

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЖДАНОВА ЯРИНА ІГОРІВНА

УДК 725.42:631.23:72.01:502.17

ДИСЕРТАЦІЯ

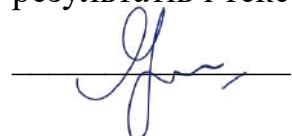
**Архітектурно-планувальна організація вертикальних рослинницьких
господарств**

191 «Архітектура та містобудування»

19 «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 Я.І. Жданова

Науковий керівник: Дорохіна Ганна Ігоївна, кандидат архітектури, доцент.

Науковий керівник: Хорхе Сенан Салінас, доктор філософії.

Київ – 2025

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 проєктування, 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», «об'єкта» та «простору», що сприяє гармонійній інтеграції подібних споруд у містобудівне середовище та забезпечує їх економічне доцільне та стійке функціонування.

У підрозділі 2.2 «Засади проєктування сталих архітектурних рішень вертикальних рослинницьких господарств» розглянуто базові принципи стійкого проєктування, 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 CO₂ з промислових процесів, а також використання очищених стічних вод як 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 вітчизняної нормативної документації.

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.

ABSTRACT

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.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Дорохіна, Г., **Жданова, Я.** Принципи економічної ефективності архітектурно-просторової організації вертикальних ферм. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2023. № 66. С. 135–149. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.66.135-149>. (фахове видання України категорії «Б»)

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації і участь у формулюванні основних висновків щодо принципів і прийомів економічно ефективного архітектурного проектування вертикальних ферм.

2. **Жданова, Я.**, Дорохіна, Г. Принципи цілісності та гармонізації архітектурно-просторових рішень вертикальних ферм. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2024. № 68. С. 215–227. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.215-227>. (фахове видання України категорії «Б»)

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації, а також участь у формулюванні висновків щодо принципів і прийомів створення цілісної та гармонійної архітектури вертикальних ферм.

3. **Жданова Я.** Архітектурні та функціональні особливості вертикальних ферм в Україні. Просторовий розвиток. 2024. № 10. С. 83–93. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.83-93>. (фахове видання України категорії «Б»)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Дорохіна Г., **Жданова Я.** Архітектурна класифікація вертикальних агрокомплексів за способом кооперування. European scientific discussions. Rome, Italy, 2021. С. 87–93. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-european-scientific-discussions-15-17-avgusta-2021-goda-rim-italiya-arhiv/>.

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації, систематизація основних типів вертикальних агрокомплексів та участь у розробці висновків щодо особливостей їх класифікації за способом кооперування.

5. Дорохіна Г., **Жданова Я.** Фактори, що впливають на формування структури вертикальних агропромислових комплексів. Science, innovations and education: problems and prospects. Tokyo, Japan, 2021. С. 225–230. URL: <https://sci-conf.com.ua/i-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-18-20-avgusta-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>.

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації, систематизація основних факторів та участь у розробці висновків щодо особливостей впливу факторів на формування структури вертикальних агропромислових комплексів.

6. **Жданова Я.**, Дорохіна Г. Глобальні проблеми сучасності та архітектури. Вплив урбанізації та перенаселення на формування вертикальних ферм. Філософія науки, техніки, архітектури в гуманістичному вимірі. Київ: КНУБА, 2021. С. 138-139. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/692>.

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз, обробка інформації та статистичних даних щодо рівня урбанізації і пов'язаних агропромислових питань, участь у розробці висновків щодо визначення впливу глобальних проблем людства на формування вертикальних ферм.

7. **Жданова Я.**, Дорохіна Г. Історичні передумови та особливості розвитку вертикальних ферм в Україні. Сучасна архітектурна освіта. Етнологічні засади української архітектури. Київ: КНУБА, 2021. С. 38-41. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/51>.

8. **Жданова Я.** Особливості використання відновлюваних джерел енергії при проектуванні вертикальних ферм. Енергоощадні машини і технології. Київ: КНУБА, 2022. С. 126-129. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/642>.

9. **Жданова Я.** Архітектурне проектування вертикальних ферм: актуальні питання та виклики. Студентська молодь і науковий прогрес. Львів:

ЛНУП, 2023. С. 527. URL: <https://lnup.edu.ua/en/naukdij/naukove-tovarystvo-studentiv-aspirantiv-doktorantiv-ta-molodykh-vchenykh/5949-newsnauk231012>.

10. **Жданова Я.** Вплив технологічного процесу виробництва у вертикальних фермах на архітектурні особливості об'єкту. Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій. Львів: ЛНУП, 2023. С. 530-532. URL: <https://lnup.edu.ua/en/naukdij/5890-newsnauk231003>.

11. **Жданова Я.** Проблематика розвитку та архітектурного проектування вертикальних ферм в Україні. Інновації в архітектурі, дизайні та мистецтві: до 100-річчя факультету архітектури НАОМА. Київ: НАОМА, 2024. С. 61-63. URL: <https://dub.sh/WPdnwYi>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

12. **Жданова Я.** Вплив забезпечення автономності вертикальних агропромислових комплексів на архітектурно-планувальні рішення. Науково-практична конференція "Прогностичні напрямки розвитку сучасної архітектури". Київ: КНУБА, 2021.

13. **Жданова Я.** Сучасні тенденції розвитку та архітектурні особливості вертикальних ферм. Друга науково-практична конференція "Прогностичні напрямки розвитку сучасної архітектури". Київ: КНУБА, 2023.

14. **Жданова Я.** Типологічні основи та сучасні приклади різноманітної функціональної інтеграції у вертикальних рослинницьких фермах. Третя науково-практична конференція "Прогностичні напрямки розвитку сучасної архітектури". Київ: КНУБА, 2024.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ _____	2
ABSTRACT _____	9
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ _____	15
ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК _____	20
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ _____	24
ВСТУП _____	25
РОЗДІЛ I СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ АРХІТЕКТУРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ АГРОПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ _____	34
1.1 Сучасні тенденції розвитку рослинницьких ферм та архітектурні наукові дослідження в контексті сталого розвитку _____	34
1.2 Вітчизняний та світовий досвід архітектурного проектування та будівництва агропромислових господарств _____	46
1.3 Фактори, що впливають на формування просторової структури, та класифікація вертикальних агро-підприємств _____	66
Висновки по першому розділу _____	77
РОЗДІЛ II МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ ЕФЕКТИВНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО- ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ АГРОКОМПЛЕКСІВ _____	79
2.1 Методика проведення дослідження _____	79
2.2 Засади проектування сталих архітектурних рішень вертикальних рослинницьких господарств _____	91
2.3 Гармонізація та цілісність як визначальні принципи об'ємно-просторової організації вертикальних ферм _____	103
Висновки по другому розділу _____	115
РОЗДІЛ III ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ЕКО-СТАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У ВЕРТИКАЛЬНИХ РОСЛИНИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ _____	117
3.1 Критерії аналізу та оцінки ефективної інтеграції сталих рішень для вертикальних агро-комплексів _____	117
3.2 Продуктивність та екологічна ефективності технологічних прийомів для архітектурних рішень вертикальних ферм _____	126

3.3 Впровадження енергоефективних та екологічно стійких рішень при проектуванні вертикальних господарств _____	141
Висновки по третьому розділу _____	155
РОЗДІЛ IV ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУРНО-ПРОСТОРОВИХ РІШЕНЬ ВЕРТИКАЛЬНИХ РОСЛИННИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВ _____	157
4.1 Містобудівні рекомендації розміщення рослинницьких агро-промислових комплексів _____	157
4.2 Організація функціонально-планувальної структури вертикальних агрогосподарств _____	170
4.3 Просторові параметри будівель вертикальних рослинницьких ферм _____	184
Висновки по четвертому розділу _____	197
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ _____	199
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ _____	201
ДОДАТКИ _____	230
Додаток А Поняття вертикального фермерства _____	230
Додаток Б Статистичні дані щодо вертикального фермерства в контексті глобального розвитку та порівняльного аналізу технологій рослинництва _____	232
Додаток В Специфікації і таблиці _____	246
Додаток Г Проміжні розрахунки _____	260
Додаток Д Акти впровадження результатів дослідження _____	265
Додаток Е Список опублікованих праць за темою дисертації _____	270
Додаток Ж Сертифікати участі у конференціях та конкурсах аспірантських робіт _____	273
Додаток И Джерела ілюстрацій _____	276

ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

Аеропоніка (англ. aeroponics) – один із напрямків гідропоніки, метод вирощування рослин без ґрунту та субстрату у вологому повітряному середовищі завдяки періодичному обприскуванню коренів поживними розчинами у вигляді аерозолю [1, 2].

Анаеробне бродіння (англ. anaerobic digestion) – спосіб одержання енергії з біомаси тваринного чи рослинного походження за допомогою розкладання органічних речовин мікроорганізмами в безкисневому середовищі, у результаті якого утворюється біогаз [3, 4].

Біогаз (англ. biogas) – газ, що є сумішшю метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2), є одним із джерел відновлювальної теплової та електричної енергії [3].

Валоризація відходів (англ. waste valorization) – процес перетворення відходів на більш корисні продукти, такі як енергія, палива або інші цінні ресурси, наприклад, вода, поживні речовини та CO_2 , які необхідні для росту рослин у вертикальних фермах, із акцентом на еко-стійкість та зменшення викидів [5].

Вертикальне рослинницьке господарство (вертикальна ферма) – це інтегроване в будівлю рослинницьке підприємство, яке використовує технології контрольованого середовища та безґрунтові методи для вирощування рослин у вертикальних багатоярусних системах.

Вертикальне фермерство (англ. vertical farming) – діяльність із вирощування культур у багатьох ярусах, один над одним, всередині будівлі або під землею, часто у спеціально контрольованому середовищі [6].

Викиди парникових газів (англ. greenhouse gas emissions) – загальний обсяг парникових газів, який викинуто в атмосферне повітря за визначений період часу [7].

Вуглецевий слід (англ. carbon footprint) – це показник загальної кількості викидів діоксиду вуглецю (CO_2), які безпосередньо або опосередковано спричиняються певною діяльністю чи накопичуються протягом життєвого циклу системи [8].

Гідропоніка (англ. hydroponics) – це техніка вирощування рослин із використанням поживного розчину на водній основі замість ґрунту, і може включати агрегований субстрат або середовища для вирощування, такі як вермикуліт, кокосова койра або перліт [9].

Дигестат (англ. digestate) – це вторинний продукт анаеробного бродіння, який завдяки високому вмісту поживних речовин може використовуватись як альтернативне більш еко-чисте добриво порівняно із хімічними добривами [10].

ДіаGRID, каркас діаGRIDного типу (англ. diagrid) – оболонковий каркас виконаний з діагонально взаєморозміщених металевих, бетонних або дерев'яних балок, який використовується при будівництві будівель і дахів. ДіаGRID позбавляє потреби в колонах як при горизонтально-спрямованих балках і може використовуватися для виготовлення великих просторових та висотних покрівельних просторів без колон [11].

Еквівалент двоокису вуглецю (англ. carbon dioxide equivalent) – умовна одиниця, парниковий ефект якої дорівнює парниковому ефекту викидів однієї тони двоокису вуглецю. Перерахування викидів парникових газів у фізичних одиницях до еквіваленту двоокису вуглецю здійснюється з використанням коефіцієнтів (потенціалів глобального потепління) [7].

Екологічна стійкість (англ. environmental sustainability) – баланс між екологічними, економічними та соціальними цілями, такими як: скорочення викидів вуглекислого газу, сприяння використанню відновлюваної енергії та забезпечення раціонального використання ресурсів [12]. В архітектурному контексті це передбачає підхід до проектування, спрямований на мінімізацію негативного впливу будівель на навколишнє середовище шляхом ефективного та раціонального використання матеріалів, енергії та простору для забудови [13].

Енергоефективність (англ. energy efficiency) – це стабільне енергозабезпечення об'єктів, ефективне (раціональне) використання енергетичних ресурсів, використання меншої кількості енергії для забезпечення того ж рівня енергетичного забезпечення будівель та споруд або технологічних процесів на виробництві [14]. В контексті архітектурного проектування це передбачає низку

архітектурних і технічних заходів, що забезпечують значне зниження витрат енергії на опалення чи охолодження будівель, підвищуючи при цьому комфортність мікроклімату в приміщеннях [15].

Землеробство у контрольованому середовищі (англ. controlled environment agriculture) – практика вирощування сільськогосподарських культур при регулюванні умов навколишнього середовища, таких як освітлення, температура, вміст CO₂, вологість, системи поливу і удобрення та інших елементів, що впливають на фізіологічний розвиток рослин [16].

Компостування (англ. composting) – це метод перетворення органічних відходів на стабільний, насичений поживними речовинами продукт, який може використовуватися як альтернатива хімічним добривам. Цей процес включає контрольоване розкладання органічних матеріалів за участі мікроорганізмів [17].

Мембранна фільтрація (англ. membrane filtration) – це процес, який використовує напівпроникні мембрани для розділення та відновлення залишкових поживних речовин (які не були засвоєні рослинами) з фільтрату [18].

Оцінка життєвого циклу (англ. Life Cycle Assessment) – це процес оцінки впливу продукту (або його функцій) на навколишнє середовище протягом усього періоду його життя, включно із: (1) визначенням та кількісною оцінкою екологічних навантажень, зокрема, енергії та сировини, які споживаються, а також викидів і відходів, що утворюються; (2) оцінкою потенційних екологічних наслідків цих навантажень; (3) аналізом можливих варіантів зменшення екологічного впливу [19].

Парниковий газ (англ. greenhouse gas) – газ, який затримує інфрачервоне випромінювання земної поверхні, що призводить до глобального потепління на планеті. До основних парникових газів відносяться – двоокис вуглецю (CO₂), метан (CH₄), закис азоту (N₂O), гідрофторовуглеці (ГФВ), перфторовуглеці (ПФВ), та гексафторид сірки (SF₆) [7].

Поживний розчин (англ. nutrient solution) – це розчин на водній основі який містить основні макро- та мікроелементи, необхідні для росту рослин. У

гідропоніці, він використовується замість ґрунту для забезпечення рослин необхідними поживними речовинами [20, 21].

Продовольчі милі (англ. food miles) – це відстань, яку проходить харчовий продукт від місця його виробництва до кінцевого споживача. Цей показник є одним із факторів оцінювання впливу харчових продуктів на довкілля, наприклад, їхнього вуглецевого сліду [22].

Рециркуляція фільтрату (англ. leachate recirculation) – процес збору та повторного використання стічного розчину (фільтрату) із систем вирощування рослин. Такий фільтрат містить частину попередньо не засвоєних рослинами елементів, які можна рециркулювати для зменшення відходів та підвищення ефективності використання поживних речовин [23].

Струвіт (англ. struvite) – кристалічний мінерал, хімічно відомий як фосфат магнію амонію ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), який можна отримувати зі стічних вод і використовувати як альтернативне добриво на основі фосфору (P) та азоту (N) [24].

Фільтрат (англ. leachate, runoff) – це стічний поживний розчин, який проходить через субстрат для вирощування рослини та потрапляє у дренаж або використовується для рециркуляції [25].

Хімічне осадження (англ. chemical precipitation) – це метод відновлення залишкових поживних речовин, таких як фосфор і азот, які не були засвоєні рослинами, із фільтрату шляхом утворення твердих осадів [18].

Циркулярна економіка (англ. Circular Economy) – модель економічного розвитку, що є альтернативною лінійній економіці, і яка передбачає відновлення, повторне використання, раціональне споживання ресурсів, що спрямована, насамперед, на збереження енергії, економічно чисте виробництво та раціональне споживання ресурсів [26, 27].

Площа вирощування – сумарна корисна площа усіх поверхонь багатоярусного культивацийного обладнання, призначена безпосередньо для розміщення рослин у процесі їх вирощування. Для багатоярусних стелажних систем розраховується як добуток площі одного ярусу на їх кількість в модулі.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CEA – землеробство у контрольованому середовищі

CO₂ – вуглекислий газ (двоокис вуглецю)

CO₂-екв (англ. CO₂-eq) – еквівалент двоокису вуглецю

GHG – викиди парникових газів

LCA – оцінка життєвого циклу

Ca – кальцій (англ. calcium)

K – калій (англ. potassium)

Mg – магній (англ. magnesium)

N – азот (англ. nitrogen)

P – фосфор (англ. phosphorus)

S – сульфур (англ. sulfur)

ВФ – вертикальна ферма (вертикальне рослинницьке господарство)

Гол.Вир. – основне приміщення для вирощування рослин, де розміщується культиваційне обладнання

Пророщ. – зона з приміщеннями для пророщування та підготовки насіння/розсади.

Упр.Вир. – зона з приміщеннями для управління ресурсами та системами вирощування (поживні речовини, вода, CO₂)

Пост-об. – зона з приміщеннями для пост-обробки врожаю (сортування, миття, пакування).

Збер.прод. – зона з приміщеннями для зберігання готової продукції.

Тех.-інж. – техніко-інженерні приміщення для розміщення обладнання.

Сан.-поб. – санітарно-побутові приміщення для обслуговування будівлі.

Перс. – адміністративні приміщення та зони для персоналу.

Звз. – вертикальні та горизонтальні комунікаційні зв'язки (коридори, сходові клітини, ліфтові холи).

ФЕП – фотоелектричні панелі

ВСТУП

В епоху швидких глобальних змін та зростаючого тиску на сільськогосподарські системи, інновації в рослинництві набувають першочергового значення для забезпечення сталого виробництва продовольства для нинішнього та майбутніх поколінь. Серед подібних інновацій вертикальне господарство привертає все більшу увагу, особливо у вирішенні проблем продовольчої безпеки, зростання населення, урбанізації, зміни клімату та дефіциту копалин.

В даному контексті, значення вертикальних ферм полягає у їх здатності максимізувати продуктивність і стійкість при мінімізації використання земельних, водних та мінеральних ресурсів. Досягнення таких переваг можливе завдяки використанню точних систем для контролю середовища (клімат контролю, освітленість) та технік безґрунтового вирощування – гідропоніки чи аеропоніки.

Проте, в сучасній літературі концепція вертикального господарства має багато синонімів і варіацій трактувань (додаток А). Тож, для точної співвідносності напрямку роботи, запропоновано удосконалене визначення, а саме: *вертикальне рослинницьке господарство або вертикальна ферма (ВФ)* – це інтегроване в будівлю рослинницьке підприємство, яке використовує технології контрольованого середовища та безґрунтові методи для вирощування рослин у вертикальних багатоярусних системах.

Перш за все, актуальність таких рослинницьких господарств є особливо значною при розгляді одного з найважливіших глобальних викликів сучасності: швидкого зростання населення, яке тісно переплітається з ущільненням міських систем і концентрацією основних соціальних центрів в мегаполісах.

Згідно з даними Організації Об'єднаних Націй, до 2050 року населення світу сягне 9,7 мільярдів, до того ж, майже 7 млрд людей, як очікується, проживатимуть у містах [28, 29]. Такий демографічний зсув вимагає сталого та швидкого виробництва харчового продовольства. Крім того, дана проблема ще більше ускладнюється наслідками зміни клімату та чутливими екологічними проблемами. Без сумніву, ці аспекти суттєво впливають на традиційні сільськогосподарські

практики, підкреслюючи нагальну потребу в інноваційних та ресурсозберігаючих рішеннях, які мають змогу ефективно забезпечувати сучасні потреби.

В Україні, на додаток до окреслених аспектів, породжуються нові фактори спричинені повномасштабною російською агресією, що призводить до руйнівних наслідків для сільського господарства. Це включає понад 5 мільйонів гектарів [30] непридатних для використання сільськогосподарських земель через наземні міни та інші хімічні чи механічні забруднення, пов'язані з війною. Очікується, що розмінування території та відновлення довоєнного сільськогосподарського виробництва а таких регіонах займе щонайменше десятиліття [31]. Питання безпеки також постає все більш актуальним, оскільки протягом перших двох років повномасштабного вторгнення було поранено чи вбито понад 100 сільськогосподарських співробітників разом із знищеними мільйонами одиницями харчової продукції [32].

