

ARCHITECTURE

BIOCLIMATIC DESIGN AND ENERGY EFFICIENCY AS KEY VECTORS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL FACILITIES

Nazaruk T.

*Department of Architecture and Construction,
King Danylo University, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0009-0007-5941-3036*

БІОКЛІМАТИЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЯК КЛЮЧОВІ ВЕКТОРИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІ

Назарук Т.

*Кафедра архітектури та будівництва,
Заклад вищої освіти «Університет Короля Данила», м. Івано-Франківськ, Україна
ORCID 0009-0007-5941-3036
<https://doi.org/10.5281/zenodo.15879882>*

Abstract

The article discusses the principles of bioclimatic design of industrial facilities in the context of energy efficiency and adaptability to climate change. The influence of architectural and planning solutions, orientation of volumes, insolation, ventilation, and thermal inertia on reducing energy consumption is analyzed. Particular attention is paid to integrating natural factors and digital tools (BIM, Scan-to-BIM, microclimatic modeling) in reconstructing industrial heritage. Model approaches to forming sustainable and functionally efficient facilities adapted to the Ukrainian climatic context are proposed.

Анотація

У статті розглянуто принципи біокліматичного проєктування промислових об'єктів у контексті енергоефективності та адаптивності до кліматичних змін. Проаналізовано вплив архітектурно-планувальних рішень, орієнтації об'ємів, інсоляції, вентиляції та теплової інерційності на зниження енергоспоживання. Особливу увагу приділено інтеграції природних факторів і цифрових інструментів (BIM, Scan-to-BIM, мікрокліматичне моделювання) у реконструкцію промислової спадщини. Запропоновано модельні підходи до формування сталих і функціонально ефективних об'єктів, адаптованих до українського кліматичного контексту.

Keywords: bioclimatic design; industrial architecture; energy efficiency; ventilation; insolation; adaptive revitalization; digital modeling.

Ключові слова: біокліматичне проєктування; промислова архітектура; енергоефективність; вентиляція; інсоляція; адаптивна ревіталізація; цифрове моделювання.

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобального потепління, енергетичної кризи та зростання антропогенного навантаження на довкілля, архітектурне проєктування промислових об'єктів вимагає принципово нових підходів, орієнтованих на енергоефективність, екологічність та адаптивність до кліматичних умов. Традиційні методи проєктування не враховують у повній мірі потенціал природних ресурсів, мікроклімату ділянки та особливості регіонального контексту, що призводить до нерационального використання енергії, надмірних витрат на кондиціювання і опалення, а також підвищеного вуглецевого сліду впродовж життєвого циклу будівлі. Біокліматичне проєктування як інтегрований міждисциплінарний підхід дозволяє забезпечити узгодженість архітектурно-просторових рішень з параметрами зовнішнього середовища, знижуючи енергоспоживання, оптимізуючи теплообмінні процеси та створюючи комфортне внутрішнє середовище без надмірної залежності від техногенних систем.

Особливої актуальності ця проблематика набуває у сфері промислового будівництва, де великі площі, значні теплові навантаження та складні технологічні процеси створюють додаткові виклики для архітекторів і інженерів. Біокліматичні стратегії, зокрема орієнтація будівлі за сторонами світу, використання природної вентиляції, тепла інерційність огорожувальних конструкцій, сонцезахисні екрани, зелені покрівлі та фасади, здатні не лише знизити експлуатаційні витрати, а й підвищити екологічну стійкість об'єктів.

На тлі трансформації нормативної бази у країнах Європейського Союзу та впровадження принципів зеленого курсу, Україна має адаптувати архітектурну практику промислового будівництва до вимог кліматично орієнтованого дизайну. У цьому контексті постає потреба у розробці адаптивних моделей проєктування, які поєднують сучасні цифрові інструменти (BIM, енергомоделювання, симуляції освітлення та вентиляції) з природоорієнтованими рішеннями.

