

АНОТАЦІЯ

Жданова Ярина Ігорівна, **Архітектурно-планувальна організація вертикальних рослинницьких господарств**. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 191 «Архітектура та містобудування». – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2025.

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми, визначений зв'язок роботи з науковими програмами та стратегічними цілями, сформульовано мету, завдання, методи дослідження, наукову новизну результатів та їх практичне значення.

Дослідження присвячене архітектурно-планувальній організації міських вертикальних рослинницьких господарств у контексті забезпечення їх екологічної стійкості, економічної ефективності та сталої функціональності.

У **першому розділі «Сучасний стан та передумови розвитку архітектури вертикальних агропромислових комплексів»** проведено аналіз формування та актуальності вертикальних господарств в контексті екологічно сталого розвитку, проаналізовано наукові та методичні дослідження, а також приклади проектування та реалізації архітектурних об'єктів вертикальних ферм, систематизовано напрацювання для розробки теоретичного підґрунтя.

У **підрозділі 1.1 «Сучасні тенденції розвитку рослинницьких ферм та архітектурні наукові дослідження в контексті сталого розвитку»** досліджено концептуальні основи вертикальних рослинницьких господарств та їх значимість для вирішення глобальних проблем продовольчої безпеки. Проаналізовано наукометричний спектр публікацій та встановлено обмеженість архітектурних напрацювань у даній сфері, оскільки існуючі роботи розглядають лише загальні принципи функціональної організації агро-будівель або надають фрагментарні дослідження. Визначено, що вітчизняна нормативна база орієнтована на врегулювання будівель теплиць, які за своєю просторово-планувальною та

операційною специфікою не відповідають особливостям вертикальних агрокомплексів. Підсумовано, що для ефективного та стійкого розвитку вертикальних рослинницьких ферм необхідно розробити комплексне методологічне забезпечення щодо архітектурної організації таких об'єктів.

У **підрозділі 1.2** «Вітчизняний та світовий досвід архітектурного проектування та будівництва агропромислових господарств» здійснено аналіз сучасних підходів до архітектурного формування вертикальних рослинницьких господарств, включаючи огляд типових проєктних рішень в Україні та закордоном. Встановлено особливості вітчизняного розвитку вертикальних ферм та їх переваги у секторі агро-виробництва в контексті сучасної військово-політичної ситуації. Окреслено приклади реалізації агро-підприємств у різних містах світу, проаналізовано їх визначальні архітектурні характеристики, функціональну структуру, планувальні особливості, технологічні рішення та відповідність принципам сталого розвитку. На основі проведеного дослідження, було встановлено основні недоліки просторово-планувальної організації таких будівель, зокрема, неефективність архітектурних рішень, що ускладнюють розподіл потоків та знижують загальну ефективність системи.

У **підрозділі 1.3** «Фактори, що впливають на формування просторової структури, та класифікація вертикальних агро-підприємств» було систематизовано результати попередніх досліджень для встановлення теоретичних напрацювань: факторів, що впливають на формування вертикальних ферм, а також двох класифікаційних моделей (багатокритеріальної та архітектурно-функціональної). Визначено та уточнено природно-кліматичні, техногенні та антропогенні чинники, що впливають на формування таких агро-об'єктів. Допрацьовано класифікацію вертикальних ферм за архітектурними, функціональними та технологічними параметрами. Дані результати забезпечують теоретичне підґрунтя для таких об'єктів та слугують базою для подальшої розробки технологічних та архітектурно-планувальних рішень заснованих на вирішенні встановлених проблем.

У другому розділі «Методика організації ефективної функціонально-просторової структури вертикальних агрокомплексів» розроблено методичні та принципіальні підходи до організації архітектурно-функціональних рішень вертикальних рослинницьких господарств, спрямованих на забезпечення їх екологічної стійкості, архітектурної ефективності, сталості та адаптивності до міського середовища.