Традиційне сільське господарство має суттєві недоліки, які не дозволяють йому ефективно вирішувати всі вищезазначені проблеми. Серед цих вад – потреба у великих площах для вирощування у відкритому незахищеному полі, що не лише спричиняє безпекові та екологічні наслідки, але й переміщує фермерство за межі міста та ускладнює доставку продукції. Крім того, такий підхід до рослинництва залежить від значної кількості добрив, води, пестицидів та сільськогосподарської техніки, а також істотно піддається впливу кліматичних, біологічних та інших зовнішніх факторів. Таким чином, ґрунто-орієнтоване сільське господарство потребуватиме вагомих додаткових площ та ресурсів для задоволення нагальних світових та національних потреб, що спричинить ланцюгову реакцію з далекосяжними економічними та екологічними наслідками.

На противагу, вертикальне фермерство є передовим технологічним рішенням, яке може забезпечити ефективність агропромислового виробництва та має потенціал вирішення продовольчих проблем сьогодення й майбутнього. Цей інноваційний метод не залежить від зовнішніх умов і факторів, оскільки характеризується безґрунтовим вирощуванням у захищеному середовищі. Він прискорює дозрівання врожаю, споживаючи при цьому на 90% менше води, на 40%

менше добрив і повністю усуваючи потребу в пестицидах [7-8]. ВФ використовують внутрішній вертикальний простір та штучні умови, що дозволяє розміщувати їх не тільки в будівлях, але й підвальних приміщеннях. Таким чином, такий підхід може забезпечити підвищену безпеку та безперешкодну інтеграцію в міське середовище, в безпосередній близькості до споживачів.

Проте, не зважаючи на те, що потенціал даного підходу є надзвичайно перспективним, його ефективне практичне застосування обмежене кількома недостачами. Ці недоліки, які включають питання сталого розвитку, економічну доцільність, відсутність комплексних проєктних рекомендацій та будівельних норм, підкреслюють складність реалізації таких об'єктів, як відповіді на попередньо визначені глобальні проблеми.

Такі проблеми, перш за все, потребують теоретичних напрацювань, проте, аналіз сучасних літературних досліджень виявив диференційовану дослідницьку увагу до вказаної проблематики. Роботи фундаментального напрямку щодо архітектурного проєктування вертикальних ферм обмежуються дослідниками Деспом'є Д. [34–37] та Козаї Т. [33, 38–40]. В Україні даний напрямок є ще більш недослідженим. Загально чи системно вертикальні господарства ще не розглядалися вченими, хоча в дисертації Бордун М. представлено комплексне дослідження з енергоефективного будівництва об'єктів закритого ґрунту (теплиць) [41]. Аналіз конкретних прикладів, окремі архітектурні аспекти, проєктні пропозиції або загальні питання щодо формування ВФ розглядалися в роботах таких вітчизняних дослідників, як Кравченко І., Щурова В., Самойлович В., Праслова В., Рябець Ю., Зінов'єва О., Гарбар М., Павленко Т., Івасенко В., Добровенко Д., та Савченко О. [42–49].

Серед базових робіт архітектурної організації промислових підприємств варто виділити Гетун Г., Житкової Н., Беломесяцева А., Терзян І., Кінг Ч., Аккерман К., Адам Ю., Гаузман К., Сайзорн Н. та Пікард К. [50–59]. Серед напрацювань щодо фундаментальних основ архітектурного та системного розвитку основоположні для даної роботи є від вчених Дорохіної Г., Яблонської Г.,

Беломєсяцева А., Кристалера В., Лаврика Г., Біра С., Крістофера М., Харріса К., та Ульмана Е. [59–65].

Окрім цього, нормативно-методологічне забезпечення таких будівель також потребує розробки спеціалізованих галузевих напрацювань. Наразі проектування подібних споруд підпорядковується ДБН В.2.2-2:2024 «Теплиці і парники», хоча цей документ не передбачає та не визначає вертикальні ферми як окремий тип агро-промислових споруд, які є більш комплексними за своєю архітектурно-функціональною складовою порівняно з одноповерховими теплицями та парниками [66].

Водночас, розміщення вертикальних господарств, їх окремі компоненти та складові повинні відповідати вимогам інших нормативних актів, зокрема ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій», ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди адміністративно-побутового призначення», ДБН В.2.2-7-98 «Будівлі і споруди для зберігання мінеральних добрив та засобів захисту рослин», ДБН В.2.2-43:2021 «Складські будівлі» та ДБН В.2.2-42:2021 «Споруди холодильників».

Враховуючи вищезазначене, актуальною є потреба розробки теоретичних напрацювань і практичних рекомендацій з архітектурного проектування вертикальних рослинницьких господарств, що враховують багатогранні технологічні, містобудівні та просторово-планувальні особливості такого типу підприємств, одночасно забезпечуючи їх стійкість, енергоефективність та цілісний архітектурний розвиток.

ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ. Дослідження виконується відповідно до законодавчих актів України, зокрема розділу IV та розділу XII Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 року, ВР України, Закону "Про охорону земель" від 19 червня 2003 року, проекту Закону України "Про збереження ґрунтів та охорону їх родючості" та Закону України «Про державний контроль за використанням та охороною земель» від 28 грудня 2015 року. Також робота узгоджується із такими державними програмними документами: Розпорядження № 932-р «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни

клімату на період до 2030 року» від 7 грудня 2016 р., Розпорядження № 820-р «Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» від 8 листопада 2017 р., Розпорядження № 117-р «Про затвердження Національного плану управління відходами до 2030 року» від 20 лютого 2019 р., Закон № 2697-VIII «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28 лютого 2019 р. та із програмними документами на виконання Паризької угоди, зокрема «Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 р.» від 18 липня 2018 р.

Дисертація відповідає одному із пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки – «раціональне природокористування» визначеного Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 (із змінами № 3534-IX від 21.12.2023) та стратегічним цілям розвитку сільського господарства, встановленим у Розпорядженні КМУ «Про схвалення Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій в Україні на період до 2030 року» від 15 листопада 2024 р.

Окрім цього, дане дослідження пов'язане із тематикою науково-дослідної роботи кафедри Теорії архітектури і архітектурного проектування КНУБА: «Теоретичні основи цивільної і промислової архітектури» №0123U100260.

В Університеті Віка – Центральному університеті Каталонії робота виконується відповідно до наступних напрямків дослідження Технологічного центру «ВЕТА»: №1 «Екологічні технології та циркулярна біоекономіка» (Environmental Technologies & Circular Bioeconomy) та №3 «Стійкі системи харчування та сільського господарства» (Sustainable Food & Farming Systems).

Розробка даної роботи також виконується в рамках договору про співпрацю щодо спільного кураторства над докторською дисертацією між Технологічним центром «ВЕТА» Університету Віка – Центрального університету Каталонії (UVic-UCC), Вік, Іспанія, та кафедрою Теорії архітектури і архітектурного проектування КНУБА, Київ, Україна, підписаним у Віку, Іспанія, 7-го червня 2022-го року. Офіційні наукові керівники КНУБА: кандидат архітектури, доц. Дорохіна Ганна, доктор філософії Хорхе Сенан Салінас. Офіційні наукові керівники UVic-UCC:

доктор філософії Хорхе Сенан Салінас, доктор філософії Мабель Мора Гаррідо, кандидат архітектури Дорохіна Ганна; тимчасовий науковий керівник (до 2024р.): доктор філософії Лідія Паредес Барро.

МЕТА роботи полягає в розробці комплексної системи містобудівних, архітектурних, об'ємно-планувальних та функціонально-технологічних рішень для вертикальних рослинних господарств, що забезпечить їх довгострокову життєздатність, економічну доцільність та еко-стійкість.

Враховуючи вищезазначені аспекти, для досягнення мети необхідно вирішити наступні ЗАДАЧІ:

- проаналізувати теоретико-методологічні передумови та практичний розвиток вертикальних ферм і встановити фактори впливу на їх формування та класифікаційну модель таких господарств;

- виявити основні положення та підходи щодо ефективного формування даних об'єктів і запропонувати фундаментальні принципи їх проектування;

- окреслити систему сталої організації таких підприємств, зосереджену на оптимізації процесів виробництва, встановлюючи зв'язки з відповідними архітектурними особливостями;

- створити багатовимірну модель якісних та кількісних рішень на трьох ієрархічних рівнях: місто, об'єкт та простір.

Відповідно, ОБ'ЄКТОМ дисертаційного дослідження є *вертикальні рослинницькі господарства*, а ПРЕДМЕТОМ – архітектурно-планувальна організація вертикальних рослинницьких господарств.

МЕТОДИ дослідження включають: (i) системно-аналітичний аналіз глобальних агро-тенденції та існуючого проєктного досвіду вертикального фермерства; (ii) використання проблемно-орієнтованого наукового методу для визначення підходу щодо вирішення поставлених проблем; (iii) систематичний порівняльний аналіз літератури із інтегральною оцінкою для встановлення принципів еко-стійких прийомів оптимізації системи; (iv) застосування методів експериментального моделювання та проєктування разом із елементами

систематично-порівняльного та структурно-функціонального аналізів для розробки містобудівних, функціонально-планувальних і просторових рішень.

МЕЖІ роботи визначаються трьома ключовими аспектами: міським розташуванням, інтегрованою в будівлю структурою та спеціалізацією на вирощуванні рослин. Варто зазначити, що першочерговий аналіз охоплюватиме широкий спектр розташування, архітектурно-конструктивних типів та виробничих параметрів об'єктів вертикального фермерства, щоб забезпечити всебічний огляд предмета дослідження. Однак основні напрацювання будуть зосереджені на розробці містобудівних та об'ємно-просторових рішень для міських ферм, що спеціалізуються на виробництві фруктів та овочів (переважно з акцентом на зелені). Отже, не розглядаються такі об'єкти, як теплиці або парники, об'єкти розташовані на сільських та позаміських територіях, а також підприємства, призначені для не рослинницького або комбінованого вирощування грибів, аквакультури або комах.

НАУКОВА НОВИЗНА одержаних результатів полягає у наступному:

Уперше:

- досліджено універсальні архітектурні принципи проєктування, що забезпечують економічну ефективність, стійкість та цілісність будівель вертикальних ферм;

- розроблено систему імплементації еко-сталих містобудівних, функціонально-планувальних, просторових та технологічних прийомів для оптимізації споживання ресурсів виробництва та енергоефективності системи на основні циркулярних стратегій;

- структуровано за трьома ієрархічними рівнями (міським, об'єктним та просторовим) основні рекомендації щодо проєктування будівель вертикальних рослинницьких господарств з урахуванням особливостей таких агропідприємств;

- запропоновано багаторівневу структурно-графічну модель організації міської мережі вертикальних ферм, що адаптована до різних груп населених пунктів;

- визначено функціонально-типологічну номенклатуру вертикальних господарств та прийоми організації їх планувальної структури;

- надано кількісні методи розрахунку просторових параметрів будівель вертикальних рослинницьких підприємств.

Удосконалено:

- визначення поняття «вертикальних рослинницьких господарств»;
- теоретичну базу щодо факторів, що впливають на формування агропромислових вертикальних комплексів.

Отримали подальший розвиток:

- класифікація вертикальних ферм з урахуванням їх архітектурних, функціональних, структурних та технологічних особливостей.

ПРАКТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ одержаних результатів полягає у: встановленні практичних прийомів щодо підвищення економічної та екологічної стійкості будівлі відповідно до функціонально-операційних особливостей вертикальної ферми; розробці архітектурно-планувальної структури вертикальних рослинницьких господарств на трьох ієрархічних рівнях: містобудівному, об'єктному та просторовому; створенні засад до розробки національних та міжнародних будівельних норм і стандартів для вертикальних агропідприємств, що включають як кількісні, так і якісні критерії для містобудівного, архітектурного та технологічного планування.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК ЗДОБУВАЧА. Усі результати дисертаційного дослідження, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Підготовку та друк двох публікацій [67, 68] здійснено у співавторстві із науковим керівником – кандидатом архітектури, доцентом Ганною Дорохіною. В опублікованих у співавторстві статтях, автору належить збір, аналіз та обробка інформації [67, 68], а також участь у формулюванні основних висновків щодо принципів і прийомів економічно ефективного архітектурного проектування вертикальних ферм [67] та принципів і прийомів створення цілісної та гармонійної архітектури вертикальних ферм [68].

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ здійснена у виступах та публікаціях тез на 3-й міжнародній науковій конференції, 13-й всеукраїнській науковій конференції, 3-й міжнародній науково-практичній конференції та на 2-й і 3-й науково-практичних

конференціях в КНУБА, а також на 3-й міжнародній науково-практичній конференції в НАОМА й на 24-му міжнародному науково-практичному та студентському форумах в ЛНУП у 2021-2024 рр. Також результати роботи було апробовано під час участі та виступу на міжнародних аспірантських конкурсах на 7-му «UKRAINE Network PhD Thesis Presentation Contest» у німецькому Університеті Ессена та на 7-му каталонському змаганні «Your thesis in 4 minutes» в університеті Віка.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ. Результати дисертаційного дослідження опубліковані у 14 наукових працях: у фахових наукових виданнях України – 3 статті; 8 тез доповідей наукових конференцій; та 3 доповіді на конференціях, які додатково відображають наукові результати дисертації.

СТРУКТУРА роботи складається із анотації, списку публікацій, термінологічного словника, вступу, чотирьох розділів із висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Результати дослідження викладені на 296 сторінках, включаючи основну текстову частину дисертації зі 142 сторінок, 39 сторінки ілюстрацій (47 рисунка, 5 таблиць, 11 формул), 29 сторінок списку використаних джерел (302 найменувань), а також додатки на 66 сторінках, з них 5 сторінок акти впровадження результатів дисертації.

РОЗДІЛ І

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ АРХІТЕКТУРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ АГРОПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Сучасні тенденції розвитку рослинницьких ферм та архітектурні наукові дослідження в контексті сталого розвитку

Стрімкі демографічні зміни в сучасному світі зумовлюють зростання актуальності забезпечення продовольчої безпеки. За прогнозами Організації Об'єднаних Націй, чисельність населення планети досягне 8,5 мільярдів у 2030 році, 9,7 мільярдів у 2050 році і 10,4 мільярдів до 2100 року [29, 69]. Це демографічне зростання створює значний тиск на аграрні системи, які повинні не лише задовольняти зростаючий попит, але й функціонувати у сталий спосіб. Відповідно, сучасне землеробство стикається з низкою викликів, таких як зміна клімату, значні викиди парникових газів, деградація ґрунтів і виснаження викопних ресурсів, що ускладнює його стійкий розвиток.

Зокрема, зі зростанням населення необхідність збільшення продовольчого виробництва стає нагальною, що створює додаткове навантаження на сільськогосподарські системи. Прогнози свідчать, що глобальний попит на виробництво продуктів харчування до 2050 року зросте на 30–62% залежно від впливу зміни клімату [70].

Як наслідок, задоволення таких значних потреб вимагатиме інтенсифікації сільськогосподарських практик. Проте, традиційні методи землеробства не здатні повною мірою задовольнити зростаючий попит через їх залежність від зовнішніх факторів, низьку продуктивність та обмежену ефективність використання ресурсів [71–73]. Як наслідок, ущільнення подібного виробництва призведе до численних негативних наслідків таких, як високі викиди парникових газів, що сприяють підвищенню глобальної температури, деградація сільськогосподарських земель, надмірне споживання води та виснаження інших природних ресурсів.

Перш за все, можливість розширення площ для подальшого виробництва продовольства залишається обмеженою. Наразі людство використовує 44% (48 млн км²) територій, придатних для сільськогосподарського використання [74]. Проте, внаслідок інтенсивної сільськогосподарської діяльності, яка прискорює ерозію та виснаження поживних речовин, вже близько 40% угідь перебувають у деградованому стані [75], що призводить поступового занедбання даних територій [76] і, як наслідок, потенційно спричиняючи падіння виробництва продуктів харчування в довгостроковому розвитку [77].

Земельні ресурси не єдиний дефіцитний компонент сільськогосподарських практик, адже нераціональне використання водних ресурсів є ще однією ключовою екологічною загрозою в даному контексті. Незважаючи на те, що вода займає близько 71% поверхні Землі, лише 3% цих запасів є придатними для використання у господарській діяльності або споживання людиною [78]. Проте, неефективні методи зрошення та інші недосконалі практики призводять до значних втрат прісної води, що зменшує її доступність для таких критично важливих сфер, як питне водопостачання та створює додатковий екологічний тиск [78].

Крім того, традиційні методи вирощування передбачають використання синтетичних добрив та пестицидів, які не тільки додатково сприяють деградації ґрунтів та забрудненню води, а й також зменшують біорізноманіття і створюють загрозу для здоров'я людини. Зокрема, пестициди можуть провокувати широкий спектр токсичних ефектів, серед яких нейротоксичність, мутагенність, канцерогенність, тератогенність та порушення ендокринної системи [77, 267]. Дані хімічні речовини також виявляють токсичний вплив на інші біологічні види, включаючи птахів, риб, корисних комах та нецільові рослини спричиняючи зниження рівня біорізноманіття, порушення природного балансу та посилення забруднення довкілля.

Важливо також враховувати високу залежність традиційного землеробства від кліматичних умов, природних катастроф та біологічних шкідників, які не лише обмежують різноманітність сільськогосподарських культур, але й суттєво впливають на якість та обсяги врожаю. Глобальна зміна клімату, зокрема

підвищення температур, зміни режиму опадів та частіші екстремальні погодні явища, ще більше загострюють ці проблеми, ускладнюючи адаптацію господарств відкритого ґрунту до нових швидкозмінних умов [71, 72].

Водночас аграрні практики самі є джерелом значних викидів парникових газів і забруднення через вирубку лісів, використання синтетичних добрив і важкої сільськогосподарської техніки. У свою чергу, це підвищує глобальну температуру Землі, створюючи циклічний процес взаємного негативного впливу між сільським господарством та кліматичними змінами [81].

Тож, враховуючи окреслені проблеми, основним завданням сучасного сільського господарства є забезпечення збалансованого виробництва продуктів харчування із застосуванням сталих практик, які мінімізують виснаження природних ресурсів і сприяють збереженню здоров'я людини та екологічного балансу планети. Відповідно, у цьому контексті розвиток вертикальних ферм стає ключовим напрямом пошуку як оперативних, так і стратегічних рішень.