Наукова новизна дослідження полягає у систематизації та критичному аналізі біокліматичних стратегій, релевантних для українських кліматичних зон, а також у визначенні архітектурно-планувальних рішень, що забезпечують енергоефективність промислових об'єктів без втрати функціональної ефективності та експлуатаційної гнучкості. Зважаючи на необхідність скорочення викидів CO₂ та впровадження принципів циркулярної економіки, дослідження біокліматичного проектування у промисловій архітектурі має не лише теоретичну, але й практичну цінність для формування архітектурних стандартів нового покоління.

Метою статті є обґрунтування архітектурних засад біокліматичного проектування промислових будівель як інструменту забезпечення їх енергоефективності та сталого функціонування, з урахуванням кліматичних умов, нормативних вимог і сучасних просторово-технологічних рішень.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні застосовано метод морфологічного аналізу архітектурно-просторових рішень промислових будівель з метою виявлення структурних елементів, які забезпечують біокліматичну адаптацію. Метод функціонально-планувального моделювання використовувався для розробки варіантів конфігурації виробничих об'ємів з урахуванням інсоляції, природної вентиляції та теплового балансу. Також використано метод типологічного узагальнення для класифікації архітектурних рішень відповідно до кліматичних зон, орієнтації на ділянці та характеру технологічних процесів. Застосування цих методів дало змогу сформулювати принципи інтеграції біокліматичних стратегій у сучасне проектування промислових об'єктів з урахуванням енергоефективності, технологічної логіки та умов довкілля.

Результати дослідження та обговорення. Енергоефективність промислових будівель є результатом складної взаємодії зовнішніх кліматичних умов, архітектурних рішень і технічних параметрів об'єкта [4]. Біокліматичне проектування передбачає врахування специфіки мікроклімату території – середньорічної температури повітря, напрямку вітрів, кількості сонячного випромінювання, вологості, наявності природних бар'єрів. Ці параметри визначають логіку розташування об'ємів будівлі, орієнтацію головних фасадів, організацію природного освітлення і вентиляції.

Особливу роль відіграє орієнтація промислового об'єкта за сторонами світу. Наприклад, у кліматичних умовах України доцільно розташовувати робочі зони з переважним освітленням із півдня, що забезпечує оптимальне інсоляційне навантаження в зимовий період. Проте влітку це вимагає застосування сонцезахисних елементів, таких як горизонтальні ламелі, зелений фасад або інерційне скління. Важливо також враховувати сезонну мінливість температур, адже промислові об'єкти часто мають великі об'єми та відкриті простори, де традиційні системи обігріву чи охолодження є малоефективними або енерговитратними.

Іншою критичною умовою є повітрообмін. За біокліматичними принципами в будівлі мають бути передбачені канали природної вентиляції, а також можливість крос-вентиляції через наскрізні прогони, вентиляційні шахти або повітроводи у дахових просторах. Використання ефекту тяги на основі різниці тиску повітря дозволяє значно зменшити витрати на механічну вентиляцію [6]. У теплому кліматі (або в літній період) оптимізується розміщення отворів на висоті, що сприяє ефективному виведенню перегрітого повітря.

Також слід враховувати теплову інерційність огорожувальних конструкцій. Массивні матеріали з високою теплоємністю (наприклад, бетон з вбудованими фазозмінними матеріалами) можуть накопичувати тепло вдень і віддавати його вночі. Це особливо корисно для добового балансу температур у неопалюваних або напівопалюваних виробничих залах. Таким чином, узгодження архітектурної конфігурації об'єкта з кліматичними факторами дозволяє знизити навантаження на інженерні системи, а отже – забезпечити ефективне функціонування з меншими витратами енергії.

Біокліматичні стратегії в архітектурі – це набір просторово-конструктивних рішень, що забезпечують мінімальне використання енергоресурсів через адаптацію до кліматичних умов. У контексті промислової архітектури особливо важливо розробити системний підхід до впровадження таких стратегій, які враховують специфіку технологічних процесів, великі об'єми будівель, потреби в інсоляції, вентиляції та тепловому захисті [5].

Одна з ключових стратегій – інтеграція буферних зон: тамбури, теплові шлюзи, перехідні простори, які зменшують теплові втрати на межі «зовнішнє середовище – внутрішнє середовище» [5]. Також важливо застосовувати зелені дахи та фасади, які знижують температуру покрівлі, захищають від ультрафіолетового випромінювання, затримують дощову воду, а також сприяють мікрокліматичній стабілізації.