У підрозділі 2.1 «Методика проведення дослідження» визначено ключові аспекти формування стійкої архітектурної системи агро-господарств. Дослідження зосереджено на проблемах значних капітальних витрат, обмеженої екологічної стійкості та недостатньої архітектурної ефективності. Запропоновано комплексну методологію, що охоплює міждисциплінарний підхід, інтеграцію інноваційних принципів проектування, теоретичний аналіз та емпіричні дослідження. Окреслено модель аналізу та імплементації циркулярних рішень в будівлі вертикальних ферм орієнтовану на оптимізацію основних потоків виробництва. Даний науковий підхід має на меті знизити вуглецевий слід виробничої системи. Запропоновано ієрархічну структуру архітектурних напрацювань, яка охоплює рівні «міста», містобудівне середовище та забезпечує їх економічне доцільне та стійке функціонування.

У підрозділі 2.2 «Засади проектування сталих архітектурних рішень вертикальних рослинницьких господарств» розглянуто базові принципи стійкого проектування, які орієнтовані на економічну ефективність, екологічну сталість та функціональну гнучкість системи. Дані засади, зокрема: принцип зовнішнього доповнення, принцип економії та збереження ресурсів, а також принцип економії часу та простору, об'єднано у групу «економічної ефективності». Окреслено співвідносні прийоми, що встановлюють засоби створення замкнених систем споживання ресурсів, оптимізації планувальної структури, інтеграції відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності будівлі, мінімізації екологічного впливу та забезпечення технологічної відповідності процесу вертикального фермерства даних архітектурних об'єктів.

У **підрозділі 2.3** «Гармонізація та цілісність як визначальні принципи об'ємно-просторової організації вертикальних ферм» описано групу принципів цілісності та гармонізації архітектурних рішень для злагодженої інтеграції вертикальних ферм у міський ландшафт. Дані засади включають принципи контекстуалізму, симбіозу функції та форми, ототожнення конструкції та форми, гармонізації об'ємно-просторових і фасадних рішень та імплементації новітніх технологій. Досліджено способи підвищення архітектурної привабливості та гармонійності будівель об'єкту дослідження через врахування особливостей міського середовища, забезпечення візуально-образної співвідносності функціональному призначенню, застосування базових композиційних прийомів, а також врахування впливу новітніх та «зелених» технологій на загальну архітектурну виразність. Встановлено фундаментальні підходи до проектування, які сприяють синтезу виробничих потреб з урбаністичними та естетичними вимогами вертикальних господарств.

У **третьому розділі** «Імлементация стратегій еко-сталого експлуатації у вертикальних рослинницьких господарствах» розглянуто аспекти інтеграції ефективних сталих рішень у архітектурну структуру вертикальних агро-комплексів з метою зниження їх негативного впливу на довкілля та підвищення технологічної ефективності відповідно до принципів циркулярної економіки.

У **підрозділі 3.1** «Критерії аналізу та оцінки ефективної інтеграції сталих рішень для вертикальних агро-комплексів» представлено критерії аналізу наукових напрацювань щодо оцінки життєвого циклу (LCA) вертикальних господарств, які дозволяють визначати метричні показники впливу на довкілля. Проаналізовано моделі «cradle-to-grave» та «cradle-to-gate», які використовуються для аналізу екологічних наслідків різних етапів функціонування об'єкту, починаючи від видобутку ресурсів і закінчуючи доставкою продукції до споживача чи утилізацією споруди. Визначено, що високі енерговитрати, необхідні для контрольованого середовища є основним обмеженням еко-стійкості таких господарств. Відповідно, запропоновано проаналізувати підходи до зменшення вуглецевого сліду через використання джерел ресурсів виробництва (енергія, поживні речовини та

вуглекислий газ), що засновані на принципах циркулярної економіки. Встановлено критерії порівняння різних циркулярних стратегій за параметрами відносного показника зменшення викиду парникових газів, потенціалу заміщення потреб первинного співвідносного ресурсу та інших характеристик системи таких, як розташування об'єкту, функціональної одиниці виміру аналізу, застосованому методу вирощування, спеціалізації та ін.