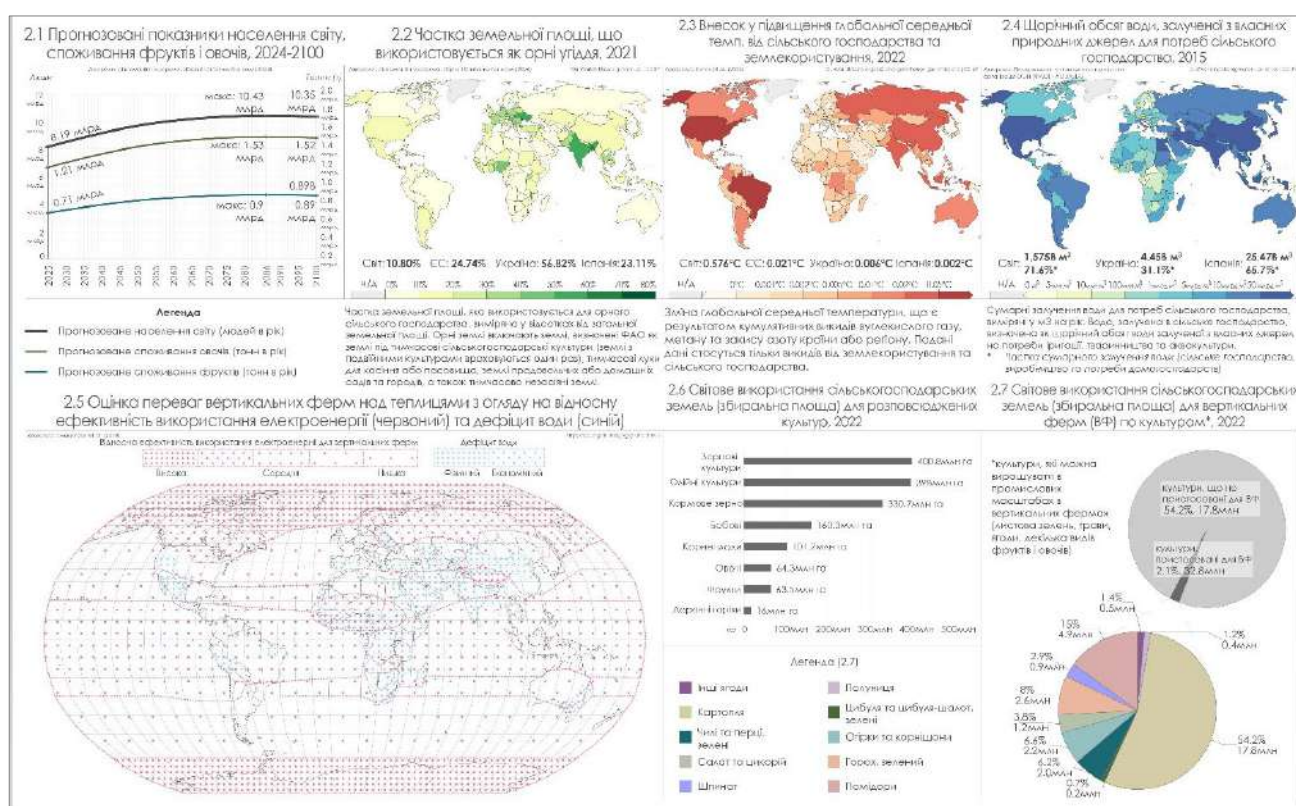


Рис. 1.1.1 Сучасний стан сільськогосподарських систем в контексті сталого розвитку

Даний підхід до рослинництва може забезпечити відповідність визначеному завданню сучасних агро-систем завдяки його основним перевагам: висока продуктивність [82, 83], захищеність і закритість процесу вирощування, відсутність необхідності у використанні ґрунту чи пестицидів [84], ефективне використання води та добрив [85], а також можливість точного контролю умов культивування. Як наслідок, забезпечують суттєве підвищення врожайності та стабільності виробництва, одночасно знижуючи витрати необхідних ресурсів та усуваючи потребу у застосуванні агрохімікатів. З огляду на це, вертикальні агро-промислові комплекси здатні задовольняти сучасні потреби, а в довгостроковій перспективі можуть слугувати повноцінною альтернативою або значним доповненням до традиційного ґрунтового сільського господарства.

На додаток, ВФ пропонують не лише значні екологічні й економічні переваги, але й формуються як перспективний підхід до вирішення проблем прогресуючої урбанізації [28, 29]. Інтеграція рослинницьких підприємств у міський простір сприяє створенню симбіотичних взаємодій між агровиробництвом і міськими екосистемами, що забезпечує багатофункціональні вигоди для місцевих громад.

Зокрема, локалізація таких господарств значно скорочує транспортну відстань, яку продукти харчування долають від місця вирощування до споживача [82]. Зменшення продовольчих миль безпосередньо знижує обсяги викидів парникових газів, пов'язаних із перевезенням продуктів харчування [86]. В свою чергу, таке зниження вуглецевого сліду відповідає сучасним міжнародним ініціативам щодо нівелювання негативного впливу на довкілля та сприяє зміцненню екологічної стійкості міських продовольчих систем.

Більше того, локалізація виробництва продуктів харчування через вертикальні агро-комплекси створює низку економічних та соціальних переваг. Завдяки скороченню витрат на транспортування та доставку, а також стабільності врожаїв, такі господарства сприяють зниженню й стабілізації цін на продукцію, забезпечуючи ширший доступ до свіжого харчового постачання. Близькість виробництва до споживачів дозволяє постачати якісні сільськогосподарські товари,

зберігаючи їх високу поживну цінність та мінімізуючи втрати – проблеми, які зазвичай виникають під час транспортування на далекі відстані або під час тривалого зберігання. Окрім цього, розташування ферм у межах міських ландшафтів також сприяє створенню нових робочих місць, що диверсифікує структуру міської економіки.

Проте, перехід до вертикального фермерства є комплексним і довготривалим процесом, що потребує теоретичного та практичного доопрацювання. Цей підхід, хоча й має значний потенціал, стикається з низкою обмежень, пов'язаних як і із загальною специфікою даної технології, так і зі станом відповідних архітектурних напрацювань та методологічного забезпечення будівель таких агро-систем.

Першочерговими проблемами є високі капітальні витрати. Наприклад, будівництво вертикальних ферм коштує від 1000 до 4000 євро/м², що суттєво перевищує вартість спорудження теплиць (100–300 євро/м²) та угідь відкритого ґрунту (0,5–50 євро/м²) [87]. Ця різниця пояснюється складними технологіями та інфраструктурою, необхідними для контрольованого безґрунтового вирощування, а також самим процесом спорудження і проектними роботами.

На етапі експлуатації вертикальні господарства стикаються з додатковими економічними викликами у сфері енергоспоживання [88]. Зокрема, значна частка операційних затрат припадає на освітлення та клімат-контроль – в середньому 40% та 38% відповідно [85, 89–91]. В свою чергу, це також спричиняє значні викиди парникових газів та виснаження природних систем, пов'язаних із використанням викопних ресурсів на забезпечення подібних енергетичних проблем [92].

Узагальнене порівняння виробництва продукції вертикального фермерства з технологіями теплиць та відкритого ґрунту представлено у табл. 1.1.1.

Вищезгадані недоліки демонструють екологічні та економічні проблеми, пов'язані з проектування та будівництвом споруд агро-підприємств. Хоча впровадження таких об'єктів має потенціал зменшити негативний вплив на довкілля завдяки раціональному землекористуванню, економії води та нівелювання потреби в пестицидах, висока залежність від електроенергії та

комплексних технологічних і будівельних систем значно ускладнює реалізацію цих переваг.

Таблиця 1.1.1

Порівняння вертикальних ферм з теплицями та фермами відкритого ґрунту

		ВЕРТИКАЛЬНІ ФЕРМИ	ТЕПЛИЦІ	ФЕРМЕРСТВО НА ВІДКРИТОМУ ҐРУНТІ
ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ	Земля	365 днів	275-365 днів	< 275 днів
	Субстрат для вирощування	Субстрат на органічній основі Поживний субстрат на водній основі	Відкритий ґрунт Субстрат на органічній основі	Відкритий ґрунт
	Вода*	1-20 л/кг	10-250 л/кг	250 л/кг
	Електроенергія*	8-40 кВт-год/кг	0,7-20 кВт-год/кг	0,02-4 кВт-год/кг
	Добрива*	8 кг/тонна	8-36 кг/тонна	36 кг/тонна
	Пестициди*	0 кг/тонна	0,06-0,14 кг/тонна	0,2-0,4 кг/тонна
ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	Частка втрати продукції перед збором врожаю	5-10%	5-20%	40-50%
	Вегетаційний період*	30-35 днів	40-50 днів	70 днів
	Збирання урожаю*	8-12 разів/рік	6-7 разів/рік	1-3 разів/рік
	Щільність посіву*	250-300 культур/м ²	25 культур/м ²	18 культур/м ²
	Врожайність*	100 кг/м ² /рік	40 кг/м ² /рік	4 кг/м ² /рік
	Різноманітність культур	Обмежена	Широка, але залежить від розташування	Широка, але залежить від розташування
	Розташування	В міському середовищі Будь-яке інше розташування	В передміському середовищі В сільській місцевості	В сільській місцевості Відкрите поле з родючим ґрунтом
	Капітальні вкладення	1 000-4 000 євро/м ²	100-300 євро/м ²	0,5-50 євро/м ²
СТАЛІЙ РОЗВИТОК	Викиди, вирощування*	10-25 CO ₂ -екв/кг	0,2-3,2 CO ₂ -екв/кг	0,01-0,4 CO ₂ -екв/кг
	Викиди, продовольчі милі**	в середньому 5 кг CO ₂ -екв	в середньому 126 кг CO ₂ -екв	в середньому 315 кг CO ₂ -екв
	Продовольчі милі	50 км	1 200 км	3 000 км

*Вирощування салату **Автомобільна доставка

Відповідно, трансформація та подальший стійкий розвиток вертикальних господарств породжують необхідність комплексного методологічного супроводження, що охоплює міждисциплінарні аспекти урбаністики, архітектури, інженерії та сільськогосподарських наук. Визначальними пріоритетами розвитку постають забезпечення енергоефективності, мінімізація екологічного навантаження та забезпечення сталого функціонування таких об'єктів у міському середовищі. В свою чергу, реалізація даних аспектів потребує розробки фундаментальних теоретичних та практичних досліджень щодо цілісної та гармонійної інтеграції ферм у містобудівну структур, оптимізації функціонально-планувальних рішень та їх просторової організації.

Проте, критичною науковою проблемою залишається відсутність уніфікованої методологічної бази та комплексних архітектурно-будівельних стандартів для проектування вертикальних ферм. Наявний науковий дискурс характеризується фрагментарністю досліджень, обмеженістю емпіричних напрацювань та браком системних підходів до архітектурно-планувальної організації таких комплексів. Зокрема, потребують ґрунтовного наукового опрацювання питання нормативного регулювання, типологізації архітектурних рішень, оцінки еколого-економічної ефективності будівлі та розробки методик інтеграції вертикальних ферм у різні містобудівні контексти.

Даний недолік головним чином можна віднести до причини відносної новизни галузі. Так, успішні комерційні гідропонні системи з'явилися лише у 1930-х роках, тоді як сучасні теплиці розвиваються з 1800-х років, а традиційне сільське господарство існує протягом тисячоліть [93, 94]. Водночас теоретичні основи вертикальних ферм почали активно розроблятися лише з 2013 року. За даними наукометричних баз Web of Science® та Scopus®, кількість публікацій із цієї тематики зростає з 5 у 2013 році до 763 протягом наступного десятиліття, серед яких лише 1% є за архітектурним напрямком.

Зокрема, аналіз відповідних напрацювань свідчить про різний ступінь уваги проблематик вертикальних рослинницьких господарств. Питання сталого розвитку відносно широко досліджувалось, і численні публікації зосереджені на впливі на навколишнє середовище та екологічному порівнянні зі традиційним сільським господарством [85, 95–105]. У кількох дослідженнях вивчалися конкретні заходи щодо покращення еко-сталості за допомогою циркулярних стратегій щодо використання енергії, поживних речовин, води та вуглекислого газу необхідних для вирощування рослин [92, 106–111]. Однак єдиної системи для оцінки та адаптації цих підходів до архітектурного середовища будівель вертикальних ферм досі не існує.

Дослідження, що стосуються техніко-економічного обґрунтування даних будівель, в основному зосереджені на загальній економіці та технологічній оптимізації, особливо в таких сферах, як ефективність світлодіодного освітлення та

підвищення фізіологічної продуктивності рослин [111–118]. З архітектурної точки зору, деякі роботи вивчали ефективні огороджувальні конструкції та специфічні проєктні міркування щодо енергозбереження [119–121]. Проте, комплексних об'ємно-планувальних та конструктивних рішень для підвищення економічної та енергетичної ефективності наразі не знайдено.

Сфера містобудування та архітектурного проєктування представляє собою найбільш значну прогалину в цій галузі. Важливо відзначити, що в ряді публікацій згадуються загальні особливості, які потрібно враховувати щодо розміщення таких об'єктів, а також різні переваги міських ВФ [84, 98, 109, 122–127]. Однак, комплексна теоретична модель для урбан-інтеграції залишається нерозробленою, за винятком одного напрацювання, яка пропонує подібний підхід щодо визначення доцільності інтеграції вертикальних господарств в структуру існуючих будівель, зокрема на дахах різних житлових та громадських споруд міста [128].

Фундаментальна архітектурна перспектива залишається недостатньо вивченою оскільки існуюча література обмежується аналізом конкретних прикладів або специфічними проєктними пропозиціями, включно щодо інтеграції систем вертикального фермерства у фасадні системи, житлові та громадські будівлі [98, 120, 125, 129–136].

Роботи ж Д. Деспом'є [34–37], який створив сучасну архітектурну концепцію ВФ, та Т. Козаї, рис. 1.1.2 [33, 38–40] можуть вважатись основоположними дослідженнями, які надають загальні міркування щодо структури та влаштування таких підприємств. Зокрема, Діксон Деспом'є запропонував основи загальної функціональної структури будівлі та базові принципи і прийоми проєктування, які мають наслідувати архітектори. Серед таких засад – максимізація використання природного сонячного освітлення для росту рослин, пасивний дизайн – використання систем відновлювальної енергії та переробки відходів виробництва, а також орієнтація просторово-планувальних рішень на першочергову функцію будівлі, розширення простору для вирощування культур, захищеність рослин та забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов виробництва та загального функціонування споруди [34].

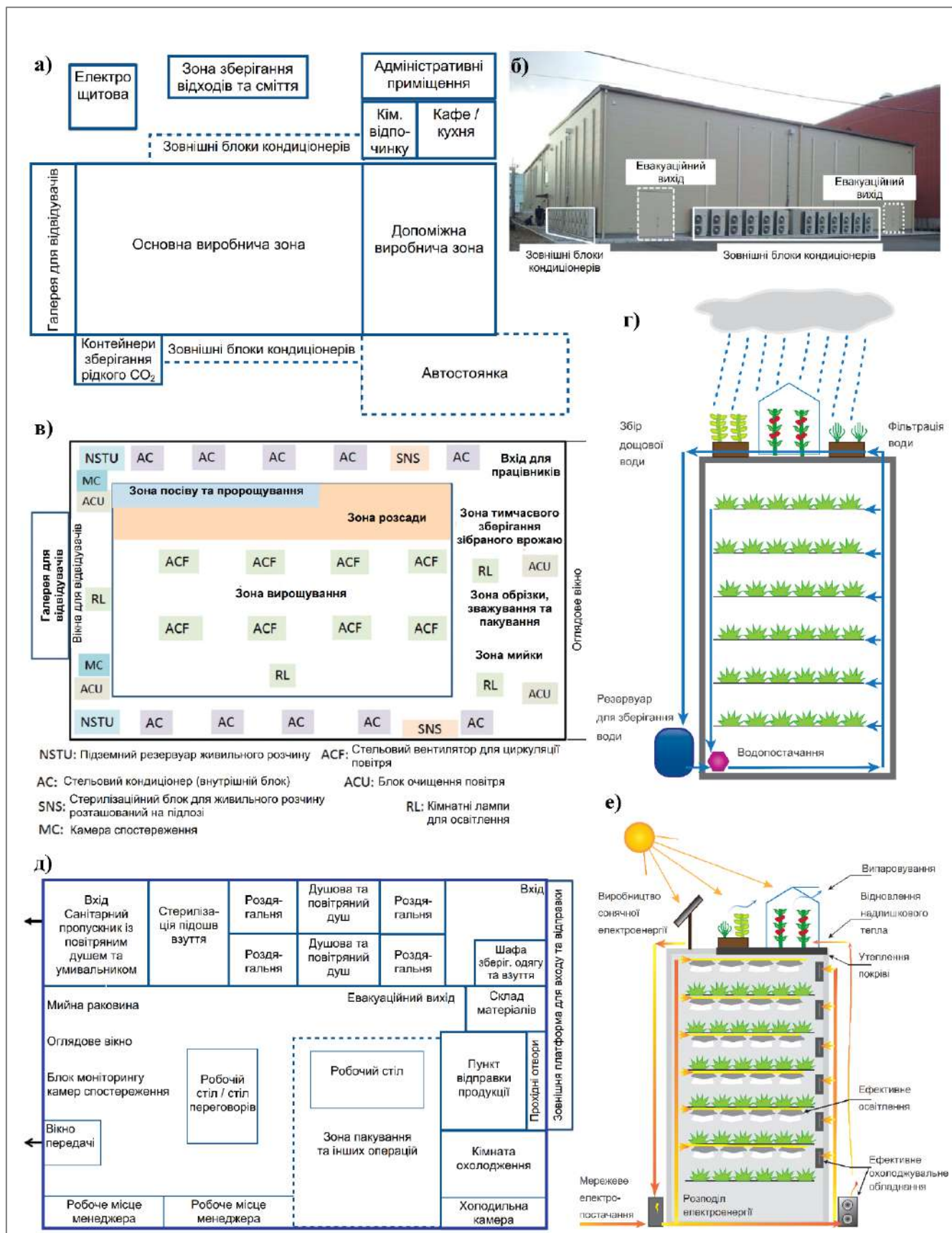


Рис. 1.1.2 Структура будівлі агро-підприємства за Т. Козаї [33]

В свою чергу, роботи Тойокі Козаї подальше заглиблюються в різноманітні аспекти організації вертикальних агро-підприємств. Його напрацювання включають аналіз сучасних прикладів різноманітних вертикальних ферм, включно з особливостями їх інтеграції із житловими, офісними та комерційними спорудами, а також технологічні і функціональні особливості структури таких будівель [33].

Зокрема, Козаї надав перелік основних компонентів вертикальної ферми, спрощені функціонально-планувальні рішення для основних та допоміжних виробничих зон таких підприємств (рис. 1.1.2, а-в, д), а також схеми імплементації фотоелектричних панелей і систем збору дощової води у будівлях рослинницьких ферм (рис. 1.1.2, г, е) та способи визначення доцільності застосування даних технологій для різних регіонів [33, 38–40].

Дані роботи хоч і містять напрацювання щодо певних аспектів архітектурного планування вертикальних господарств, все ж таки, бракують кількісно-визначених та комплексних практичних рекомендацій щодо містобудівних і об'ємно-просторових рішень, які б могли слугувати адаптивної основою для комплексної організації структури об'єктів такого типу.

Фундаментальні основи архітектурного планування таких споруд також обмежені відсутністю нормативно-правового забезпечення. Зокрема, в Україні існуючий дотичний ДБН В.2.2-2:2024 «Теплиці і парники» є недостатнім для комплексного регулювання будівництва та проектування вертикальних рослинницьких господарств. Окреслені в документі нормативи зосереджені на традиційних теплицях та парниках, які визначаються як «опалювальна (неопалювальна) одноповерхова будівля або її частина зі (знімними) світлопрозорими огорожувальними конструкціями...» [66].

Таким чином, це не лише обмежує використання об'ємно-просторових рішень та будівельних матеріалів, але й принципово відрізняється від визначення вертикальних рослинницьких господарств за планувальною, функціональною та технологічною організацією. Натомість, вертикальні агро-підприємства є складними інтегрованими структурами, що поєднують виробничі, санітарні, адміністративні та інфраструктурні приміщення в єдиному просторово-

технологічному комплексі. Це кардинально відрізняється від парникових чи тепличних угідь, де розташування подібних споруд не завжди необхідне або передбачається в межах території господарства, а не в самій будівлі.

Отже, розробка архітектурних напрацювань, орієнтованих на вирішення зазначених проблем вертикальних ферм, є критично необхідною для забезпечення довгострокової стійкої функціональності таких споруд. Відповідне архітектурне планування має охоплювати питання енергоефективності, раціонального використання ресурсів, інтеграції у міський простір та адаптації до середовищних і соціально-економічних умов місцезоташування. Це дозволить створити комплексні просторово-функціональні рішення, які сприятимуть ефективному впровадженню вертикальних агро-господарств для вирішення питань продовольчого забезпечення міських систем, зменшення негативного впливу сільського господарства на довкілля, забезпечення ресурсозбереження та підвищення надійності виробництва. Впровадження таких підходів не лише створить передумови для гармонійної інтеграції рослинницьких підприємств у сучасне містобудівне середовище, але й підсилить екологічну та економічну стійкість агросистем.

Зокрема, за підрахунками авторки, впровадження вертикальних ферм має значний ресурсозберігаючий потенціал для України та Іспанії щодо деяких культур (рис. 1.1.3), які є наразі комерційно доцільними для вертикальних ферм (салат, полуниця, помідори, огірки). З точки зору землекористування можливе скорочення потреби в угіддях до 99,7% при збереженні державних показників річних врожаїв даних рослин [137–140]. Подібні переваги також стосуються збереження національних запасів прісноводних ресурсів, що є особливо актуальним для регіонів із дефіцитом води. Відповідно, перенесення цих культур у виробництво всередині будівель вертикальних господарств потенційно дозволить зберегти 55-97% потреби у водопостачанні залежно від культури [85, 141–143].

