конструктивні та просторові характеристики будівель, підвищити їх адаптивність до умов місцевого середовища та сприяти забезпеченню сталого розвитку.

Мета дослідження. Метою статті є обґрунтування біоморфно-алгоритмічного синтезу як ефективного підходу до формування енергоефективних громадських будівель і перевірка цього підходу на прикладі концептуального проекту культурного центру у прибережній зоні. Для досягнення мети поставлено такі завдання: уточнити зміст поняття біоморфно-алгоритмічного синтезу; виявити зв'язок між архітектурною формою та енергоефективністю; доповнити опис об'єкта блоком про цифрові технології проектування; охарактеризувати потенціал BIPV-інтеграції та фасадної оболонки; узагальнити відповідність проекту принципам зеленої сертифікації.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження принципів сталого та енергоефективного будівництва у розвиток прибережних міст України. Ці міста мають значний потенціал, однак водночас характеризуються складними природно-кліматичними умовами: підвищеною вітровою активністю, впливом солоного морського повітря, інтенсивною інсоляцією та необхідністю раціонального використання прибережних територій.

У таких умовах особливо важливим є застосування архітектурних рішень, здатних поєднати виразну просторову організацію громадських об'єктів із високою енергоефективністю та адаптацією до морського клімату.

В період післявоєнної відбудови України саме приморські зони здатні відіграти роль потужного двигуна економічного відновлення, запуску інноваційних проєктів та розширення міжнародної співпраці. Впровадження сучасних архітектурних рішень для створення культурно-туристичних і рекреаційних комплексів з обов'язковим застосуванням екологічно чистих технологій, принципів «зеленого» будівництва та біопозитивного дизайну дозволить суттєво підвищити стійкість чорноморського узбережжя до екологічних викликів, покращити якість міського середовища та закріпити за Україною статус активного учасника розвитку блакитної економіки [4].

Біоморфно-алгоритмічний підхід у проектуванні дозволяє формувати архітектурні оболонки, які оптимізують сонячні надходження, природне освітлення, вентиляцію та взаємодію будівлі з навколишнім середовищем. Отже, дослідження можливостей біоморфно-алгоритмічного формування та енергоефективних фасадних систем у проектуванні прибережних громадських об'єктів є актуальним для сучасного етапу розвитку чорноморських міст України та відповідає глобальним тенденціям сталого архітектурного проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки у науковій літературі спостерігається посиленна увага до інтеграції сталого будівництва, цифрового проектування та біоміметичних підходів у архітектурі. Це зумовлено глобальними викликами кліматичної зміни, необхідністю зниження енергоспоживання та прагненням підвищити адаптивність споруд до природно-кліматичних умов.

Теоретичні основи сталого архітектурного дизайну сформульовано в працях Чарльза Дж. Кіберта, який розглядає енергоефективність як системну характеристику будівельного об'єкта протягом усього його життєвого циклу [5]. Проблематику біоміметики в архітектурі досліджує М. Полін, який розглядає природні системи як джерело ефективних конструктивних і просторових рішень [6]. Роботи Рівки Оксмана та Роберта Оксмана, а також А. Менгеса і С. Алквіста розглядають цифрову архі-

тектуру не просто як інструмент моделювання, а як окрему логіку мислення, у якій форма генерується через параметри, зв'язки та поведінку системи [7, 8]. У галузі енергоефективності значний внесок зробили дослідження Ш. Аттії, присвячені стратегіям проектування будівель із низьким рівнем енергоспоживання [9]. Окремим напрямом сучасних досліджень є розвиток міжнародних систем оцінювання сталості будівель, зокрема LEED та BREEAM, які встановлюють критерії екологічної ефективності архітектурних об'єктів [10, 11].

Сучасні публікації також приділяють значну увагу енергоефективним фасадним технологіям, зокрема інтеграції фотоелектричних систем у конструкції будівель (BIPV – Building-Integrated Photovoltaics) [12, 13].

В українських наукових працях розглядаються питання оптимізації конструктивних і технологічних рішень з урахуванням енергозбереження [14], підвищення ефективності огорожувальних конструкцій [15], а також впровадження BIM-технологій у процес проектування [16]. Окремі дослідження узагальнюють практичний досвід створення енергоефективних громадських будівель в Україні [17].

Узагальнення сучасних досліджень показує, що хоча окремі аспекти сталого проектування, біоміметики та цифрового моделювання достатньо добре опрацьовані, комплексне поєднання біоморфної морфології з алгоритмічним формоутворенням у проектуванні прибережних громадських об'єктів залишається недостатньо дослідженим, що визначає наукову та практичну актуальність цього дослідження.