У **підрозділі 3.2** «Продуктивність та екологічна ефективності технологічних прийомів для архітектурних рішень вертикальних ферм» проаналізовано сучасні циркулярні підходи для будівель вертикальних ферм, зокрема зовнішній симбіоз із міськими інфраструктурами та внутрішні технології самозабезпечення. Встановлено, що найбільш ефективними зовнішніми підходами є відновлення поживних речовин та енергії з локальних установок анаеробного бродіння або з компостування муніципальних відходів, утилізація надлишкового тепла і викидів джерела зрошення і внесення поживних добавок. Зокрема, подібні технології здатні повністю замінити усі необхідні ресурси виробництва та знизити вуглецевий слід будівлі на 22-93% у порівнянні зі лінійною системою. В свою чергу, серед локальних стратегій найбільш доцільними виявлені інтеграцію фотоелектричних панелей та вітряків, рециркуляцію фільтрату та компостування органічних відходів виробництва задля отримання енергії чи утворення добрив, серед яких ефективність заміщення ресурсів сягає 0,1-100% із можливістю знизити зменшити викиди парникових газів системи до 83%.

У **підрозділі 3.3** «Впровадження енергоефективних та екологічно стійких рішень при проектування вертикальних господарств» досліджено практичні аспекти інтеграції циркулярних підходів у структуру агропромислових об'єктів. Систематизовано архітектурні рішення за рівнями «місто», «об'єкт» та «простір»: встановлено оптимальні відстані (до 20 км) розташування ферм відносно джерел вторинної сировини та необхідність влаштування окремих логістичних вузлів; визначено особливості функціонально-планувальної організації будівлі з виокремленням спеціалізованих зон для розміщення обладнання (підвальні рівні

для переробки відходів, технічні приміщення для зберігання води та CO₂); надано рекомендації щодо розрахунку ємності резервуарів (0,75-5,0 денних норм іригації) та формування відповідного мікроклімату в технічних приміщеннях (температура 5-30°C, вологість до 85%). Визначено оптимальне співвідношення інтеграції фотоелектричного скла у фасадні системи (40-20% до 60-80%) та наведено вимоги до приміщень біогазових установок (влаштування протипожежних перегородок 1-го класу, запобіжних клапанів, систем пожежогасіння) та зон використання CO₂ (розміщення на першому поверсі біля зовнішньої стіни, вентиляція з моніторами рівня CO₂, виведення випускних клапанів назовні).

У четвертому розділі **«Особливості формування архітектурно-просторових рішень вертикальних рослинницьких господарств»** надано архітектурні рекомендації на рівнях «місто», «об'єкт» та «простір» щодо містобудівного розташування, функціонально-планувальної організації та просторового планування будівель агропромислових об'єктів.

У підрозділі 4.1 «Містобудівні рекомендації розміщення рослинницьких агро-промислових комплексів» запропоновано ієрархічну модель інтеграції вертикальних господарств у міське середовище. Встановлено 4 рівні об'єктів вертикальних ферм: міський, міжрайонний, районний і локальний за орієнтацію на певну категорію споживачів, які різняться за обсягом продовольчих потреб. Дане дослідження виконано з урахуванням соціальних, економічних і екологічних потреб міста. Визначено характерні критерії для кожного із рівнів: розташування – міські зони, близькість до певної транспортної інфраструктури або інших промислових об'єктів; експлуатаційні параметри – річна врожайність, інтеграція стратегій сталого розвитку, спеціалізація вирощування; та архітектурні характеристики – висотність, об'ємно-просторова структура та можливості функціональної кооперації. Продемонстровано, що інтеграція ферм у містобудівні системи сприяє підвищенню продовольчої безпеки та покращенню екологічної стійкості міського середовища завдяки локальному забезпеченню агро-продукцією, мінімізації транспортних потреб, і гармонізації із соціально-економічною урбанізованою структурою.