Окрім цього, для України, розвиток та впровадження вертикальних ферм набуває особливої значущості у контексті триваючої повномасштабної війни та її руйнівного впливу на традиційні методи землеробства. Озброєний конфлікт

спричинив серйозні проблеми для сільського господарства, зокрема хімічне та механічне знищення земель, включно через встановлення протипіхотних та протитанкових мін російськими військами. Як наслідок, станом на 2020 рік в Україні було понад 5 мільйонів гектарів земель, непридатних для сільськогосподарського використання [30]. За оцінками, розмінування цих територій та відновлення аграрного виробництва, ймовірно, триватиме щонайменше десятиліття [30]

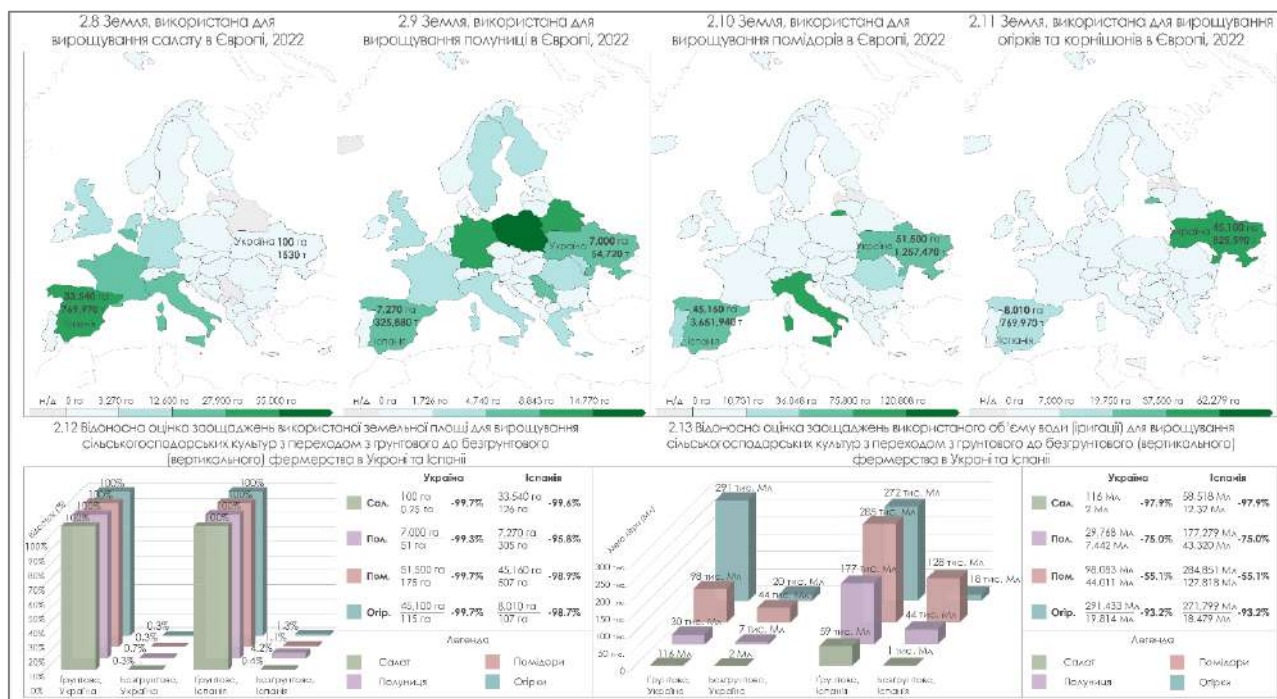


Рис. 1.1.3 Потенційні вигоди від економії ресурсів за рахунок переходу від ґрунтової до контрольованого рослинництва в Україні та Іспанії

Водночас російська агресія призвела до втрати понад 100 життів і численних поранень серед фермерів, а також до знищення мільйонів сільськогосподарських товарів [32]. Традиційне землеробство залишається вразливим перед загрозами, такими як ракетні обстріли та наземні міни. На відміну від цього, вертикальні ферми пропонують більш безпечні умови, зокрема можливість їх розміщення в захищеному середовищі, наприклад, в підземних приміщеннях. Таким чином, даний підхід не лише надає забезпечення продовольства, але й сприяє збереженню людських життів.

З огляду на масштабні втрати, яких зазнав аграрний сектор України через збройний конфлікт, впровадження технологій вертикального фермерства може суттєво сприяти його відродженню. Цей метод культивуації дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з конвенційним землеробством, зокрема залежність від погодних умов і загрозу пошкодження інфраструктури. Відповідно, використання вертикальних рослинницьких підприємств може забезпечити довгострокову стійкість та ефективність відновлення агроєкономіки України.

Підсумовуючи, вертикальні рослинницькі підприємства є перспективним рішенням для подолання багатогранних викликів сучасного сільського господарства, зокрема пом'якшення наслідків зміни клімату, зменшення споживання ресурсів, підвищення продовольчої безпеки та сталого розвитку міст.

Водночас цей підхід супроводжується певними проблемами, такими як високі капітальні витрати, значне енергоспоживання, великий вуглецевий слід та відсутність теоретичного та практичного забезпечення щодо архітектурного проектування таких будівель. Відповідно, ефективність вирішення даних питань значною мірою залежить від розробки фундаментальних напрацювань покликаних на вирішення даних питань та забезпечення стійкої довготривалої функціональності будівель вертикальних ферм.

1.2 Вітчизняний та світовий досвід архітектурного проектування та будівництва агропромислових господарств

Практичне впровадження та розвиток вертикальних агро-господарств, як нової архітектурної типології, є відносно недавнім явищем у ширшому контексті історії сільського господарства та будівництва. Першу концепцію вертикальної ферми було запропоновано в 1999 році Діксоном Деспом'є [144], що стало передовою фундаментальною основою для теоретичного окреслення такої будівлі. Перехід від теорії до практики матеріалізувався у 2012 році зі створенням першого у світі комерційного вертикального господарства [94]. Розроблений компанією «Sky Greens Farms» у Сінгапурі, цей новаторський об'єкт став демонстрацією

можливості використання вертикального рослинництва у промислових масштабах і започаткував новий напрямок архітектурних об'єктів.

Разом із цим галузь стикається з дефіцитом доступної інформації, як і щодо проектних пропозицій, так і відносно функціонуючих об'єктів вертикальних ферм. Основними причинами цього є новизна галузі та висока конкуренція серед учасників ринку, що обмежує поширення даних. В свою чергу, це ускладнює проведення всебічного аналізу, необхідного для формування системного підходу щодо комплексної організації вертикальних ферм.

Попри зазначені обмеження, у публічному доступі наявні окремі приклади, що становлять цінну базу для відповідного аналізу. Ці будівлі ілюструють практичну реалізацію принципів вертикального фермерства та їх адаптації до сучасних умов. Відповідно, у подальшому огляді буде розглянуто архітектурно-планувальні та функціональні рішення, технологічні інновації та операційну ефективність ВФ як вітчизняних, так і світових. Даний підхід забезпечить вихідні дані для систематизації таких рослинницьких підприємств, а також визначить важливі архітектурні прогалини для подальших напрацювань у дослідженні.

Отже, український сектор вертикального фермерства перебуває на умовно початковій стадії розвитку, що зумовлено обмеженою кількістю реалізованих проектів та недостатністю загальнодоступних даних. У межах дослідження було ідентифіковано дев'ять основних об'єктів, які можна класифікувати за трьома типами: тепличні вертикальні ферми, модульні контейнерні ферми та ферми, інтегровані в будівлі.

Тепличні господарства представлені об'єктами «Green Garden Group» (рис. 1.2.1, а) та «Green Wave Organic» (рис. 1.2.1, г) демонструють архітектурні рішення, спрямовані на інтеграцію вертикального рослинництва з базовою конструкцією теплиць або парників [145, 146]. В свою чергу, модульні контейнерні ферми, зокрема, «Vertical Field Ukraine» (рис. 1.2.1, в) та київська ферма С. Нікіфорова (рис. 1.2.1, б) в карго контейнері [146], характеризуються компактністю та адаптивністю, що дозволяє використовувати їх навіть на обмежених міських ділянках. Натомість, інтегровані в будівлі ферми, серед яких

«Future Farm» (рис. 1.2.1, е; , 2), «Щастя Здоров'я» (рис. 1.2.1, д; рис. 1.2.2, 4) та «Green Future» (рис. 1.2.1, ж; рис. 1.2.2, 3) [146–148], реалізують концепції багатофункціональності споруд та використання наявного архітектурного простору завдяки їх інтеграції в приміщення існуючих будівель.

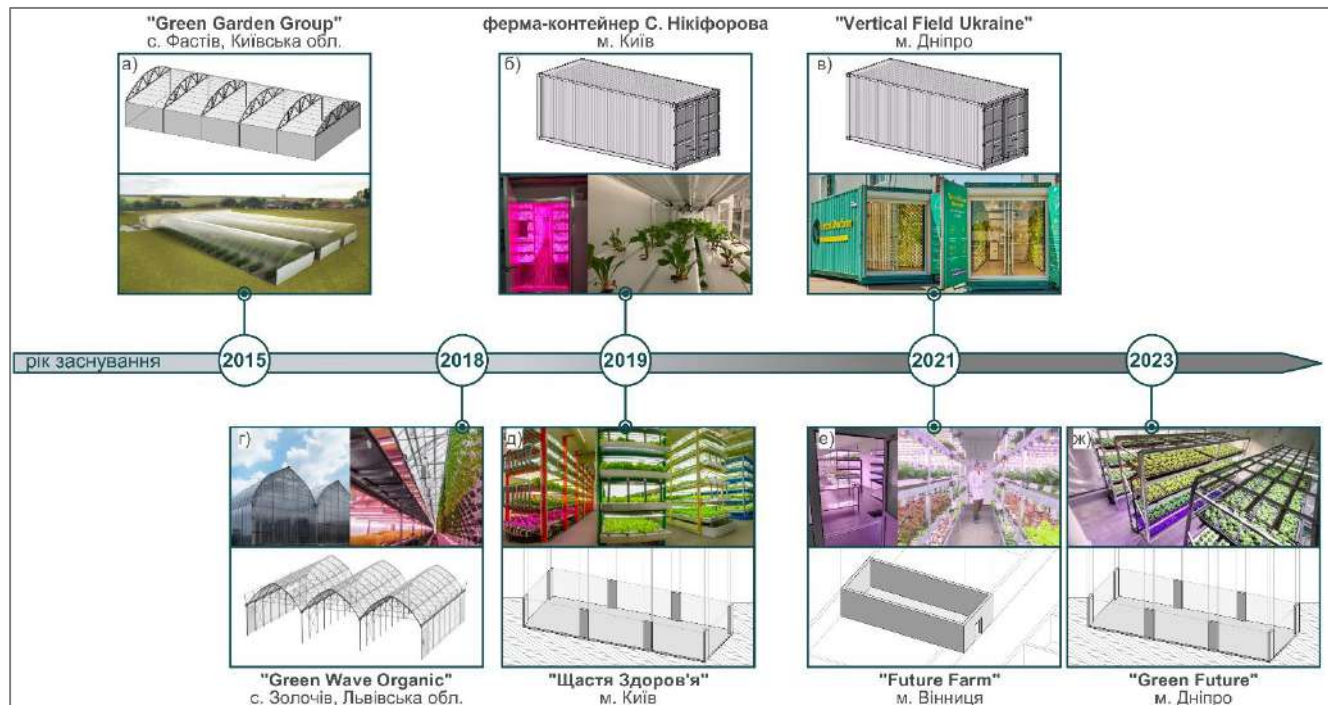


Рис. 1.2.1 Хронологія розвитку вертикальних рослинницьких господарств в Україні

Варто зазначити, що теплиці, як окремий тип сільськогосподарських об'єктів, не є предметом детального аналізу в межах цієї дослідницької роботи. Відповідно, подальший національний аналіз зосереджується на двох інших категоріях: модульних контейнерних фермах і таких, що інтегровані у будівлі.

Зокрема, одним із прикладів модульної ферми є об'єкт, що розроблений С. Нікіфоровим у столиці України (рис. 1.2.2, 1). Ця ферма реалізована у стандартному 40-футовому контейнері для сухопутних вантажів, що забезпечує адаптивне повторне використання простору і відповідає принципам циркулярності й сталого розвитку. Архітектурна структура контейнера з внутрішньою висотою 2,6 метра та загальною площею 20 квадратних метрів оптимально пристосована для розміщення гідропонних систем безгрунтового вирощування [146].












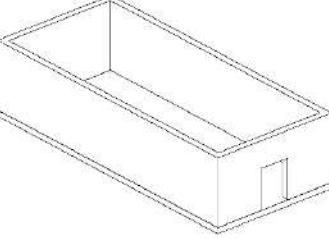







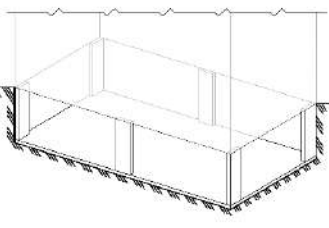







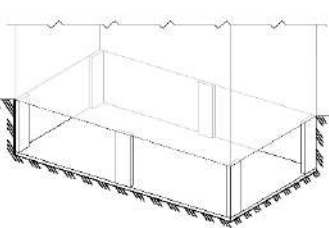




<p>1 НАЗВА ФЕРМА-КОНТЕЙНЕР НІКІФОРОВА</p> 	<p>РОЗТАШУВАННЯ КИЇВ</p> 	<p>АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ 40-ФУТОВИЙ ТРАНСПОРТНИЙ КОНТЕЙНЕР</p> <p>↕h 2,6 м  30 m²</p> 	<p>ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОПОНІКА</p>  <p> 4.5 тон/рік</p> <p> САЛАТ РУКОЛА</p> <p> РЕСТОРАНИ КАФЕ</p>
<p>2 НАЗВА FUTURE FARM</p> 	<p>РОЗТАШУВАННЯ ВІННИЦЯ</p> 	<p>АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ БЕЗКАРКАСНА СХЕМА З НЕСУЧИМИ СТІНАМИ</p> <p>↕h 3,3 м  60 m²</p> 	<p>ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОПОНІКА</p>  <p> 6 тон/рік</p> <p> САЛАТ РОМЕН САЛАТ БАТАВІЯ</p> <p> РЕСТОРАНИ МІНІМАРКЕТИ</p>
<p>3 НАЗВА GREEN FUTURE</p> 	<p>РОЗТАШУВАННЯ ДНІПРО</p> 	<p>АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ КАРКАС З НЕСУЧИМИ КОЛОНАМИ (ПІДЗЕМНЕ РОЗТАШУВАННЯ)</p> <p>↕h 5 м  200 m²</p> 	<p>ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОПОНІКА</p>  <p> 6 тон/рік</p> <p> САЛАТ, БАЗИЛІК</p> <p> РЕСТОРАНИ ДИСТРИБ'ЮТОРИ</p>
<p>4 НАЗВА ЩАСТЯ ЗДОРОВ'Я</p> 	<p>РОЗТАШУВАННЯ КИЇВ</p> 	<p>АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ КАРКАС З НЕСУЧИМИ КОЛОНАМИ (ПІДЗЕМНЕ РОЗТАШУВАННЯ)</p> <p>↕h 4,2 м  500 m²</p> 	<p>ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОПОНІКА</p>  <p> 70 тон/рік</p> <p> ЛИСТОВА ТА МІКРОЗЕЛЕНЬ</p> <p> РЕСТОРАНИ СУПЕРМАРКЕТИ</p>

Рис. 1.2.2 Архітектурно-функціональний аналіз вертикальних ферм в Україні

Попри таку компактність, що також мінімізує просторові потреби, дане господарство досягає високих виробничих показників — 4,5 тони салату та руколи на рік. Завдяки розташуванню в центральній частині міста, продукція ферми постачається безпосередньо до місцевих ресторанів і кафе, що знижує витрати на логістику та відповідний екологічний слід [146].

Вдалою ілюстрацією інтеграції вертикального фермерства в існуюче архітектурне середовище є ферма «Future Farm» розташована у місті Вінниця (рис. 1.2.2, 2). Об'єкт інтегровано в одне із приміщень місцевого офісного центру, що, в свою чергу, дозволяє оптимізувати використання міських будівель. Конструкція ферми влаштована із несучих стін, а висота приміщення складає 3,3 метри із загальною площею 60 квадратних метрів. Така конфігурація забезпечує компактну організацію простору, в якому весь виробничий процес, від проростання насіння до пакування готової продукції, здійснюється в межах одного приміщення.

Для вирощування продукції використовується система гідропоніки, яка забезпечує річну виробничу потужність у 6 тонн, а основними культурами є сорти салату «ромен» та «батавія». Завдяки розташуванню неподалік від центру міста, продукція постачається не лише до місцевих ресторанів, але й на міні-ринки, що розширює канали збуту та сприяє зменшенню витрат на транспортування [147].

Фермерське господарство «Green Future», розташоване у місті Дніпро (рис. 1.2.2, 3), є зразком інноваційного архітектурного підходу, який не тільки поєднує виробничі потужності з дослідницькою інфраструктурою, а й забезпечує безпечне функціонування об'єкта в сучасних умовах. Відповідно, повномасштабна військової агресія в Україні спричинила унікальну адаптацію цієї ферми — її розташування в підземному бомбосховищі, що гарантує захист від інтенсивних озброєних атак. Такий підхід демонструє нові можливості для вертикального фермерства в Україні, дозволяючи безпечно та ефективно вирощувати сільськогосподарські культури навіть у складних обставинах.

З архітектурної точки зору, об'єкт влаштовано у будівлі, яку зведено із використанням каркасної конструкції з опорними пілонами, що забезпечує 5-метрову висоту приміщення. Загальна площа ферми становить 300 квадратних

метрів, значна частина якої відведена під дослідницькі функції. Основними напрямками діяльності ферми є оптимізація освітлення та підвищення ефективності вирощування базиліку. Це також пояснює значно нижчу продуктивність у порівнянні з «Future Farm» у Вінниці, адже річна врожайність «Green Future» аналогічно складає 6 тонн, попри значно більшу площу виробництва. Вирощені салат і базилік реалізуються через комерційні канали — місцеві ресторани та приватних дистриб'юторів [148].

Останнім проаналізованим прикладом серед українських підприємств є господарство «Щастя Здоров'я», що розташоване в Києві (рис. 1.2.2, 4). Даний об'єкт є першою реалізованою вертикальною фермою в Україні, а також розміщене у підземному приміщенні підтримуючи принцип захищеного виробництва та використання існуючих просторів подібно дніпровському та вінницькому проектам.

Ферма вбудована в одне із приміщень існуючої промислової будівлі столиці. Відповідно, конструкція об'єкта влаштована за каркасною системою з опорними пілонами, висотою стелі у 4,2 метри та площею 500 квадратних метрів, що робить його найбільшим серед розглянутих прикладів.

Господарство оснащено гідропонними системами для вирощування мікро- та листової зелені, що досягає щорічної продуктивності близько 70 тон. Основними каналами збуту продукції є місцеві супермаркети та ресторани, інтегруючи ферму як частину міської продовольчої інфраструктури [146].

Проаналізовані приклади вертикальних ферм в Україні демонструють гнучку адаптацію архітектурних рішень до специфічних міських та безпекових умов через застосування прийомів компактності об'ємно-просторових рішень, інтеграцію з існуючими структурами та підземне розташування.

Проте комплексне розуміння потенціалу та обмежень вертикальних фермерства господарств вимагає аналізу даних споруд в більш широкому глобальному контексті. Таким чином, надалі запропоновано розглянути міжнародний досвід проектування та будівництва подібних агропідприємств.

Одним із таких прикладів є ферма «La Ferme Musicale» (рис. 1.2.3), яка розроблена архітектурним бюро «SOA» у співпраці з «HoldUp» [149, 150]. Цей проєкт вертикального господарства розташований в Бордо, Франція і демонструє унікальну інтеграцію рослинницького виробництва з культурними та освітніми функціями.