Біоморфно-алгоритмічний синтез – сучасний підхід у архітектурному проектуванні, що поєднує принципи органічної, біоморфної структури природних систем із алгоритмічним та параметричним моделюванням. Він дозволяє створювати складні, футуристичні об'єкти, які при цьому споживають мінімум ресурсів і органічно вписуються в екосистему.

Ключові особливості напрямку:

1. Біомімікрія (живі форми). Будівлі запозичують структуру природних об'єктів (мусли, листя, скелетів тощо), а не лише їх форму.

2. Параметричне моделювання (алгоритми). Архітектор задає параметри (силу вітру, кількість сонячного світла, рельєф), а алгоритм сам формує оптимальну форму будівлі, яка буде максимально стійкою та енергоефективною.

3. Екологічність (зелене будівництво):

– Економія матеріалів завдяки точним алгоритмічним розрахункам.

– Саморегуляція фасадів – зміна куту нахилу панелей залежно від сонця, або «дихання» оболонки з метою мінімізації енергоспоживання.

– Інтеграція флори – вертикальні сади або використання біоматеріалів (наприклад, цегли з міцелію грибів).

Синтез біонічної морфології та алгоритмічного формоутворення передбачає інтеграцію двох взаємопов'язаних підходів у процесі архітектурного проектування.

Біонічна морфологія базується на принципах природних систем – пластичній безперервності, структурній раціональності, адаптивності до середовища та мінімізації матеріальних витрат, що дозволяє формувати конструктивно та функціонально ефективні архітектурні оболонки (рис. 1).

Алгоритмічне формоутворення переводить форму в систему параметрів, керованих цифровими методами, що дає змогу контролювати кривину поверхонь, щільність структурних елементів, орієнтацію фасадів, рівень світлопроникності та енергетичні показники окремих зон (рис. 2).

У результаті синтезу біонічні принципи служать основою для естетично виразної та екологічно адаптованої форми, а алгоритмічні методи забезпечують її параметричну керованість, конструктивну оптимізацію та інтеграцію енергоефективних рішень, що особливо важливо для громадських та прибережних об'єктів складної геометрії (рис. 3).

Поєднання біонічних принципів із алгоритмічними методами дозволяє інтегрувати енергоефективні рішення безпосередньо у структуру архітектурної форми (табл. 1). У такому підході фасадні оболонки, конструктивні системи та світлопрозорі елементи можуть працювати як інструменти регулювання мікроклімату будівлі, оптимізації інсоляції та зниження енергоспоживання.

Таким чином, синтез біонічної морфології та алгоритмічного формоутворення створює основу для формування нових архітектурних рішень, у яких естетика, конструкція та екологічна ефективність поєднуються в єдину систему сталого проектування.

Викладення основного матеріалу. Застосування біоморфно-алгоритмічного синтезу розглянуто на прикладі проекту культурного центру, що поєднує туристичні, рекреаційні та культурні функції (рис. 4). Проектування здійснюється з урахуванням прибережного розташування, відкритої акваторії, солоного повітря, вітрових навантажень і насипних ґрунтів, що впливає на конструктивну та фасадну стратегію будівлі.

Територія земельної ділянки становить 4,9 га, а будівля задумана як багатофункціональний комплекс загальною площею близько 28,7 тис. м², до складу якого входять театральні-концертні, виставкові, освітні та громадські простори.

Архітектурний образ центру формує криволінійна оболонка, яка створює динамічний силует на тлі водної поверхні (рис. 5). Така геометрія забезпечує перетікання зовнішнього простору в інтер'єр, формує захищені громадські зони вздовж набережної та світлопрозорі фасадні площини. У результаті архітектурна форма виконує не лише образну, а й кліматичну та функціональну роль.



Рис. 1. Схема "Природний прототип → архітектурна форма"