У підрозділі 4.2 «Організація функціонально-планувальної структури вертикальних агрогосподарств» наведено диференціацію вертикальних господарств за функціональними характеристиками та об'ємно-планувальні рішення. Запропоновано три набори приміщень функцій ферми: розширений, базовий та мінімальний, де застосування розширеного набору є доцільним при функціональному доповненні ферми, базового – для забезпечення раціонального оперування виробництва, а мінімального – при матеріально-технічних обмеженнях або при влаштуванні в умовах щільної забудови чи компактної ділянки. На основі даного аналізу також надано функціонально-планувальні рішення будівлі для різних конфігурацій – одно-, середньо- та багатоповерхової структури, які засновані на особливостях та послідовності технологічного процесу. Визначено основний перелік приміщень за різними функціональними категоріями (виробничі, складські, санітарно-побутові, адміністративні, інженерно-технічні та лабораторні приміщення) і їх необхідними внутрішніми взаємозв'язками. Надано практичні рекомендації щодо забезпечення безпеки виробництва та працюючих на основі

і У підрозділі 4.3 «Просторові параметри будівель вертикальних рослинницьких ферм» досліджено причинно-наслідкові взаємозв'язки між технологічно-операційними та архітектурними характеристиками вертикальних агро-підприємств. Встановлено закономірності розподілу площі для різних функціональних зон відносно загальної площі будівлі, сумарної площі вирощування обладнання та врожайності ферми. Запропоновано спосіб розрахунку площі та висоти основного приміщення вирощування, а також загальної площі та об'єму всієї будівлі на основі технічних параметрів обладнання та продуктивності самого об'єкта. Наведено спосіб оптимізації техніко-економічних показників проекту за допомогою використання багатоярусних систем у вертикальних фермах.

Ключові слова: вертикальні ферми; промислова архітектура; поліфункціональні агропромислові комплекси; міський симбіоз; просторово-функціональне проектування; гармонізація архітектурних рішень; енергоефективність; екологічна стійкість агро-систем.

М

а

Т

Yaryna Zhdanova, **Architectural and space-planning design of vertical plant farms.** – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 191 «Architecture and urban planning». – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2025.

In the **Introduction**, the relevance of the chosen topic is substantiated, the connection of the work with scientific programs and strategic goals is defined, the purpose, objectives, research methods, scientific novelty of the results and their practical significance are formulated.

The research is devoted to the architectural and planning organization of urban vertical plant growing facilities in the context of ensuring their ecological sustainability, economic efficiency, and sustainable functionality.

In the **first section, "Current State and Prerequisites for the Development of Vertical Agro-Industrial Complex Architecture"**, an analysis of the formation and relevance of vertical farms in the context of environmentally sustainable development is conducted, scientific and methodological research is analyzed, as well as examples of design and implementation of architectural objects of vertical farms, systematizing the findings for the development of a theoretical foundation.

In **subsection 1.1, "Modern Trends in the Development of Plant Farms and Architectural Scientific Research in the Context of Sustainable Development,"** the conceptual foundations of vertical plant growing facilities and their significance for solving global food security problems are investigated. The scientific spectrum of publications is analyzed, and the limitations of architectural developments in this field are established, as the existing works consider only general principles of functional organization of agricultural buildings or provide fragmentary research. It is determined that the domestic regulatory framework is oriented towards regulating greenhouse buildings, which in their spatial planning and operational specifics do not correspond to

the characteristics of vertical agro-complexes. It is concluded that for the effective and sustainable development of vertical crop farms, it is necessary to establish comprehensive design framework regarding the architectural organization of such facilities.

In **subsection 1.2**, "Experience in Architectural Design and Construction of Agro-Industrial Facilities," an analysis of modern approaches to the architectural formation of vertical plant growing facilities is carried out, including a review of typical design solutions. The peculiarities of Ukrainian development of vertical farms and their advantages in the agro-production sector in the context of the current military-political situation are established. Examples of the implementation of agro-enterprises in different cities of the world are outlined, their defining architectural characteristics, functional structure, planning features, technological solutions, and compliance with sustainable development principles are analyzed. The main shortcomings of the spatial planning organization of such buildings were identified as the inefficiency of architectural design that complicate the distribution of flows and reduce the overall efficiency of the system.

In **subsection 1.3**, "Factors Influencing the Formation of Spatial Structure, and Classification of Vertical Agro-Enterprises," the results of previous research were systematized to establish theoretical developments: factors influencing the formation of vertical farms, as well as two classification models (multi-criteria and architectural-functional). Natural-climatic, technogenic, and anthropogenic factors influencing the formation of such agro-facilities are defined and specified. The classification of vertical farms according to architectural, functional, and technological parameters has been refined. These results provide a theoretical foundation for such facilities and serve as a basis for further development of technological and architectural-planning solutions.