Архітектурна концепція передбачає використання гібридної структури, яка поєднує виробничі зони з приміщеннями для проведення культурно-розважальних заходів та влаштування тематичних виставок. Такий підхід сприяє формування нової моделі міського середовища, що враховує потреби соціального та агро-економічного розвитку завдяки відповідній гармонійній кооперації.

Господарство повністю інтегроване в багатофункціональну будівлю, де на першому рівні розташовані дві основні зони – загальнодоступна громадська та закрита підприємницька. В першій влаштована виставкова зала із галереєю та сцена, а в другій – приміщення для обробки врожаю, технічні зони та кімнати для персоналу. Верхні поверхи відведено виключно під вирощування культур, доступ до яких обмежено для відвідувачів. Проте, напівпрозорі огорожувальні конструкції зовнішніх стін дозволяють спостерігати за процесом фермерства, одночасно забезпечуючи унікальну архітектурну виразність споруди.

Конструкція будівлі виконана з легкої сталеві модульної системи із зашкеленими фасадними огороженнями, що сприяє оптимальному використанню природного сонячного світла під час процесу культивування. Це рішення спрямоване на зниження споживання енергії та зменшення викидів парникових газів, пов'язаних із екстенсивним використанням штучного освітлення, що позитивно впливає на операційні витрати та загальну екологічну стійкість проєкту [149, 150].

Дизайн будівлі спрямований на інтеграцію міського сільського господарства з культурними та освітніми функціями, що забезпечує її багатофункціональність. Окрім підтримки локального виробництва харчових продуктів, така концепція створює додаткові можливості для економічного розвитку. Зокрема, інтегрована сцена виконує роль простору для проведення культурно-розважальних подій, таких

як вистави та концерти, що забезпечує додаткові канали доходів і підвищує економічну ефективність та стабільність об'єкту.

Крім того, освітня галерея сприяє популяризації технологій контрольованого середовища, спрямованих на вирощування продукції у міських умовах. Такий архітектурно-планувальний підхід сприяє кращому сприйняттю інновацій серед широкої аудиторії, що важливо для розширення суспільного прийняття таких методів вирощування.

Незважаючи на ефективну інтеграцію вторинних функцій у будівлю, просторове планування об'єкта має недоліки з точки зору оптимізації виробничо-логістичних процесів. Зокрема, розташування пакувального цеху праворуч від ліфта ускладнює транспортування продукції. Зібраний на верхніх культивацийних поверхнях врожай спускається ліфтом до зони пакування, після чого його необхідно переміщувати спочатку праворуч для пакування, а опісля повертати ліворуч до зони завантаження.

Раціоналізація планування, що передбачає перенесення пакувального цеху на ліву сторону безпосередньо біля ліфта, дозволила б мінімізувати відстань і усунути зайві переміщення. Така модифікація сприяла б підвищенню ефективності виробничого процесу, зниженню витрат часу та оптимізації трудових ресурсів на даному етапі.

На додаток, ще однією з виявлених проблем є нераціональне розташування зони зберігання біовідходів, що протирічить ефективному розподілу «чистих» та «брудних» потоків. Потенційне перетинання маршрутів упакованої продукції та відходів створює ризик забруднення та порушення санітарно-гігієнічних норм. Такий недолік у плануванні негативно впливає на відповідність об'єкта вимогам харчової безпеки. З огляду на те, що сховище біовідходів розташоване біля зовнішньої стіни, раціональним рішенням є створення окремого спеціалізованого виходу, що буде ізольованим від основного потоку готової продукції. Це архітектурне вдосконалення сприятиме дотриманню санітарних норм, підвищить функціональну ефективність логістики та зменшить ризики, пов'язані з забрудненням продукції.



Рис. 1.2.3 Вертикальна ферма «La Ferme Musicale» від бюро «SOA» та «HoldUp», Франція

На відміну від попереднього проєкту, який є концептуальною пропозицією, наступний приклад є реалізованим функціонуючим об'єктом. Голландський ресторан «The Green House» (рис. 1.2.4), спроектований архітектурним бюро «architectenbureau cepezed», являє собою двоповерховий павільйон, завершений у 2018 році [151, 152].

Однією з ключових особливостей будівлі є вбудована вертикальна ферма площею 80 квадратних метрів, яка використовується для вирощування овочів та зелені, що забезпечує самодостатність ресторану.

Інтеграція господарства дозволяє усунути потребу у транспортуванні та зберіганні продукції, що, у свою чергу, зменшує площі, необхідні для складських приміщень, та відповідно знижує вплив на навколишнє середовище [151, 152]. Використання локально вирощеної продукції мінімізує транспортні витрати та сприяє економії ресурсів, пов'язаних із будівництвом та експлуатацією. Це архітектурне рішення демонструє, як вертикальне фермерство може ефективно та симбіотично інтегруватися в інфраструктуру міських будівель також сприяючи екологічній стійкості.

Окрім цього, проєкт будівлі реалізовано із застосуванням принципів циркулярної архітектури, які передбачають повторне використання матеріалів та елементів конструкції з метою зменшення впливу на довкілля. Фундамент споруди виконаний зі збірних бетонних блоків, що забезпечують як простоту монтажу й демонтажу, так і збереження конструктивної стійкості [151, 152]. Каркас будівлі складається зі знімних оцинкованих сталевих профілів, які дозволяють багаторазово використовувати матеріали без втрати їх механічних характеристик.

Фасадні панелі створені з матеріалів, які були перероблені з попередньої будівлі, яка раніше розташовувалася на цій ділянці, що також сприяє значному зменшенню будівельних відходів [151, 152]. Підлога, у свою чергу, виготовлена з тротуарної цегли, повторно використаної зі старої набережної в Тілі, що підкреслює послідовне дотримання принципів сталого використання ресурсів [151, 152].



Рис. 1.2.4 Ресторан «The Green House» з інтегрованою вертикальною фермою від «serazed», Нідерланди

Однією з визначних архітектурних особливостей об'єкта є його «зелений» дизайн, який органічно поєднує естетичну складову з функціональністю вертикального землеробства. Масивна стіна із вертикальним озелененням, розташована всередині головного залу, виконує роль не лише декоративного але й є прикладом експресивності завдяки візуальному підкресленню концепції вертикальної ферми. В свою чергу, це створює гармонійний зв'язок між загальним виглядом й образом споруди та її внутрішньою функціональністю.

Естетичний вплив самої ферми посилюється її інтеграцією в дизайн інтер'єру: частину виробничих зон експоновано в приміщеннях для коворкінгу, що дозволяє відвідувачам безпосередньо ознайомитися з процесами вирощування. Таке архітектурне рішення демонструє, як вертикальна ферма може бути одночасно ефективним виробничим об'єктом і естетичною складовою загального дизайну будівлі.

Попри інноваційні архітектурні рішення, реалізовані у циркулярному дизайні та інтер'єрі будівлі, поточна організація простору створює труднощі у логістичних процесах. Зокрема, розташування вертикальної господарства на другому поверсі з протилежного боку від кухні, яка знаходиться на першому рівні, спричиняє пересування продукції через зони загального користування.

Удосконалення логістики можливе за рахунок переміщення ферми над кухнею та влаштування спеціального ліфта для переміщення врожаю, що дозволить скоротити відстань транспортування та забезпечити прямий зв'язок між даними виробничими зонами ресторану.

Наступним об'єктом аналізу є «Вертикальна ферма Beijing» від бюро «van Bergen Kolra» (рис. 1.2.5). Вона є одним із ключових компонентів інноваційного науково центру з виробництва продуктів харчування для урбанізованих територій Китаю [153, 154]. Ця окремо стояча будівля не лише виконує функцію сільськогосподарського об'єкта, але й забезпечує дослідницьку та симбіотичну кооперацію разом із теплицями, що розташовані на прилеглий території центру.

Споруда займає площу 3500 квадратних метрів і складається з трьох поверхів висотою 4 метри кожен [153, 154]. Її архітектурна форма базується на модульному

сталевому каркасі із скляними фасадами панелями, що забезпечує легкість візуального сприйняття й підкреслює сучасний дизайн споруди. Таке конструктивне рішення також сприяє максимальному використанню природного освітлення, одночасно створюючи естетичну виразність будівлі.

Внутрішній простір скомпоновано навколо озеленого атріуму, який виконує роль центральної просторової осі. Атріум забезпечує візуальну і функціональну імплементацію рослинництва у інтер'єрі, де культивацийні модулі гармонійно поєднуються з відкритими зонами, створюючи єдність архітектурного середовища.

Особливістю будівлі також є інтеграція освітнього маршруту, який забезпечує доступ громадськості до ключових функціональних зон споруди. Маршрут організовано таким чином, щоб відвідувачі могли ознайомитися з різними технологіями вирощування в контрольованому середовищі, а також відвідати теплицю на даху, де вирощуються томати та огірки [151, 152].

Будівля реалізована із застосуванням низки стратегій сталого розвитку, які охоплюють як будівництво, так і експлуатацію ферми. Зокрема, система управління водними ресурсами включає вдосконалену рециркуляцію для потреб господарства та збір дощових вод із даху, що дозволяє зменшити витрати на водопостачання та зменшити використання ресурсів [153, 154].

В свою чергу, система клімат-контролю базується на методах природної вентиляції та охолодження випаровуванням, що забезпечує оптимальні мікрокліматичні умови з мінімізацією енергоспоживання. Крім того, використання залишкового тепла від світлодіодного освітлення та пасивне застосування сонячної енергії завдяки влаштуванню світлопрозорих огорожувальних конструкцій сприяє стійкому задоволенню потреб у опаленні, що також підвищує енергоефективність будівлі [153, 154].

Проте, одним із ключових недоліків є надмірна площа коридорів, яка становить приблизно 40% загального простору будівлі. Така організація, хоча й відповідає концепції відкритості та легкості загального образу, суперечить принципам ефективного використання ресурсів та економічної ефективності.

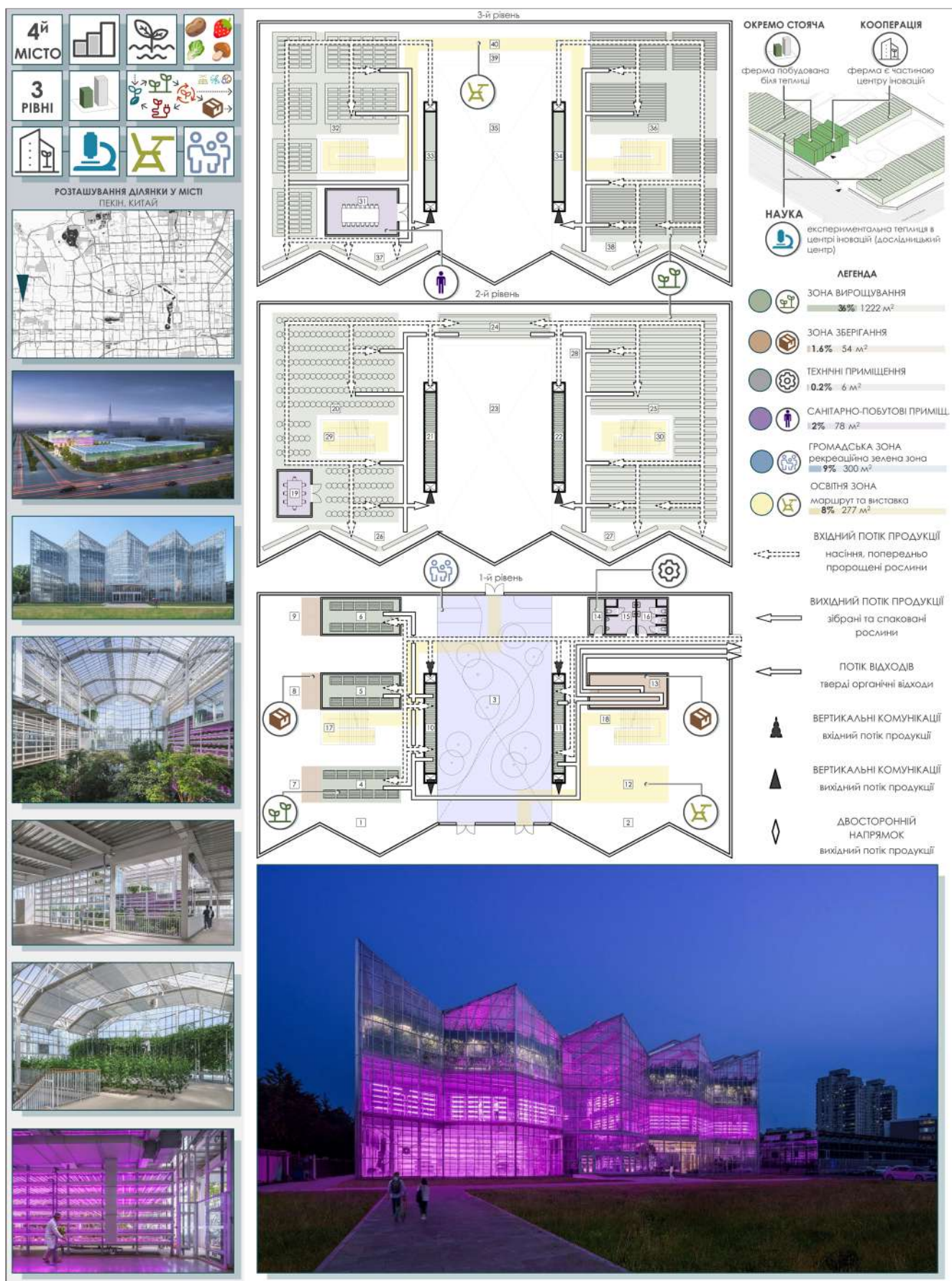


Рис. 1.2.5 Інноваційний центр для міського виробництва продуктів харчування «Вертикальна ферма Beijing» від «van Bergen Kolpra», Китай

Раціоналізація використання цих площ могла б включати розширення фермерських площ або створення повноцінних технічних чи санітарно-побутових приміщень (наприклад, для обробки врожаю), що наразі представлені лише обмеженими складськими зонами. Оптимізація простору дозволила б підвищити архітектурну функціональність будівлі та забезпечити її відповідність як виробничим, так і естетичним вимогам.

Вибір будівельних матеріалів у даному проєкті також потребує додаткового аналізу з точки зору енергоефективних міркувань. Екстенсивне використання напівпрозорих модулів, зокрема не тільки на фасадах, й на даху споруди, підкреслює концепцію вітринного відкритого дизайну, однак значно ускладнює забезпечення енергетичної стійкості об'єкта. В умовах різких сезонних коливань температур у Пекіні [155], така скляна конструкція може спричинити значні витрати енергії як на опалення в зимовий період, так і на охолодження влітку.

Крім того, таке матеріальне рішення частково нівелює переваги використання пасивної сонячної системи опалення, що передбачає зменшення енергоспоживання. Цей дисбаланс між архітектурним задумом і практичною реалізацією підкреслює необхідність кліматично адаптованого підходу, який передбачає більш доцільне врахування місцевих середовищних умов при виборі будівельних матеріалів.

Американська вертикальна ферма «Vertical Harvest» (рис. 1.2.6), розроблена компанією «Ellinger» та «Yehia Design LLC» [156, 157], є прикладом проєкту, який інтегрує економічні та соціальні цінності в архітектурне середовище міських систем. Архітектурні рішення цього об'єкта забезпечують функціональну доступність, включаючи створення можливостей працевлаштування для жителів, зокрема для осіб із інвалідністю та розумовими порушеннями, а також сприяють освітнім ініціативам.

Ферма має вбудовані приміщення для міні-маркету, а також передбачає партнерство з місцевими дистриб'юторами, що, в свою чергу, створюють умови для прямого збуту 45 тонн річного врожаю. Розташована в промисловому районі Джексона, штат Вайомінг, ця компактна триповерхова споруда демонструє

ефективне використання обмеженої та геометрично ускладненої площі території розміром 420 м². Будівля прибудована до місцевого паркінгу, а її адаптована до місцевих умов витягнута прямокутна форма забезпечує загальну продуктивну площу 1700 м², що значно перевищує фізичні розміри самої ділянки проектування.

На відміну від попереднього об'єкта, дана скляна фасадна структура даної будівлі демонструє вдало використаний енергозберігаючий прийом оскільки дана система дозволяє підтримувати внутрішню температуру на рівні 20°C навіть при зовнішніх температурах до -35°C [156, 157].

Проте, архітектурне планування має певні недоліки, які впливають на ефективність виробничих процесів. Зокрема, блок для першого етапу виробництва – пророщування рослин, розташований на другому поверсі. Як наслідок, це спричиняє логістичні труднощі, оскільки значна частина приміщень для другої фази вирощування знаходиться на першому рівні. Така конфігурація призводить до зайвого переміщення продукції: спочатку вона піднімається на верхній рівень для першочергового процесу, а потім знову транспортується на перший поверх для подальшої культивуації.

Перенесення блоку пророщування на перший рівень сприятиме скороченню вертикальних та горизонтальних маршрутів транспортування рослин. Вивільнений простір другого поверху може бути використаний для компенсації культивуаційної площі, зберігаючи загальну оперативну потужність будівлі.

Наступною архітектурною проблемою даної вертикальної ферми є конфігурація зони блоку пост-обробки врожаю, яка не має прямого та оптимізованого доступу до зони завантаження та доставки. Це призводить до необхідності обходу через головний коридор, у якому, на додаток, одночасно циркулюють готова продукція та біовідходи.

Проте, варто зазначити, що дана проблема зумовлена частковим підземним розташуванням першого рівня, що обмежує доступ до зовнішніх зон. Оптимізація логістики можлива за рахунок встановлення рухомої механічної платформи для прямого транспортування між блоком пост-переробки та зовнішньою зоною доставки, що також сприятиме зменшенню кількості мануальних операцій.

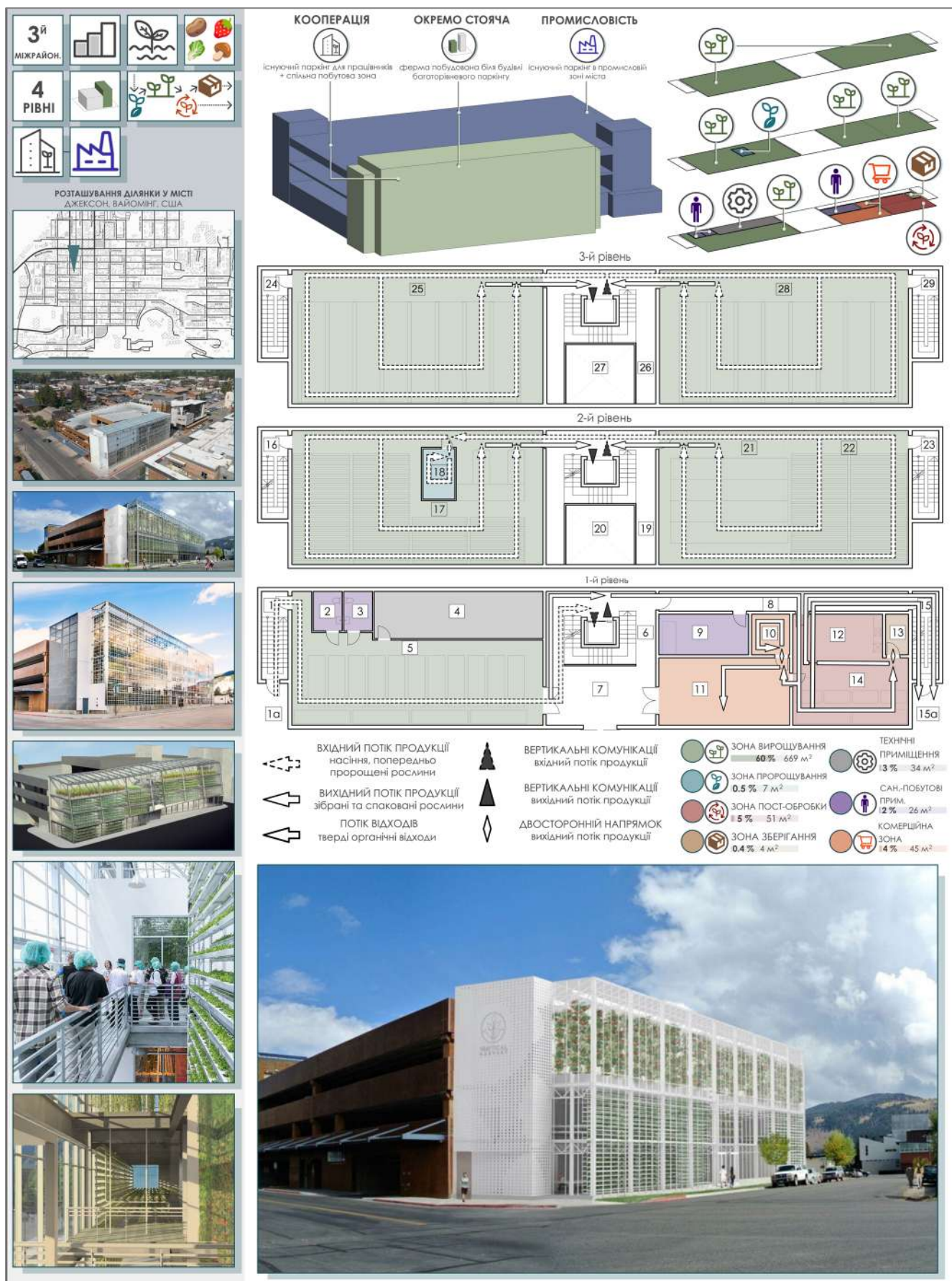


Рис. 1.2.6 Вертикальна ферма «Vertical Harvest» компаній «Ellinger» та «Yehia Design LLC», США

Завершенням аналізу тематичних досліджень є дослідницький центр «Agrotopia», що спеціалізується на питаннях виробництва продуктів харчування у містах (рис. 1.2.7), спроектований «van Bergen Kolpa Architects» та «META architectuurbureau» [137-139]. Об'єкт розташований на даху логістичного комплексу «REO Veiling», який є дистриб'юторським комплексом для постачання фруктів та овочів. Відповідно, інтеграція будівлі з існуючою інфраструктурою цього центру дозволяє не тільки оптимізувати логістичні процеси, а й зменшити використання будівельних ресурсів та просторів необхідних на влаштування відповідних приміщень для обробки, пакування та зберігання врожаю.