Рис. 2. Параметричне формоутворення: Walt Disney Concert Hall, Galaxy SOHO



Рис. 3. Комбіновані підходи: Heydar Aliyev Center, Guangzhou Opera House

Біонічна морфологія та алгоритмічне формоутворення

Підхід	Приклади	Основні принципи та функції
Біонічна морфологія	Lotus Temple (Делі, Індія)	Органічна біоморфна форма, натхненна лотосом; забезпечує природне освітлення та пластичну композицію простору.
	Eastgate Centre (Хараре, Зімбабве)	Натхнення природними вентиляційними системами термітників, пасивна кліматична регуляція будівлі.
	Water Cube (Пекін, Китай)	Структура натхненна бульбашками мильного розчину, оптимізація міцності та природного освітлення.
Алгоритмічне формоутворення	Yas Hotel Abu Dhabi (Абу-Дабі, ОАЕ)	Алгоритмічний фасад для контролю сонячного освітлення, прозорості та візуальної динаміки.
	Walt Disney Concert Hall (Лос-Анджелес, США)	Параметричні криволінійні форми з оптимізацією акустики та фасадної геометрії.
	Galaxy SOHO (Пекін, Китай)	Алгоритмічно генеровані плавні об'єми для інтеграції пішохідних маршрутів і внутрішніх дворів.
Комбіновані підходи (біоніка + алгоритміка)	Beijing National Stadium (Пташине гніздо, Пекін, Китай)	Біоморфна переплетена структура з алгоритмічною генерацією форми; забезпечує міцність, естетику та оптимізацію простору.
	Heydar Aliyev Center (Баку, Азербайджан)	Плавні біоморфні форми з алгоритмічною генерацією; поєднує естетику та конструктивну адаптивність.
	Guangzhou Opera House (Гуанчжоу, Китай)	Органічна біоморфна форма з алгоритмічною генерацією; поєднує плавність силуету, конструктивну оптимізацію та просторову адаптивність.

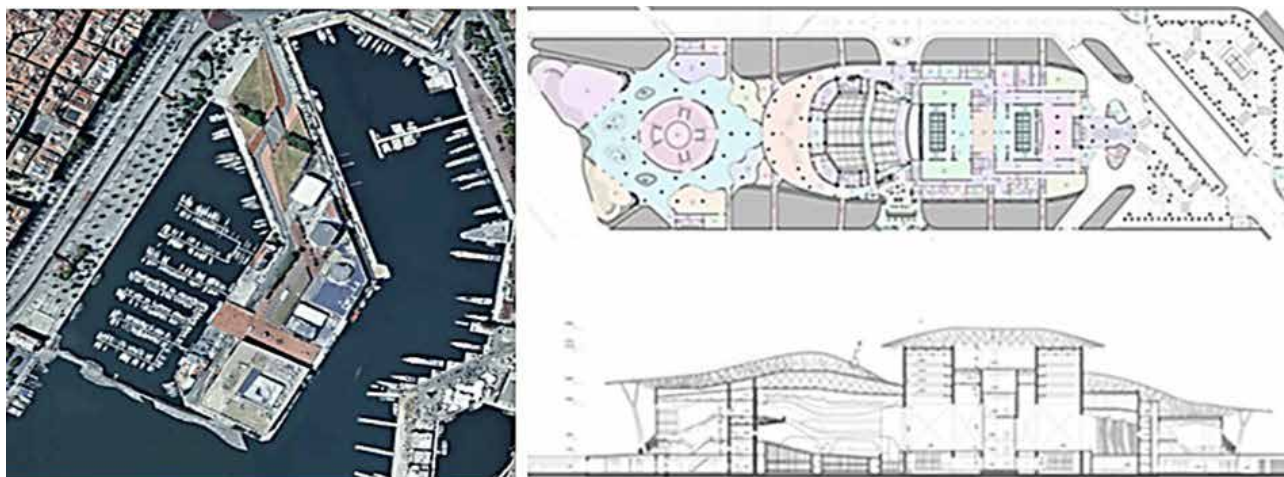


Рис. 4. Генеральний план об'єкту



Рис. 5. Візуальний ряд будівлі, перспективи

Цифрові технології формування об'єкта. Параметричне моделювання дозволяє керувати конфігурацією оболонки через систему змінних параметрів: кривизну поверхонь, орієнтацію фасадних сегментів, ступінь прозорості, розміщення VIPV-модулів, інсоляцію ділянок та просторові зв'язки з навколишнім середовищем. Зміна одного параметра впливає на просторову, конструктивну та енергетичну конфігурацію будівлі.

Важливим інструментом є BIM-координація, яка об'єднує архітектурну, конструктивну та інженерну моделі в єдиному цифровому середовищі. Додатково застосовуються інсоляційний аналіз і CFD-моделювання, що дозволяє оцінювати сонячне навантаження, ризик перегріву та поведінку повітряних потоків у відкритих просторах. У результаті цифрові технології стають основою прийняття архітектурних рішень.

Екологічна та енергоефективна складові. Світлопрозора оболонка є ключовим елементом концепції, виконуючи естетичну, кліматичну та енергетичну функції (рис. 6).

Для контролю теплових надходжень застосовано багатошарову фасадну систему з вентиляваним прошарком між зовнішньою оболонкою та тепловим контуром будівлі. Це зменшує перегрів у літній період і стабілізує внутрішній мікроклімат. Інтеграція напівпрозорих VIPV-модулів дозволяє поєднати огорожувальну, енергогенерувальну та архітектурну функції. Біоморфна геометрія оболонки дає змогу варіювати ступінь прозорості фасаду відповідно до мікрокліматичних потреб різних зон будівлі.

«Зелений» образ об'єкта передбачає створення озелених публічних зон, які поєднують будівлю з існуючою набережною та пішохідними маршрутами уздовж акваторії порту. Використання відкритих терас, прогулянкових зон і громадських площ формує комфортне середовище та сприяє покращенню мікроклімату міського простору.