In the **second chapter**, "**Methodology for Organizing an Effective Functional-Spatial Structure of Vertical Agro-Complexes**," methodological and principal approaches to organizing architectural and functional solutions for vertical plant growing facilities are developed, aimed at ensuring their ecological sustainability, architectural efficiency, viability, and adaptability to the urban environment.

In **subsection 2.1**, "Research Methodology," key aspects of forming a sustainable architectural system of agricultural facilities are defined. The research focuses on

problems of capital expenditures, ecological sustainability, and architectural efficiency. A comprehensive methodology is proposed, encompassing an interdisciplinary approach, integration of innovative design principles, theoretical analysis, and empirical research. A model for analyzing and implementing circular solutions in vertical farm buildings is outlined, oriented toward optimizing the main production flows to reduce the carbon footprint of the system. A hierarchical structure of architectural organization is proposed on the levels of "city," "object," and "space," which are aimed on harmonious integration of the building into the urban environment ensuring system's viability and sustainability.

In **subsection 2.2**, "Principles of Designing Sustainable Architectural Solutions for Vertical Plant growing Facilities," basic principles of sustainable design are examined, which are oriented toward economic efficiency, ecological sustainability, and functional flexibility of the system. These principles, including: the principle of completion from without, the principle of resource conservation, and the principle of time and space economy, are combined into the group of "economic efficiency." Corresponding design techniques are outlined for creating closed resource consumption systems, optimizing planning structure, integrating renewable energy sources, increasing building energy efficiency, minimizing environmental impact, and ensuring design compliance with the vertical farming process.

In **subsection 2.3**, "Harmonization and Integrity as Defining Principles of Volumetric-Spatial Organization of Vertical Farms," a group of principles of integrity and harmonization of architectural solutions for the coherent integration of vertical farms into the urban landscape is studied. These principles include contextualism, symbiosis of function and form, identification of structure and form, harmonization of volumetric-spatial and facade solutions, and implementation of innovative technologies. Methods for enhancing architectural synergy and harmony of vertical farms are investigated through consideration of urban environment characteristics, ensuring visual-imagery correspondence to functional purpose, application of basic compositional techniques, and considering the impact of innovative and "green" technologies on overall architectural expressiveness. Fundamental design approaches are established that promote the synthesis of production needs with urban and aesthetic requirements of vertical farms.

In the **third chapter, "Implementation of Eco-Sustainable Operation Strategies in Vertical Plant growing Facilities,"** aspects of integrating effective sustainable solutions into the architectural structure of vertical agro-complexes are examined, with the aim of reducing their negative environmental impact and increasing technological efficiency in accordance with the principles of the Circular Economy.

In **subsection 3.1, "Criteria for Analysis and Evaluation of Effective Integration of Sustainable Solutions for Vertical Agro-Complexes,"** criteria for analyzing scientific developments regarding life cycle assessment (LCA) of vertical farms are presented, which allow for determining metric indicators of environmental impact. The "cradle-to-grave" and "cradle-to-gate" models used for analyzing the environmental consequences of various stages of facility operation are analyzed. It is determined that high energy consumption required for a controlled environment is the main limitation of eco-sustainability of such facilities. Criteria for comparing various circular strategies are established according to parameters of relative greenhouse gas emission reduction indicators, potential for replacing primary corresponding resource needs, and other system characteristics such as facility location, functional unit of analysis measurement, applied cultivation method, specialization, and others.