Діяльність даного рослинницького підприємства також забезпечує значну підтримку місцевій міській громаді через інтеграцію навчально-освітніх функцій. Окрім освітньої функції, ферма використовує надлишкове тепло, отримане від сусіднього міського сміттєспалювального заводу, для обігріву будівлі [137-139]. Екологічні стратегії також включають переробку муніципальних стічних вод для забезпечення поливу рослин, збір дощової води для зменшення споживання міських водних ресурсів та використання сонячного світла через напівпрозорі фасадні конструкції [137-139].

Архітектурний дизайн будівлі відзначається типовою конструкцією зі скла та сталевого каркасу, що контрастує з монолітною бетонною архітектурою основної споруди. Центральний вхід оформлений широкими висхідними сходами, які ведуть до внутрішнього простору, обладнаного приміщеннями для відвідувачів та дослідників. Планування ферми організовано навколо високотехнологічних дослідницьких зон, призначених для вирощування фруктів і листових овочів. Ці зони оточені освітнім маршрутом, який інтегровано у внутрішні коридори будівлі.

На перший погляд, вибір будівельних матеріалів для цього об'єкта може здаватися подібним до проблеми, що була виявлена у пекінському проєкті. Однак у даному випадку, це питання не є актуальним завдяки врахуванню місцевих кліматичних умов. По-перше, проблема літнього перегріву мінімізована через помірний клімат міста, у якому максимальна температура не перевищує 23°C [155].



Рис. 1.2.7 Дослідницький центр «Agrotopia» від «van Bergen Kolpa Architects» та «META architectuurbureau», Бельгія

В свою чергу, в зимовий період, коли температура залишається вище нуля, будівля повністю задовольняє свої потреби в теплопостачанні за рахунок повторного використання міських теплових відходів.

Попри впровадження еко-сталого проектування, просторове планування цього об'єкта також потребує подальшої оптимізації, зокрема, щодо інтеграції виробничих зон із просторами громадського доступу. Як і в попередніх об'єктах, основним недоліком є неефективна маршрутизація продукції та перетин потоків технологічних операцій із загальнодоступними просторами.

Для вирішення цієї проблеми доцільно було би обмежити доступ громадськості до спеціально визначених зон, розташованих з правого боку об'єкта. Додатково рекомендується впровадити архітектурні елементи такі, як прозорі перегородки або огорожі, що забезпечать захист виробництва та чіткий поділ функціональних зон будівлі.

Узагальнюючи, проведене дослідження виявило, що вертикальне фермерство, незважаючи на його відносну новизну, демонструє значний потенціал розвитку. Аналіз українського досвіду показав унікальну адаптацію таких господарств до безпекових викликів та здатність вертикальних господарств забезпечити продовольчу стабільність кризових умовах. Міжнародна практика, натомість, відзначається впровадженням інноваційних підходів до функціональної інтеграції та енергоефективності та застосування стратегій сталого розвитку.

Водночас виявлено ключові архітектурні проблеми у вигляді невідповідності об'ємно-просторових рішень функціональним особливостям вертикальних ферм. Тож подальші дослідження мають зосередитись на розробці комплексних рекомендацій щодо ефективної міської інтеграції та виробничо-орієнтованої архітектурної організації будівлі.

1.3 Фактори, що впливають на формування просторової структури, та класифікація вертикальних агро-підприємств

Аналіз демографічних, екологічних і соціально-економічних проблем довів важливість інтеграції інноваційних рішень у сільське господарство. Відповідно, у цьому контексті вертикальні ферми постають як комплексний інструмент для задоволення зростаючих потреб у продовольстві, забезпечення екологічної стійкості та оптимізації використання природних ресурсів.

В свою чергу, архітектурний огляд встановив притаманні характеристики сучасних вертикальних господарств з акцентом на їх практичній реалізації. Завдяки цьому було продемонстровано їх здатність адаптуватися до зазначених умов попри наявні обмеження даної галузі.

Таким чином, разом ці аспекти не тільки підкреслюють ключову роль вертикального рослинництва у вирішенні глобальних питань, а й формують вихідні дані для розробки фундаментальної бази вертикального фермерства: факторів, які впливають на їх формування (рис. 1.3.1) та відповідну класифікацію таких об'єктів (рис. 1.3.2 та рис. 1.3.3). У контексті теоретичного моделювання ключових факторів формування будівель вертикальних ферм особливе значення має тематичне напрацювання Д. Добровенко [45]. Проведене в українському контексті, це дослідження закладає основу, яка може бути адаптована та уточнена для аналізу у глобальній перспективі. Відповідно до теорії демо-еко-системи [161, 162], запропонована класифікація факторів, охоплює три основні категорії: природно-кліматичні, техногенні та антропогенні чинники.

Перш за все, Д. Добровенко у своєму дослідженні підкреслює важливість природно-кліматичних факторів, які зумовлюють необхідність створення штучного середовища для позасезонного вирощування рослин. Вона акцентує увагу на таких аспектах, як сонячна радіація, вітер, опади, атмосферний тиск та вологість, що впливають на вибір конструктивних матеріалів, орієнтацію будівель та ефективність енергетичних систем [45].

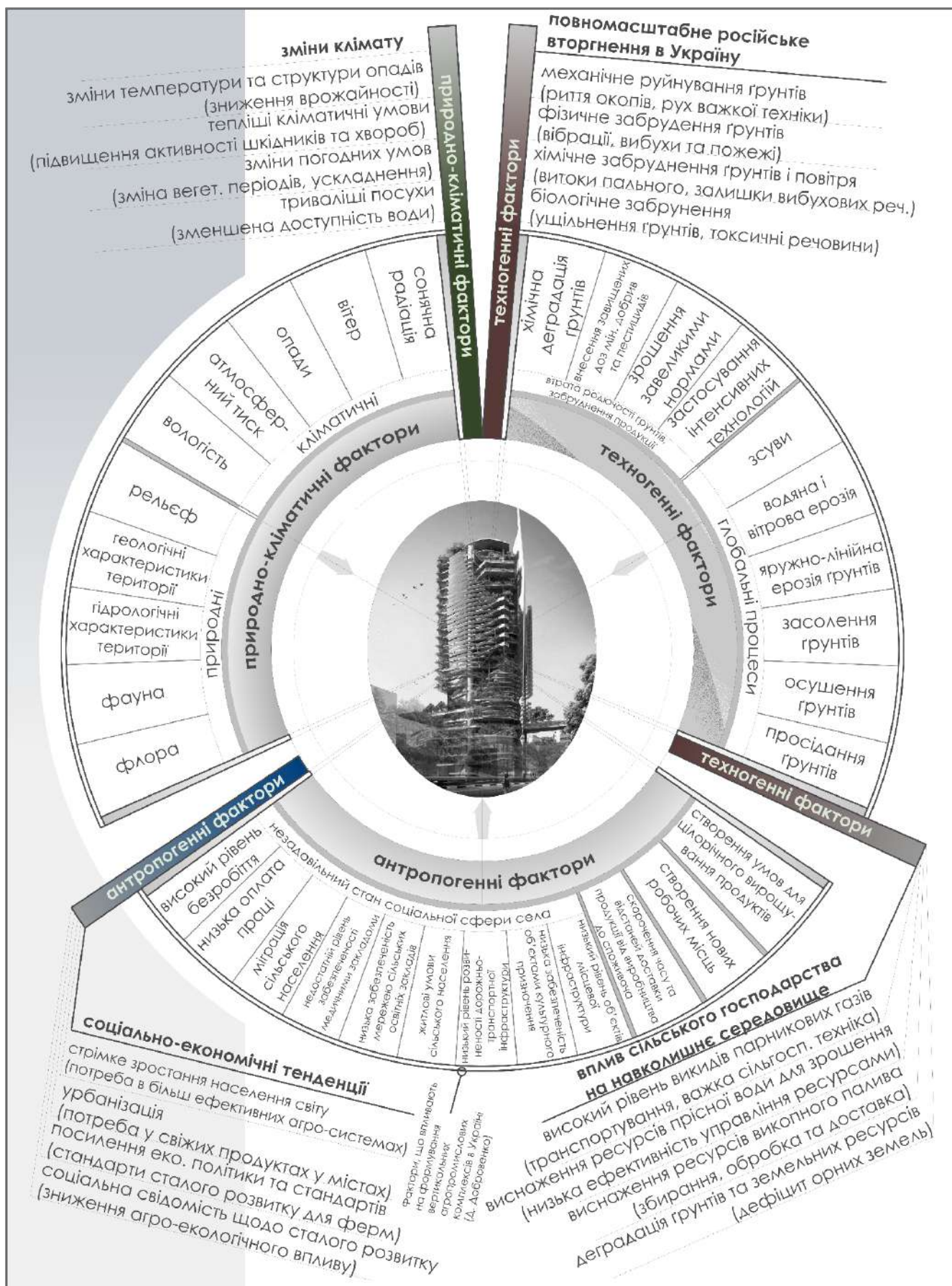


Рис. 1.3.1 Фактори, що впливають на формування вертикальних ферм

Техногенні фактори в дослідженні Добровенко розглядаються як ключові чинники, що зумовлюють деградацію ґрунтів і природних ландшафтів. В свою чергу, наголошується, що завдяки впровадженню ВФ можна зменшити розораність земель, відновити деградовані ґрунти та зберегти природні екосистеми [45].

Антропогенні фактори, також відіграють важливу роль у концепції Д. Добровенко. Відповідно, встановлено, що вертикальні ферми здатні вирішувати комплексні соціально-економічні проблеми, сприяючи створенню нових робочих місць, підвищенню якості життя в сільських регіонах, модернізації агровиробничої галузі та забезпечення стабільного постачання продукції з мінімальними логістичними витратами [45].

Хоча дана концепція факторів пропонує ґрунтовну основу для дослідження щодо формування вертикальних ферм, вона потребує доповнення з урахуванням сучасних глобальних і вітчизняних проблем. Зокрема, врахування таких чинників, як посилення кліматичних змін, руйнівні наслідки повномасштабного озброєного втручання в Україні та зростання демографічного тиску.

Перш за все, в українському контексті руйнівна російська агресія значно посилила техногенні фактори, які суттєво впливають на сільськогосподарську діяльність. Воєнні дії спричинили механічне руйнування територій внаслідок риття окопів та руху важкої техніки, а також фізичне нищення, спричинене вібраціями, вибухами й пожежами. Окрім цього, хімічне забруднення, зумовлене витоками пального та залишками вибухових речовин, створює тривалі екологічні загрози, тоді як біологічні негативні наслідки, що проявляються через ущільнення ґрунтів і накопичення токсичних речовин. В свою чергу, це впливає на формування безґрунтових методах вирощування та на перенесення вертикальних ферм у захищений підземний простір.

На глобальному рівні кліматичні зміни погіршують врожайність агрокультур через тепліший клімат, активізацію шкідників, хвороби рослин та погодні аномалії. У контексті таких чинників, новітні агропідприємства стають важливим інструментом адаптації, оскільки їх функціонування у контрольованому середовищі дозволяє забезпечувати стабільні умови вирощування рослин протягом

усього року. Ці аспекти також мають безпосередній вплив на архітектурне проектування таких об'єктів, стимулюючи розробку нових адаптованих до кліматичних умов об'ємно-планувальних рішень.

Інтенсивні практики традиційного рослинництва також має значний вплив на навколишнє середовище. Як наслідок, спричиняючи виникнення нових техногенних викликів, що підсилюють потребу у впровадженні вертикальних господарств, що мінімізують використання природних ресурсів та значно скорочують відповідне навантаження на довкілля.

В свою чергу, антропогенні фактори, тісно пов'язані з соціально-економічними тенденціями та демографічними змінами, також відіграють ключову роль у формуванні вертикальних агро-підприємств. Стрімке зростання населення світу та урбанізація вимагають впровадження більш ефективних і високопродуктивних міських систем виробництва продуктів харчування, здатних задовольнити зростаючий попит.

Одночасно, посилення екологічної політики та впровадження суворіших стандартів сталого розвитку сприяють поширенню інноваційних аграрних підходів, які мінімізують вплив на навколишнє середовище. Зростаюча соціальна свідомість споживачів щодо стійкого розвитку також створює додатковий попит на екологічно чисті та «органічні» методи виробництва, як вертикальне фермерство.

Відповідно, для гармонійної містобудівної інтеграції та комплексної стійкої організації таких господарств необхідна подальша систематизація та категоризації вертикальних ферм, враховуючи їх архітектурні, експлуатаційні та функціональні особливості.

Таким чином, надалі запропоновано класифікацію, що ґрунтується на двох підходах: (I) розробці загальної моделі, заснованої на ключових критеріях (рис. 1.3.2), та (II) архітектурна класифікація відповідно до особливостей функціональної інтеграції вертикальних ферм у міське середовище (рис. 1.3.3).

Критеріальна модель слугує основою для аналізу архітектурних та структурних характеристик будівель вертикальних ферм та їх виробничих параметрів. Цей підхід базується на результатах дослідження існуючих прикладів,

а також на уточненні наукових робіт інших авторів, які пропонують різні моделі систематизації [39, 163, 164].

Основні критерії класифікації охоплюють такі аспекти, як об'ємно-просторова структура будівлі, поверховість, типи інтегрованих відновлюваних джерел енергії, виробнича потужність, спеціалізація на вирощувальній продукції, застосовуваних методах культивації та особливості виробничого процесу.

Відповідно, за об'ємно-просторовою структурою вертикальні ферми поділяються на окремо стоячі, прибудовані, вбудовані або комбіновані споруди [164].

За висотністю, дані об'єкти класифікуються як малоповерхові (з умовною висотою 9 метрів), багатоповерхові (9-26,5 м), підвищеної поверховості (26,5-47 м) та висотні (заввишки понад 47 м) [164, 165].

За критерієм інтеграції відновлювальних джерел вертикальні господарства можна класифікувати залежно від застосування сонячної, вітрової, біоенергетики та інших комбінованих джерел [164].

Сонячна енергія, як правило, використовується завдяки фотоелектричним панелям, розташованим на дахах або фасадах будівлі в той час як використання вітрової енергії можливе за допомогою горизонтальних або вертикальних турбін. В свою чергу, системи на основі біомаси, наприклад такі, як біогазові реактори, перетворюють органічні відходи виробництва на енергію та поживні речовини. Додаткові джерела також можуть включати геотермальні теплові насоси, системи збору дощової води та водневі паливні елементи.

Наступний критерій – виробнича потужність визначає масштаби врожайності вертикальної ферми. Відповідно до цієї характеристики, агропідприємства поділяються на низькопродуктивні (менше 50 тонн врожаю на рік), середньопроодуктивні (50-500 тон врожаю на рік) та високопродуктивні (понад 500 тон врожаю на рік).

Спеціалізація ВФ або асортимент культур, які можуть бути вирощені у вертикальних фермах, переважно охоплює мікро- та листову зелень, ягоди, фрукти та овочі, лікарські рослини, квіти, а також канабіс.

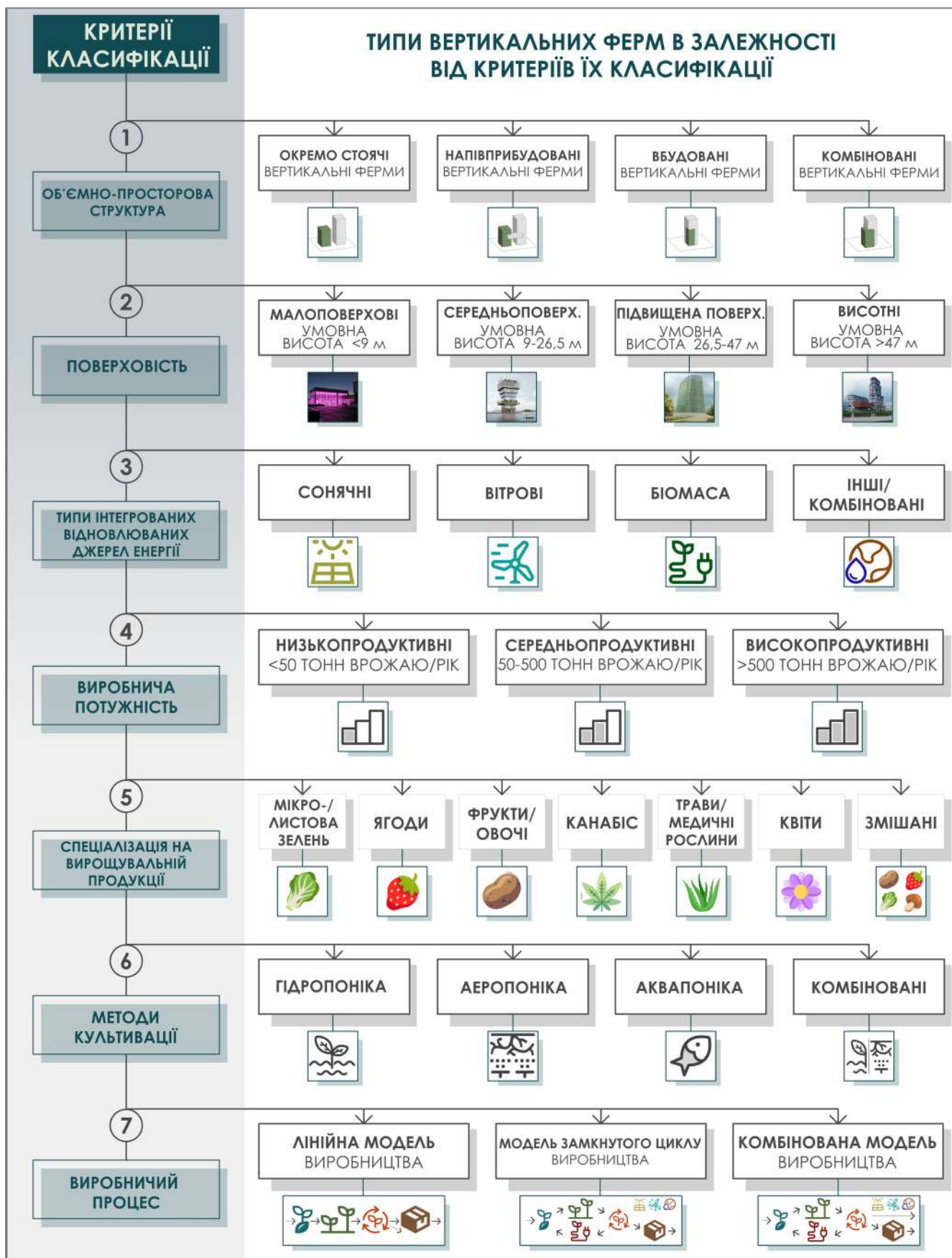


Рис. 1.3.2 Класифікація вертикальних ферм за архітектурними та операційними критеріями

Мікро- та листові зелені, такі як салат, рукола, шпинат чи капуста, є наразі найпоширенішими рослинами, що пояснюється їх коротким циклом росту, високою ринковою вартістю та здатністю швидко адаптуватися до контрольованих середовищ [166]. Натомість, різновид ягідної продукції у комерційному масштабі наразі переважно обмежується полуницею через її сприятливі фізіологічні характеристики для адаптації до умов контрольованого середовища [166].