Організація природного освітлення – ще одна стратегія, що поєднує функціональну та енергетичну ефективність. Застосування світлових ліхтарів, верхнього освітлення, світловідбивних поверхонь і напівпрозорих матеріалів (наприклад, ETFE-мембран) дає змогу мінімізувати використання штучного освітлення протягом дня. Разом з тим такі рішення вимагають зонального контролю та захисту від перегріву влітку.

Особливе значення має стратегія акумулювання та перерозподілу тепла: застосування стін з термомасою, вентиляційних камер у підлозі, накопичувачів тепла в міжповерхових перекриттях, а також використання геотермальних каналів (ground cooling tubes) для охолодження повітря до його потрапляння у виробничу зону [3].

Не менш важливу роль відіграє і форма будівлі: компактність об'єму (відношення площі зовнішньої оболонки до об'єму будівлі), аеродинамічна оптимізація форм, захист від вітру за рахунок ландшафтного моделювання або зовнішніх елементів – усе це забезпечує зниження втрат енергії.

За допомогою типологічного аналізу можна виокремити найбільш ефективні морфологічні моделі: павільйонна забудова з буферними коридорами, об'єми з патіо, напіввідкриті промислові галереї тощо.

Отже, систематизація біокліматичних стратегій дозволяє створити адаптивну модель промислового об'єкта, що відповідає кліматичним умовам, сприяє підвищенню стійкості системи і водночас зберігає функціональну ефективність.

Впровадження біокліматичного підходу у практику промислового проектування вимагає не лише теоретичних обґрунтувань, але й розробки конкретних архітектурно-планувальних рекомендацій, адаптованих до українського будівельного контексту. Враховуючи зміни клімату, деградацію інфраструктури внаслідок війни та актуальні вимоги до енергоефективності, доцільно сформулювати модельні рішення, які можуть бути інтегровані у нове будівництво або реконструкцію промислових об'єктів.

Насамперед, при формуванні архітектурно-планувальних рішень доцільно передбачати високу варіативність просторових структур. Зокрема, впровадження секційної організації, базованої на принципах модульного проектування, створює передумови для гнучкого реагування на зміну мікрокліматичних параметрів окремих функціональних зон. Такий підхід забезпечує не лише комфортні умови перебування, але й енергоефективність за рахунок локального регулювання теплових режимів. Виробничі приміщення, відповідно, мають проектуватися з урахуванням поділу на зони з різним рівнем теплового навантаження, що уможливує використання комбінованих вентиляційних систем: природної вентиляції у буферних або перехідних просторах, а також механічної вентиляції – у зонах з високими технологічними вимогами до повітрообміну.

Додатково, доцільним є впровадження архітектурних елементів з функцією регульованої інсоляції, зокрема адаптивних фасадних систем, що включають рухомі ламелі, сонцезахисні кілеподібні структури, а також скляні поверхні з електрохромним покриттям, здатні змінювати ступінь прозорості залежно від інтенсивності сонячного випромінювання. Інтеграція таких рішень повинна здійснюватись на стадії передпроектного аналізу, що передбачає детальне дослідження сонячної експозиції ділянки, побудову сонячної карти, аналіз кута падіння прямих променів та моделювання річного балансу інсоляції.

Окрему увагу варто приділити використанню елементів ландшафтного моделювання як складової біокліматичного підходу до проектування. До таких елементів належать насадження листяних і хвойних дерев для організації затінення в літній період, штучні або природні водні поверхні (дзеркала) для охолодження мікроклімату, а також ґрунтові насипи та рельєфні бар'єри, що забезпечують вітрозахист у зимовий період. Всі ці компоненти повинні бути частиною єдиної інтегрованої си-

стеми, яка об'єднує архітектуру, інженерію та елементи урбаністичного середовища, забезпечуючи цілісність енергоефективного рішення на всіх рівнях проектування [2].