In **subsection 3.2, "Productivity and Environmental Efficiency of Technological Approaches for Architectural Solutions of Vertical Farms,"** modern circular approaches for vertical farm buildings are analyzed, particularly external symbiosis with urban infrastructures and internal self-sufficiency technologies. It is established that the most effective external approaches are nutrient and energy recovery from local anaerobic digestion plants or from municipal waste composting, utilization of excess heat and CO₂ emissions from industrial processes, as well as the use of wastewater as a source of irrigation and nutrient supplements. These technologies are capable of completely replacing all necessary production resources and reducing the building's carbon footprint by 22-93% compared to a linear approach. The most relevant internal strategies were found to be integration of photovoltaic panels and wind turbines, filtrate recirculation, and composting of organic production waste to obtain energy or fertilizers, among which

the efficiency of resource replacement reaches 0.1-100% with the ability to reduce greenhouse gas emissions of the system by up to 83% compared to a conventional system.

In **subsection 3.3**, "Implementation of Energy-Efficient and Environmentally Sustainable Solutions in the Design of Vertical Farms," practical aspects of integrating circular approaches into the structure of agro-industrial facilities are investigated. Architectural solutions are systematized according to the levels of "city," "object," and "space": optimal distances (up to 20 km) for farm location relative to secondary raw material sources and the necessity of arranging separate logistical nodes are established; functional-planning organization of the building with separation of specialized zones for equipment placement (basement levels for waste processing, technical rooms for water and CO₂ storage) are defined; recommendations regarding calculation of reservoir capacity (0.75-5.0 daily irrigation norms) and formation of appropriate microclimate in technical rooms (temperature 5-30°C, humidity up to 85%) are provided. The optimal ratio of photovoltaic glass integration into facade systems (40-20% to 60-80%) is determined, and requirements for biogas installation rooms (arrangement of 1st class fire walls, safety valves, fire extinguishing systems) and CO₂ usage zones (placement on the first floor near the external wall, ventilation with CO₂ level monitors, leading exhaust valves outside) are presented.

In the **fourth chapter**, "**Peculiarities of Forming Architectural-Spatial Solutions for Vertical Plant Growing Farms**," architectural recommendations are provided at the levels of "city," "object," and "space" regarding urban location, functional-planning organization, and spatial planning of agro-industrial facility buildings.

In **subsection 4.1**, "Urban Planning Recommendations for Agro-Industrial Complexes," a hierarchical model for integrating vertical farms into the urban environment is proposed. Four levels of urban vertical farm facilities are established: city, inter-district, district, and local, based on orientation toward a certain category of consumers, which differ in terms of food needs volume taking into account the social, economic, and ecological needs of the city. Characteristic criteria for each level are defined: location – urban zones, proximity to certain transport infrastructure or other

industrial facilities; operational parameters – annual yield, integration of sustainable development strategies, cultivation specialization; and architectural characteristics – height, volumetric-spatial structure, and possibilities for functional cooperation.

In **subsection 4.2**, "Organization of Functional-Planning Structure of Vertical Agricultural Facilities," the differentiation of vertical farms according to functional characteristics and volumetric-planning solutions is presented. Three sets of premises for vertical farms are proposed: extended, basic, and minimal, where the application of the extended set is appropriate for functional supplementation of the farm, the basic – for ensuring rational operation of production, and the minimal – under material-technical limitations or when arranged in conditions of dense development or a compact site. Based on this analysis, functional-planning solutions for buildings of various configurations are also provided – single-story, medium-height, and multi-story structures, which are based on the features and sequence of the technological process. The main list of premises according to various functional categories (production, storage, sanitary-domestic, administrative, engineering-technical, and laboratory facilities) and their necessary internal interrelations are defined. Practical recommendations regarding ensuring production and worker safety based on domestic regulatory documentation are provided.

In **subsection 4.3**, "Spatial Parameters of Vertical Farm Buildings," cause-and-effect interrelations between technological-operational and architectural characteristics of vertical agro-enterprises are investigated. Regularities of area distribution for various functional zones relative to the total building area, total area of cultivation equipment, and farm yield are established. A method for calculating the area and height of the main cultivation room, as well as the total area and volume of the entire building based on technical parameters of equipment and productivity of the facility itself, is proposed. A method for optimizing technical and economic indicators of the project through the use of multi-tier systems in vertical farms is presented.

Keywords: vertical farms; industrial architecture; multifunctional agro-industrial facilities; urban symbiosis; spatial-functional design; harmonization of architectural solutions; energy efficiency; ecological sustainability of agro-systems.