Оцінка за критеріями «зеленої» сертифікації. З позицій LEED та BREEAM проєкт має потенціал

відповідати основним критеріям сталого проєктування. Розміщення в межах сформованої міської інфраструктури сприяє повторному використанню урбанізованої території, а інтеграція громадських просторів і ландшафтного благоустрою підвищує соціальну цінність середовища. Багатошарова фасадна система, використання природного освітлення, вентиляції та VIPV-технологій відповідають принципам скорочення експлуатаційного енергоспоживання та часткового залучення відновлюваної енергії.

Важливо, що екологічна сертифікація має застосовуватися вже на ранніх етапах концептуального проєктування, коли визначаються конфігурація мас, характер озеленення та ресурсна логіка будівлі. Саме біоморфно-алгоритмічний підхід дозволяє інтегрувати ці критерії безпосередньо в процес формування архітектурної форми.

Висновки. У статті обґрунтовано ефективність біоморфно-алгоритмічного синтезу як підходу до формування енергоефективних громадських будівель у прибережних умовах. Встановлено, що інтеграція біоморфної морфології та параметричного моделювання дозволяє поєднати архітектурну виразність із кліматичною адаптивністю та конструктивною доцільністю.

Доведено, що архітектурна форма може виконувати функцію активного регулятора інсоляції, вентиляції та теплових надходжень. На прикладі проєкту культурного центру підтверджено ефективність використання криволінійних оболонок, багатошарових фасадів і VIPV-технологій для зниження енергоспоживання.

Визначено, що застосування цифрових інструментів (BIM, інсоляційного та CFD-аналізу) забезпечує комплексну оптимізацію проєктних рішень. Показано відповідність запропонованого підходу принципам міжнародних систем зеленої сертифікації. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження біоморфно-алгоритмічного проєктування у практику розвитку прибережних міст України.



Рис. 6. Світлопрозора оболонка та «зелений» ландшафт об'єкту

Література

1. Global Status Report for Buildings and Construction 2024–2025: not just another brick in the wall: the solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast / United Nations Environment Programme. 2025. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/47214> (дата звернення: 17.03.26).
2. The European Green Deal / European Commission. Brussels, 2019. URL: <https://commission.europa.eu> (дата звернення: 17.03.26).
3. Архітектурно-конструктивні енергоефективні оболонки будівель та споруд / Лісенко В. А., Суханов В. Г., Закорчемний Ю. О., Верьовкіна С. С. Одеса: Optimum, 2015. 254 с.
4. New approach for a sustainable blue economy in the EU / European Commission. Brussels, 2021. URL: <https://ec.europa.eu> (дата звернення: 15.03.26).
5. Kibert C. J. Sustainable construction: green building design and delivery. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2022. 656 p.
6. Pawlyn M. Biomimicry in Architecture. 2nd ed. London: RIBA Publishing, 2019. 176 p.
7. Oxman R., Oxman R. Theories of the Digital in Architecture. London: Routledge, 2014. 456 p.
8. Menges A., Ahlquist S. Computational Design Thinking. Chichester: Wiley, 2011. 224 p.
9. Attia S. Net Zero Energy Buildings (NZEB): Concepts, Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. 382 p. DOI: 10.1016/C2016-0-03166-2
10. LEED v4.1 for building design and construction / U.S. Green Building Council. 2019. URL: <https://www.usgbc.org> (дата звернення: 17.03.26).
11. BREEAM international new construction: technical manual / BRE Global. 2021. URL: <https://www.breeam.com> (дата звернення: 17.03.26).
12. Farkas K., Frontini F. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in Sustainable Architecture. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 78. P. 87–95.
13. Building-integrated photovoltaics / A. Faes et al. *Nature Reviews Clean Technology*. 2025. Vol. 1, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00059-9> (дата звернення: 15.03.26).
14. Сучасна архітектура та енергоефективність / О. І. Філоненко та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 202. С. 27-35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2022_202_6 (дата звернення: 17.03.26).
15. Назаренко О.М., Бейнер Н.В., Бейнер П.С. Комплексний підхід до проектування енергоефективних будівель на основі BIM. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1. С. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.66.920> (дата звернення: 18.03.26).
16. Нестеренко В., Давидов А. Досвід та засоби параметричного проектування житлових будівель. *Вісник Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури*. 2025. № 3. С. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2025-3-6> (дата звернення: 15.03.2026).
17. Уреньов В. П., Бахтін Д. С. Досвід проектування енергоефективних громадських будівель державної власності в Україні. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2020. № 57. С. 322-339. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam_2020_57_27 (дата звернення: 17.03.26).

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026