В свою чергу, асортимент фруктів та овочів демонструє ширший спектр культур, таких як помідори, огірки, картопля, горох і перець [166]. Окрім традиційних продовольчих культур, вертикальні господарства також можуть використовуватися для вирощування лікарських рослин та канабісу, що має як медичне, так і рекреаційне або промислове застосування.

Наступним параметром, характерним для вертикальних ферм, є вибір технології вирощування серед яких – гідропоніка, аеропоніка, аквапоніка та комбіновані системи [167].

Останнім критерієм є форма організації виробничого процесу, яка може бути класифікована залежно від рівня циклічності використання ресурсів й інтеграції відновлюваних джерел енергії: лінійна, замкнутого циклу та комбінована.

Лінійна модель виробництва характеризується відсутністю системи переробки відходів ферми. Такий підхід є технологічно менш складним і простішим у впровадженні, але основним його недоліком є значне утворення відходів, що створює тиск, як і на навколишнє середовище, так і на муніципальні системи, які мають забезпечити подальшу утилізацію.

Модель замкнутого циклу передбачає повну переробку відходів у межах господарства, що забезпечує створення самодостатньої структури. Основою такої моделі є технології валоризації відходів, включаючи біогазові реактори, системи рециркуляції фільтрату та перетворення органічних решток на добрива чи енергію. Крім того, такий підхід також передбачає інтеграцію додаткових відновлювальних джерел сонячної чи вітрової енергії й збору дощової води.

В свою чергу, комбінована модель поєднує елементи лінійної моделі та замкнутого циклу, балансує між практичними та економічними аспектами.



Рис. 1.3.3 Функціонально-архітектурна класифікація вертикальних ферм

Окрім загальної класифікації, вертикальні ферми також можуть бути розподілені за критерієм функціональної інтеграції в міське середовище (рис. 1.3.3). Дана архітектурна класифікація розглядає, яким чином ці об'єкти поєднують виробництво з супутніми урбаністичними системами, розширюючи свій функціональний вплив за межі базового агро-продовольства. У межах цієї класифікації виділяють дві основні категорії: функціональне доповнення та функціональну кооперацію.

Відповідно, функціональне доповнення вертикальних ферм передбачає їх позиціонування як первинних об'єктів, які інтегрують додаткові функціональні можливості для розширення спектра їх використання. Такий підхід дозволяє вертикальним господарствам виконувати низку додаткових завдань у міському середовищі, зберігаючи базову функцію виробництва харчових продуктів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню їх економічної ефективності, соціального значення та екологічної стійкості. В межах даної категорії передбачаються додаткові підкатегорії, серед яких – наукове, соціально-громадське, освітнє та комерційне доповнення.

Відповідно, наукове доповнення передбачає інтеграцію лабораторій, експериментальних зон вирощування, приміщень для моніторингу якості продукції та інженерних об'єктів. Такий підхід спрямований на створення умов для проведення досліджень і розробки інноваційних агротехнологій, що мають на меті підвищення продуктивності та сталості сектору.

Соціально-громадське, в свою чергу, передбачає інтеграцію зон рекреації, озеленення, елементів ландшафтного дизайну, а також багатофункціональних відкритих площ. Ці складові спрямовані на трансформацію вертикальних ферм у громадські центри, сприяючи збільшенню функціонального різноманіття та відкритості системи.

Освітня допоміжна функція новітніх агро-підприємств може бути реалізована через створення інтерактивних музеїв, експозиційних залів, демонстрацій виробничих процесів, а також організацію навчально-освітніх

центрів. В довгостроковій перспективі подібні підходи також відіграють ключову роль у розвитку екологічно відповідальної та соціально орієнтованої спільноти.

Комерційне доповнення ферм може бути реалізоване через влаштування торгових мереж (супермаркети, мінімаркети), закладів громадського харчування (кафе, ресторани) та інших просторів (мультифункціональні зони, коворкінги). Така інтеграція сприяє оптимізації транспортної логістики, зменшенню пов'язаних із цим викидів вуглецю, а забезпечення споживачів свіжою продукцією безпосередньо у місцях реалізації, а також створенню джерел додаткових фінансових надходжень.

Натомість, друга категорія - функціональна кооперація стосується співіснування або інтеграції вертикальних ферм із існуючими будівлями і спорудами міського середовища. Цей підхід забезпечує багатофункціональність міських просторів і дозволяє оптимізувати використання існуючих ресурсів та інфраструктури завдяки симбіотичній співпраці об'єктів такої системи. Дана категорія включає в себе такі типи кооперації, як: наукова, соціально-громадська, промислова та комерційна.

Відповідно, наукова кооперація передбачає інтеграцію цих об'єктів у комплекси лабораторій, науково-дослідницьких центрів, університетів та ботанічних садів. В свою чергу, це забезпечує створення експериментальних майданчиків для апробації інноваційних технологій у сфері рослинництва у контрольованому середовищі.

Соціальна та громадська кооперація передбачає інтеграцію таких ферм у структури офісних і торговельних центрів, громадських будівель, а також закладів освіти. У таких випадках ферми можуть виконувати роль або автономних об'єктів із виробничою функцією, або елементів «зеленого» дизайну середовища чи місцевих систем забезпечення харчовою продукцією.

В українському контексті дана кооперація набуває особливого значення, враховуючи необхідність забезпечення продовольчої безпеки під час кризових ситуацій. Зокрема, інтеграція вертикальних ферм у структуру бомбосховищ

дозволяє організувати захищене виробництво продуктів харчування, що є життєво важливим у періоди військових конфліктів та інших надзвичайних обставин.

Метод промислової кооперації сприяє значному підвищенню ефективності безпосередньо самих виробничих процесів чи створенню нових типів підприємств, одночасно забезпечуючи раціональне використання ресурсів. Однією з ключових переваг такої співпраці є адаптація існуючої промислової інфраструктури для потреб вертикального фермерства, що дозволяє знизити витрати на нове будівництво і відповідно мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Натомість, рефункціоналізація старих промислових приміщень для створення вертикальних господарств є також прикладом циркулярної економіки, що передбачає скорочення споживання нових будівельних матеріалів, відновлення функціональності об'єктів та збереження архітектурної спадщини.

Останній тип кооперації – комерційний відкриває широкі можливості для інтеграції вертикальних ферм у супермаркети, заклади громадського харчування та культурні установи. Наприклад, розташування агро-господарств у межах супермаркетів чи ресторанів дозволяє значно скоротити витрати на транспортування продукції, забезпечуючи споживачів надсвіжими продуктами харчування та сприяючи підвищенню еко-ефективності логістичних процесів.

Таким чином, сформована теоретична систематизація вертикальних ферм слугує фундаментальною основою даного напрямку, а також закладає базу для подальших досліджень в межах цієї роботи. Проведений аналіз чинників, що впливають на формування вертикальних господарств, а також запропонована класифікаційна модель, закладають наукове підґрунтя для розробки інноваційних рішень, що мають на меті підвищення екологічної стійкості таких об'єктів, їх ефективної інтеграції в урбаністичне середовище та оптимізацію архітектурно-просторової організації.

Висновки по першому розділу

1. Вдосконалено термінологічну базу поняття вертикальних рослинницьких господарств та пов'язаних концепцій щодо особливостей стійкого розвитку та ефективного архітектурного планування таких систем.

2. Досліджено основні тенденції розвитку вертикальних ферм, які виявили, що зростання населення, зміна клімату, урбанізація та проблеми сталого розвитку традиційного сільського господарства обумовлюють необхідність впровадження будівель вертикальних агро-комплексів, що здатні адаптуватися до глобальних змін.

3. Статистичний аналіз кількісних та якісних показників вирощування продукції у вертикальних господарствах продемонстрував, що даний підхід є доцільним з точки зору стабільності, захищеності, продуктивності та ефективності використання ресурсів порівняно з тепличними та ґрунтовими угіддями, але обмежується економічними та екологічними проблемами – витратами на будівництво та експлуатацію, а також пов'язаним вуглецевим слідом.

4. Аналіз наукових досліджень встановив, що роботи Д. Деспом'є та Т. Козаї можна вважати основоположними щодо базової архітектурної концепції таких об'єктів, проте фундаментальні теоретичні та практичні рекомендації містобудівної, функціонально-планувальної та об'ємно-просторової організації таких будівель наразі відсутні.

5. Аналіз нормативної бази виявив потребу у адаптації та розробці будівельних норм та галузевих стандартів пристосованих до комплексних особливостей вертикальних ферм, оскільки існуючий ДБН В.2.2-2:2024 «Теплиці і парники» є недостатнім та обмежуючим для регулювання такого типу агробудівель, адже розглядає лише теплиці та парники, які визначаються, як одноповерхові споруди із світлопрозорими огорожуючими конструкціями.

6. Проведений аналіз вітчизняного стану розвитку вертикальних ферм встановив, що в Україні налічується 9 основних агропідприємств такого типу в різних регіонах, що включають тепличні, вбудовані в будівлі та контейнерні

вертикальні ферм, з визначальною особливістю у вигляді підземного розташування задля безпекових цілей відповідно до загроз війни.

7. Аналіз міжнародного досвіду будівництва та проектування вертикальних рослинницьких господарств виявив, що такі будівлі характеризуються використанням багатофункціональних, стійких та енергоефективних рішень, легких напівпрозорих конструкцій та міським розміщенням, проте їх неефективне просторове планування значно знижує стійкість функціонування системи та оптимізацію розподілення потоків.

8. На основі попередніх досліджень, було сформульовано та доповнено основні фактори, що впливають на формування вертикальних ферм та їх три основні категорії: природо-кліматичні (місцеві середовищні умови, трансформуючий вплив зміни клімату); техногенні (деградація земель та виснаження природних ресурсів внаслідок людської, промислової та військової діяльності); антропогенні (загальні демографічні та соціальні тенденції).

9. Уточнено класифікацію вертикальних господарств за наступними показниками: (1) архітектурними та експлуатаційними критеріями, як об'ємно-просторова структура, поверховість, типи інтегрованих відновлюваних джерел, виробнича потужність, вирощувана продукція, технологія культивування та організація виробничого процесу; (2) функціональною організацією – функціональне доповнення (ферма є первинним об'єктом) або функціональна кооперація (ферма – вторинний об'єкт) для наукових, громадських, освітніх, комерційних або промислових цілей.

РОЗДІЛ II

МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ ЕФЕКТИВНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ АГРОКОМПЛЕКСІВ

2.1 Методика проведення дослідження

Результати, представлені у попередньому розділі, заклали фундаментальну основу для аналізу та розробки об'єктів вертикального фермерства. При цьому визначено ключові проблемні аспекти, що вимагають вдосконалення, а саме: значні капітальні витрати, обмежена екологічна стійкість і недостатня архітектурна ефективність. Тож, для вирішення зазначених питань у цьому дослідженні розроблено системно структуровану методологію, яка інтегрує інноваційні принципи проєктування, теоретичний аналіз, емпіричні дослідження та експериментальне моделювання (рис. 2.1.1).

Більше того, встановлені питання свідчать про необхідність впровадження міждисциплінарного підходу, який забезпечить узгодженість між архітектурно-будівельним середовищем і технологіями агропромислового виробництва. У такий спосіб, це також відповідає безпосередньо самій концепції будівель вертикальних ферм, що синтезують в собі такі багатогранні аспекти.

Перш за все, проєктування промислових споруд має відповідати низці функціональних, технічних, архітектурно-художніх, економічних та екологічних вимог [50]. Зокрема, їх просторово-планувальні рішення мають бути співвідносними функціональному призначенню об'єкта та технологічному процесу, забезпечувати довговічність, міцність і раціоналізацію архітектурних рішень, створювати виразний художній образ та високу естетичну якість середовища, а також знижувати будівельні, експлуатаційні витрати та негативний екологічний вплив самого виробництва [50]. Отже, ці складові також визначають основоположні задачі формування стійких рішень для вертикальних рослинницьких агрокомплексів.

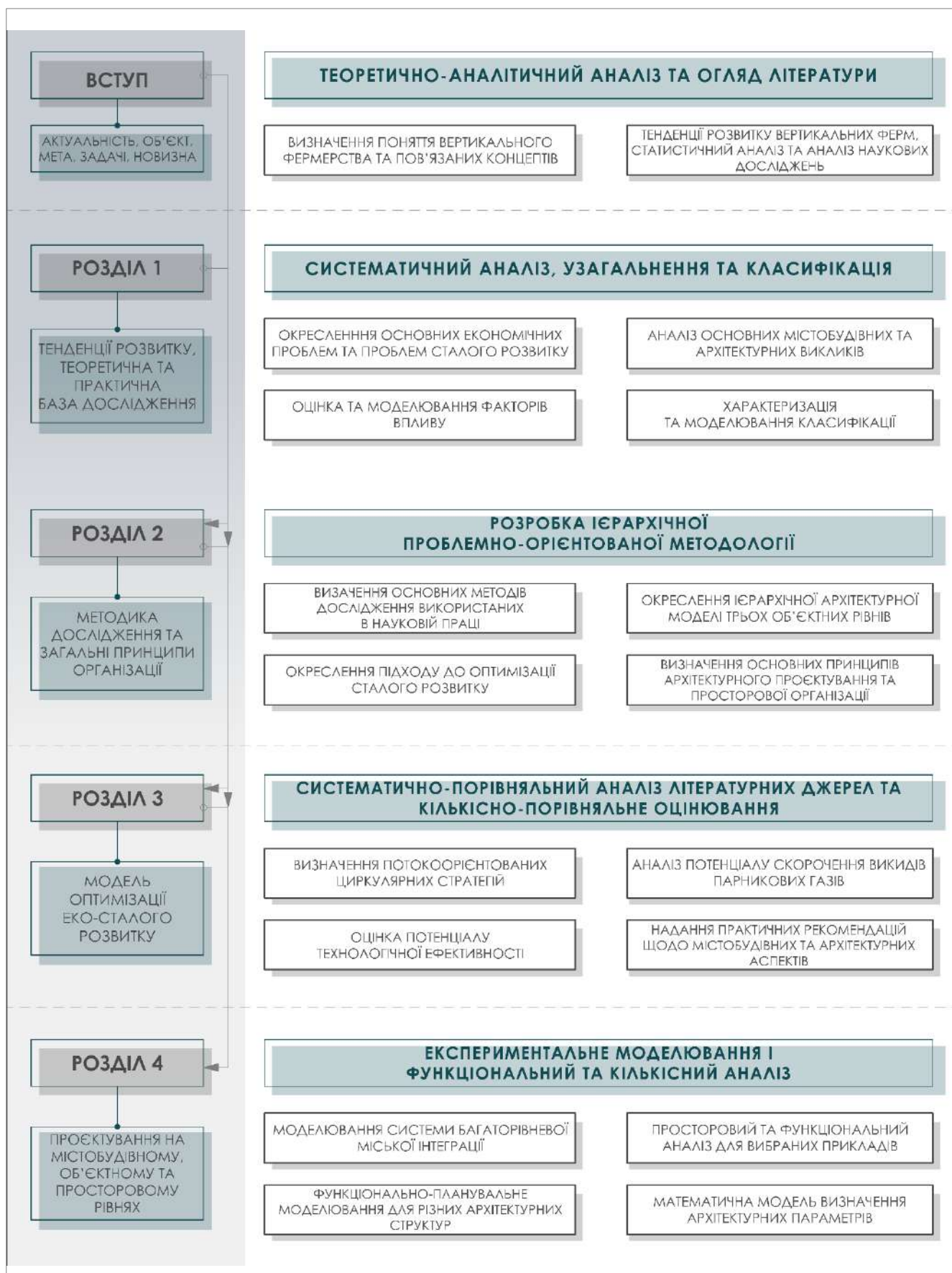


Рис. 2.1.1 Основні методи, використані в дослідженні відповідно до структури дисертації

Відповідно, у рамках дослідження запропоновано систематичну поетапну модель, яка забезпечує перехід від загальних підходів щодо організації структури вертикальних господарств до розробки спеціалізованих рішень [161, 168], орієнтованих на екологічну сталість та архітектурну ефективність.

Таким чином, основоположним завданням у межах даної методології є визначення фундаментальних принципів проектування, які мають охоплювати ключові аспекти всієї системи вертикальних агро-комплексів і забезпечувати їх сталий розвиток та ефективну інтеграцію в міське середовище.

Відповідно, запропоновано розробити дві взаємодоповнюючі групи принципів: перша зосереджена на економічній ефективності через оптимізацію ресурсів, багатофункціональність та адаптивність планування, із застосуванням кількісних методів оцінки проектних рішень; друга група орієнтована на гармонізацію та цілісність архітектурних рішень, що передбачає врахування містобудівного контексту, функціональної відповідності та естетичної виразності будівель. В свою чергу, такий двовекторний підхід забезпечує збалансованість між технологічною доцільністю та архітектурною якістю об'єктів вертикального фермерства.

На наступному етапі дослідження пропонується дві міждисциплінарні концепції, спрямовані на цілеспрямоване подолання ключових питань раціональної організації вертикальних рослинницьких комплексів. Перша концепція має на меті підвищення техніко-економічної ефективності та зменшення вуглецевого сліду виробничих процесів. Друга – фокусується на містобудівній та архітектурно-просторовій оптимізації проектних рішень таких об'єктів.

Відповідно, їхньою метою є розробка планомірних і комплексних підходів, які базуються на засадах циркулярної економіки [169, 170] та загальних принципах організації промислових будівель [50–53, 55, 59], зокрема, вертикальних ферм [34, 39, 46, 67, 68]. Запропоновані моделі містять практичні рекомендації, а розроблені стратегії характеризуються адаптивністю та можливістю пристосування до різних проектних умов і специфіки функціонування вертикальних господарств.

Для вирішення зазначених питань, пропонується використання концепції циркулярної економіки [169, 170]. У її основі лежать десять ключових принципів, відомих як «10 R-принципів», що покликані мінімізувати витрати ресурсів та енергії, одночасно підвищуючи ефективність виробничих процесів. Проте, основоположними для цього дослідження визначено три ключові концепції: скорочення («Reduce»), переробка («Recycle») та відновлення («Recover»).

Принцип «Reduce» спрямований на зменшення використання первинних потреб системи шляхом оптимізації технологічних процесів [169, 171, 172]. В свою чергу, «Recycle» акцентує на повторному використанні матеріалів та ресурсів, що сприяє зменшенню відходів [169, 173, 174]. Нарешті, принцип «Recover» передбачає залучення відновлюваних джерел енергії та перетворення вторинної сировини на корисні енергетичні ресурси [169, 175, 176]. Разом ці підходи є фундаментальними для підвищення сталості вертикальних фермерських господарств.

Відповідно, очікуваним результатом є розробка моделі сталого розвитку вертикальних господарств, орієнтованої на оптимізацію виробничих потоків та мінімізацію вуглецевого сліду через ефективне використання відновлюваних ресурсів і вторинної сировини. Методологічний підхід поєднує систематично-порівняльний аналіз літератури з кількісно-порівняльним оцінюванням [177–179] ефективності циркулярних стратегій щодо оптимізації основних потоків виробництва -- енергії, поживних елементів, води та вуглекислого газу. Такий комплексний підхід забезпечує обґрунтування оптимізаційних рішень з урахуванням специфіки функціонування вертикальних господарств [59].