У контексті реконструкції наявних промислових об'єктів радянського періоду, що значною мірою формують індустріальний фонд сучасної України, особливо важливим є закладення етапів комплексного енергоаудиту та реалізації принципів адаптивної ревіталізації [1]. Сучасні цифрові інструменти, зокрема інформаційне моделювання будівель (BIM), технології тривимірного сканування з подальшим трансфером у BIM-моделі (Scan-to-BIM), а також програмні засоби для симуляції мікрокліматичних процесів, надають змогу ефективно інтегрувати біокліматичні стратегії у простір без втрати функціонально-експлуатаційної цінності об'єкта. Це відкриває нові горизонти для сталого переосмислення промислової архітектурної спадщини.

Отже, запропоновані архітектурно-планувальні рекомендації формують підґрунтя для створення адаптивних, енергоефективних і сталих промислових об'єктів, які відповідають потребам національної економіки та викликам ХХІ століття.

Таким чином, біокліматичне проектування у промисловій архітектурі виступає ключовим інструментом забезпечення енергоефективності та сталого розвитку в умовах зростаючих кліматичних і ресурсних викликів. Проведене дослідження засвідчило, що інтеграція архітектурно-кліматичних стратегій – таких як орієнтація будівель, природна вентиляція, інсоляційний захист і використання термоінерційних матеріалів – дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати й підвищити якість середовища. На основі аналізу запропоновано типові архітектурно-планувальні рішення для промислових об'єктів у помірному кліматі України.

На нашу думку, на етапі передпроектного аналізу обов'язково враховувати мікроклімат ділянки та використовувати цифрові інструменти для моделювання енергетичної поведінки об'єкта. В умовах реконструкції радянських промислових будівель доцільним є поступове впровадження біокліматичних елементів через ревіталізацію оболонки, модернізацію вентиляції та використання природного освітлення. Варто також переглянути нормативну базу з урахуванням принципів адаптивності, екологічності й кліматичної стійкості.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на типологізацію біокліматичних рішень для різних галузей промисловості та інтеграцію біоархітектурних принципів у державні стандарти енергоощадного будівництва.

Список літератури:

1. Couvelas, A. (2020). Bioclimatic building design theory and application. *Procedia Manufacturing*. Volume 44. Pp. 326-333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.238>.
2. Elaouzy Y., El Fadar A. (2022). Impact of key bioclimatic design strategies on buildings' performance

in dominant climates worldwide. *Energy for Sustainable Development*. Volume 68. PP. 532-549. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.05.006>.

3. Faiziev, T., Toshmamatov, B. (2021). Mathematical model of heat accumulation in the substrate and ground of a heliogreenhouse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. URL: https://www.researchgate.net/publication/356715902_Mathematical_model_of_heat_accumulation_in_the_substrate_and_ground_of_a_heliogreenhouse.

4. Ivanenko, D. S., Ishchenko, O. S., Nazarenko, O. M. (2021). Suchasni teoretychni ta praktychni zakhody pidvyshchennia enerhoefektyvnosti promyslovykh budivel u m. Zaporizhzhia [Modern theoretical and practical measures to improve the energy efficiency of industrial buildings in Zaporizhzhia]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and heat treatment of metals]. № 1(92). S. 21-29.

5. Krivenko, O. (2021). Structure of methods for bioclimatic design of high-rise buildings for forming a sustainable urban environment. *Urban development and spatial planning*. PP. 290-298. URL: https://www.researchgate.net/publication/358794493_STRUCTURE_OF_METHODS_FOR_BIOCLIMATIC_DESIGN_OF_HIGH-RISE_BUILDINGS_FOR_FORMING_A_SUSTAINABLE_URBAN_ENVIRONMENT.

6. Zhelykh, V.M., Shapoval, S.P., Venhryn, I.I. (2015). Zalezhnist temperatury vnutrishnoho povitria vid konstrukttsii zovnishnoho zakhyschennia ta intensyvnosti soniachnoho vyprominiuvannia [The dependence of indoor air temperature on the design of external protection and the intensity of solar radiation]. *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi»* [Scientific and technical collection «Energy efficiency in construction and architecture»]. Vypusk 7. S. 84-88.