Першочергово, було застосовано обмежуючі критерії відбору на етапі аналізу літератури. Дані критерії відбору та аналізу було диференційовано відповідно до кожного етапу даної частини дослідження: I) пошук літератури, II) первинний відбір та III) детальне опрацювання й аналіз.

Отримана база наукових публікацій була використана для систематичного аналізу стійких стратегій та їх кількісних показників. Пошуковий запит у базі даних Scopus® структуровано за схемою, що поєднує три категорії термінів через

булевий оператор "AND": (*[Терміни вертикального фермерства]*) AND (*[Терміни екологічних метричних показників]*) AND (*[Терміни еко-сталості для конкретних потоків]*)), терміни використані для пошукового запиту наведено у додатку В.

Для розширення пошуку застосовувались оператори наближення "*" і "?". Такий підхід забезпечив виявлення публікацій, що містять кількісну оцінку екологічної ефективності сталих стратегій у вертикальних господарствах, що було критично важливим для подальшого формування науково обґрунтованих рекомендацій.

Окрім цього, пошук також було додатково обмежено результатами, які включали зазначені терміни в назві, анотації або ключових словах із додатковими фільтрами:

– *Тип документа*: обмежувався оригінальними науковими статтями та публікаціями, виключаючи матеріали конференцій, розділи книг і неофіційну літературу, щоб забезпечити відповідність рецензованим стандартам.

– *Мова*: публікації англійською мовою.

– *Період*: до дати первинного пошуку — 10 листопада 2024 року для енергетичних потоків; 5 листопада 2024 року для поживних речовин; 1 грудня 2024 року для CO₂.

У результаті пошуку на першому етапі було виявлено 454 публікації (239 для енергії, 151 для поживних речовин, 64 для вуглекислого газу), що забезпечило значний обсяг інформації для подальшого аналізу.

Наступний критерій відбору етапу мануальної перевірки отриманих результатів базувався на наступних характеристиках:

– наявність порівняльних сценаріїв — одного базового сценарію (лінійні чи традиційні методології без застосування циркулярних стратегій) та альтернативного сценарію із впровадженням еко-стійких підходів;

– дослідження або додаткові матеріали містили інформацію чи розрахунки щодо частки загальної потреби в поживних речовинах, яка могла бути замінена або відновлена за допомогою застосованої циркулярної стратегії (або ці розрахунки могли бути виконані вручну на основі наданих даних);

– дослідження містило кількісні результати LCA, які порівнювали вплив базових та циркулярних стратегій із чітко визначеними межами системи та функціональними одиницями, а також/або кількісні результати техніко-економічного порівняння;

– дослідження фокусувалося на аеропоніці чи гідропоніці, виключаючи аквапоніку (поєднання гідропоніки з рибництвом).

В свою чергу, впровадження даних критеріїв відбору забезпечило виокремлення досліджень, які надають не тільки вичерпну кількісну оцінку ефективності циркулярних стратегій, але й надають можливості для подальшого уніфікованого аналізу одночасно виключаючи роботи поза межами даного дисертаційного напрацювання.

Фінальний 3-й етап включав якісні та кількісні розрахунки й оцінки встановлених архітектурних прийомів та технологічних рішень підвищення еко-стійкості вертикальних ферм. Зокрема, аналіз було проведено за такими показниками, як відносна технічна ефективність заміщення або відновлення конкретних ресурсів відповідно до визначених первинних потреб, потенціал відносного скорочення викидів парникових газів у порівнянні з співвідносною лінійною системою, а також факторів, які впливають на їх практичну ефективність і впровадження – методи культивування, особливості вирощування рослин, архітектурна структура будівлі або місцерозташування об'єкта (розділ 3.1).

Впровадження критеріїв відбору та оцінки дозволило систематизувати порівняння між дослідженнями через стандартизацію до відсоткових показників, що нівелювало розбіжності в абсолютних значеннях. Врахування додаткових параметрів, таких як функціональні одиниці, типи культур та характеристики об'єктів, забезпечило контекстуальну основу для точної інтерпретації результатів. Акцент на принципах циркулярної економіки обґрунтовано їх потенціалом одночасного вирішення економічних і екологічних викликів через оптимізацію використання ресурсів [169, 171, 174], зокрема валоризацію відходів та інтеграцію відновлюваних джерел, що створює передумови для довготривалого сталого функціонування вертикальних господарств [50].

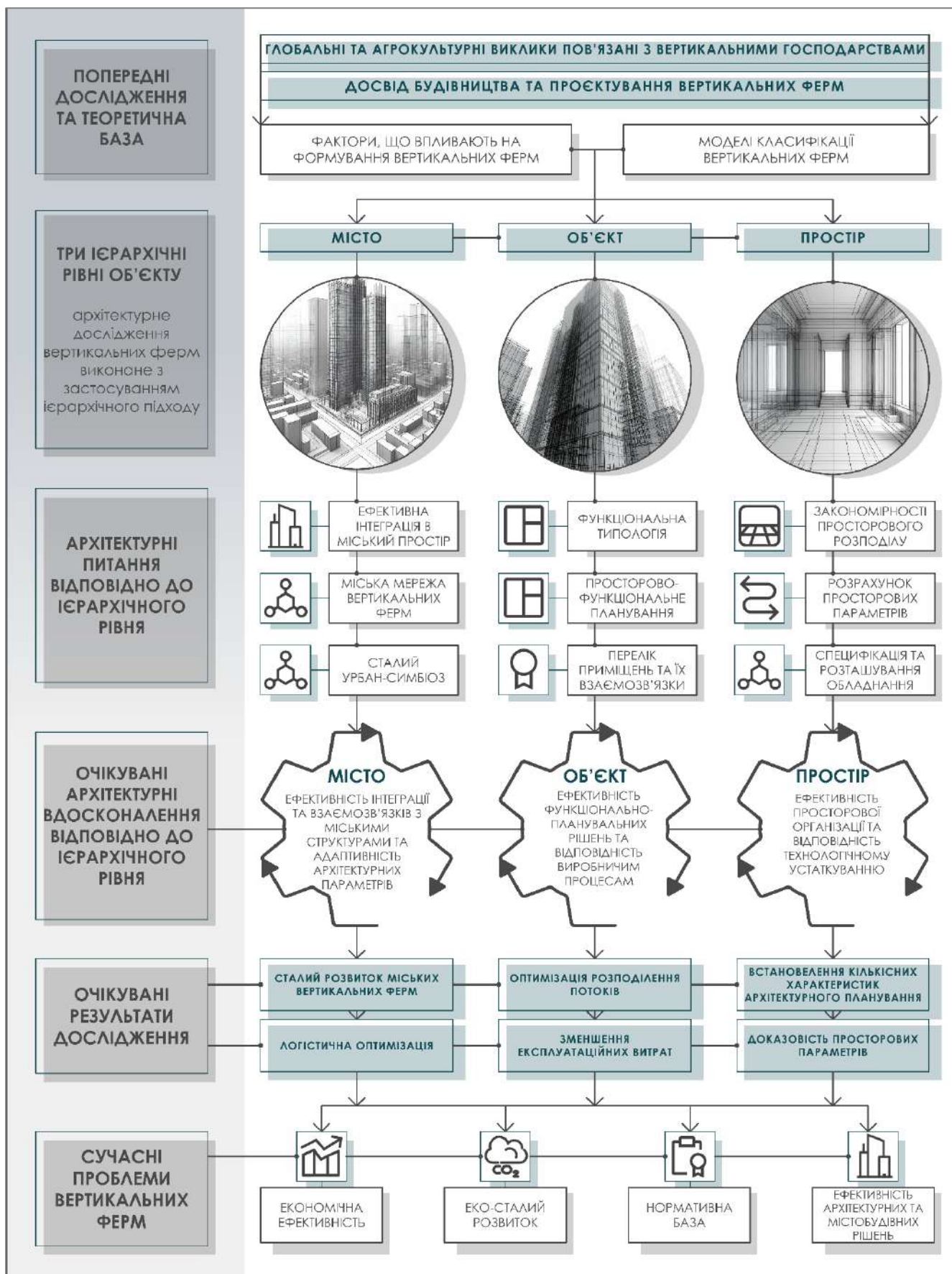


Рис. 2.1.2 Методологія архітектурного дослідження «трьох об'єктних рівнів»

Фінальний етап дослідження передбачає систематизацію визначених стратегій на основі порівняльного аналізу їх потенціалу щодо оптимізації ресурсів та архітектурної релевантності. Категоризацію запропоновано здійснювати за системою "Стратегія — Потік — Об'єктний рівень будівлі", що дозволяє структурувати як зовнішні, так і внутрішні підходи відповідно до їх архітектурних імплікацій та орієнтації на виробничі потоки.

На відміну від існуючих моделей, зосереджених на окремих сценаріях, запропонований підхід забезпечує комплексний аналіз екологічно доцільної просторово-планувальної організації вертикальних господарств у міському середовищі. Результатом такого підходу є створення практичних рекомендацій щодо містобудівного розміщення, функціонально-планувальної структури, просторових та технологічних рішень для агро-об'єктів, що враховують як технологічні вимоги виробництва, так і принципи сталого розвитку.

Усі окресленні напрацювання формують основу для розробки архітектурних систем вертикальних ферм, побудованих на принципах ієрархічності [161, 168], рис. 2.1.2. Окреслена наукова модель, орієнтована на поступову деталізацію, передбачає аналіз об'єкту дослідження на трьох рівнях: «місто» → «об'єкт» → «простір» [61]. Такий підхід дозволяє врахувати як загальні містобудівні вимоги, так і специфічні параметри просторово-планувальної організації агро-комплексів, забезпечуючи узгодженість проєктних рішень із урбан-структурою.

Застосування ієрархічного підходу є доцільним, оскільки кожен із його рівнів вимагає штучного втручання: «місто» – через брак установлених рекомендацій щодо інтеграції такого типу індустріальних споруд в міський контекст та загальної структури розвитку містобудівної мережі вертикального фермерства; «об'єкт» – відсутності нормативної бази, функціональної типології і планувальних прийомів для подібних виробничих споруд; «простір» – через необхідність встановлення кількісних та якісних рішень просторових параметрів відповідно до технологічно-операційних особливостей вертикальних господарств.

На ієрархічному рівні «місто» запропоновано розробити структурно-графічну модель міської мережі вертикальних рослинницьких господарств ферм,

яка орієнтована на задоволення продовольчого попиту населення [64]. Відповідно, однією із головних задач даної структури є оптимізація місця розташування таких об'єктів, що повинна враховувати не лише близькість до точок збуту, а й загальні особливості міського середовища й безпосередньо самих будівель ВФ, скорочуючи логістичні витрати та пов'язані екологічні наслідки.

Таким чином, мережа вертикальних ферм має враховувати продовольчі, архітектурні, логістичні та соціальні складові міста. У цьому контексті пропонується засновати дану модель на фундаментальних напрацюваннях щодо розвитку містобудівних систем В. Кристаллера [62], М. Крістофера [64] та К. Харріса і Е. Ульмана [65].

Зокрема, теорія центральних місць В. Кристаллера пропонує ієрархічний розподіл послуг, який може бути адаптований для масштабування вертикальних ферм відповідно до їх потужностей чи інших співвідносних характеристик [62]. Аналогічно, модель багаторівневих ланцюгів поставок М. Крістофера також акцентує на багаторівневому виробництві відповідно до ринкового попиту [64], що є перспективним для вертикальних ферм у контексті динамічних умов міського середовища, що також впливає на розподіл споживачів продукції. У свою чергу, модель множинних ядер К. Харріса та Е. Ульмана, яка відображає еволюцію міст із декількома центрами активності [65], може бути використана для стратегічного децентралізованого розміщення вертикальних ферм у різних функціональних зонах з урахуванням місцевих потреб кожного центру.

На рівні «об'єкт» важливим завданням є розробка функціональної організації вертикальних ферм відповідно до встановлених міських категорій. Даний масштаб також передбачає створення прототипно-планувальних схем, що відповідають технологічним процесам, а також враховують різні архітектурні структури будівлі [180, 181]. В свою чергу, теж необхідно визначити основний набір приміщень із чіткими правилами щодо їх розміщення та функціонального зонування.

Таким чином, ці заходи мають на меті вирішити питання неузгодженості архітектурних рішень із виробничими особливостями вертикальних агропідприємств завдяки ефективному зовнішньому та внутрішньому розподілу

потоків системи, зменшенню переміщення продукції, оптимізації транзитних площ та безпеці виробництва [50, 52, 61, 182].

На рівні «простір» визначення основних просторових параметрів має ґрунтуватися на відповідності операційним характеристикам та технологічним особливостям обладнання [50, 59]. Для досягнення поставленої мети застосовується змішана методологія, що поєднує кількісний архітектурний аналіз із математичним моделюванням [59, 161]. Відповідно, дослідження використовує двовекторний взаємопов'язаний підхід: дедуктивний – для визначення загальних закономірностей просторової організації через порівняльний аналіз існуючих об'єктів, та індуктивний – для формування математичної моделі взаємозв'язку між параметрами технологічного устаткування та архітектурними характеристиками будівлі, паралельно інтегруючи результати першочергового етапу [161, 183, 184].

Особлива увага приділяється методології кількісного аналізу [59, 60], яка охоплює функціональне зонування, розрахунок площі приміщень, висотних параметрів та об'ємних характеристик будівлі. Відповідно, в його основі архітектурний аналіз існуючих реалізованих проєктів вертикальних ферм. Таким чином, пропонується здійснити функціонально-статистичний огляд планувальних рішень, доповнений систематизацією ключових виробничих параметрів. Цей аналіз має на меті встановлення закономірностей у розподілі площ функціональних зон залежно від характеристик ферми, таких як загальна площа будівлі, сумарна площа вирощування та врожайність.

Запропонований підхід забезпечує базис для оптимального проєктування, дозволяючи впроваджувати ефективні просторово-планувальні рішення, які відповідають технічно вимогам обладнання та операційній специфіці [50]. Таким чином, він створює передумови для більш точної та обґрунтованої організації вертикальних господарств.

Окрім цього, високотехнологічний характер функціонування вертикальних господарств обумовлює необхідність інтеграції спеціалізованої інфраструктури, яка забезпечує безперервність виробничих процесів. У зв'язку з цим, проєктування

приміщень має враховувати специфічні характеристики такого обладнання, створюючи оптимальні умови для його експлуатації та технічного обслуговування.

Відповідно, недостатнє або надлишкове просторове планування негативно позначається на економічних і екологічних аспектах проєкту [59]. Надмірна площа зумовлює підвищені витрати на будівництво, збільшуючи обсяг задіяних ресурсів та матеріалів, що, в свою чергу, підвищує виснаження природних джерел та генерує асоційований вуглецевий слід. З іншого боку, недостатні розміри приміщень можуть створювати труднощі в експлуатації, знижуючи ефективність процесів, що в перспективі може призвести до фінансових втрат та технічних ускладнень.

Таким чином, раціональне проєктування має бути спрямоване на досягнення балансу між технологічними вимогами обладнання та просторовими параметрами [50, 51], що сприятиме оптимізації функціональної ефективності таких господарств.

Тож, зазначені міркування слугують підґрунтям для розробки математичного підходу щодо визначення архітектурно-просторових характеристик будівлі [59]. Ціль даного підходу полягає у встановленні залежності між визначеною сталою врожайністю ферми, технічними специфікаціями обладнання та просторовими параметрами.

Основними змінними у цьому контексті виступають площа в плані, висота приміщень і врожайність обраного модулю для культивації рослин. Передбачається, що ці параметри мають безпосередній вплив на розміри основного приміщення для вирощування, а також на загальну площу та об'єм будівлі.

Таким чином, у межах даного підходу запропонована система обчислення спрямована на вирішення таких завдань:

- визначення основного модуля або індикаторів, на основі яких здійснюється розрахунок просторових параметрів вертикальної ферми: кількісне визначення базових характеристик приміщень, таких як площа та висота, з урахуванням технологічних потреб;

- встановлення доказового та кількісного зв'язку між архітектурними особливостями об'єкта і технологічними характеристиками процесу вирощування:

забезпечення функціональної адаптації просторових рішень до специфіки виробничих процесів;

– розробка методик просторового планування вертикальних ферм: потенційну майбутню імплементацію у вигляді вдосконалення існуючих будівельних норм або їх адаптацію з урахуванням особливостей вертикального рослинництва .

Відповідно, наголошується на необхідності врахування взаємозв'язків між технічними й просторовими характеристиками, що є ключовим для формування ефективної архітектурної структури вертикального господарства [34]. Як наслідок, такі завдання мають сприяти інтеграції інноваційних підходів до архітектурного планування, що відповідають сучасним вимогам ефективності, стійкості та технологічності [50, 59].

Запропонована методологія архітектурного дослідження спрямована на розробку комплексних містобудівних, функціонально-планувальних і просторових рішень для вертикальних рослинницьких господарств. Завдяки інтеграції теоретичних моделей і емпіричних даних, цей підхід дозволяє адаптувати стратегічні рішення до різних ієрархічних рівнів — від міського планування до окремих структур та внутрішніх просторів.

Окрім цього, забезпечуючи системний підхід до вирішення проблем стійкості та архітектурної оптимізації, дослідження націлене на підвищення цілісності рішень щодо організації вертикальних ферм. Це сприяє не лише раціоналізації виробничих процесів, але й багатогранній інтеграції таких господарств у міське середовище як частини гармонійної урбаністичної інфраструктури [50, 52].

Даний дослідницький підхід формує багаторівневу систему, організовану за принципом «від загального до конкретного» [161, 168]. Ця система охоплює фундаментальні концептуальні засади, включаючи основоположні принципи організації, а також спеціалізовані проблемно-орієнтовані стратегії, що передбачають практичне впровадження визначених принципів.

Запропонована методологія забезпечує розробку гнучких та масштабованих рішень, спрямованих на вирішення ключових економічних, екологічних та архітектурних задач. Крім того, вона створює основу для сталого розвитку вертикального фермерства, як ефективної сільськогосподарської практики в урбанізованому середовищі. Результати дослідження також можуть слугувати підґрунтям для розробки нормативно-правової бази, яка сприятиме подальшій інтеграції та регулюванню подібних об'єктів у різних контекстах.

2.2 Засади проєктування сталих архітектурних рішень вертикальних рослинницьких господарств

Створення сталого дизайну вертикальних рослинницьких комплексів базується на впровадженні принципів, які враховують функціональність, міську інтеграцію, естетичну привабливість та економічну ефективність [50]. Таким чином, запропоновано дві фундаментальні групи принципів: економічної ефективності [67], рис. 2.2.1, спрямованої на оптимізацію витрат і продуктивності, та цілісності й гармонізації [68], рис. 2.3.1, яка, в свою чергу, забезпечує відповідність архітектурного середовища естетичним і функціональним вимогам у містобудівних умовах.

Синергічне впровадження усіх цих принципів формує основу для організації вертикальних рослинницьких господарств, які відповідають вимогам сталого розвитку архітектурних та продовольчих систем. Застосування цих засад дозволяє досягти збалансованості між виразністю будівлі, соціальною релевантністю, технологічною інноваційністю, екологічною сталістю та економічною доцільністю [12, 13, 50].

Перш за все, група економічної ефективності зосереджена на зменшенні капітальних та експлуатаційних витрат вертикальних рослинницьких комплексів шляхом впровадження різноманітних стратегій у проєктуванні. В свою чергу, ці стратегії спрямовані на адаптивне розширення системи, ресурсозбереження,

оптимізацію планувальної структури, а також забезпечення якості відповідних рішень [50, 59, 61, 63].

Реалізація усіх цих засад забезпечує гармонійне поєднання архітектурної форми, технологічних процесів виробництва та функціонального зонування, що, у свою чергу, сприяє підвищенню прибутковості та адаптивності комплексів до змінних умов експлуатації.

Дослідження даної групи розпочинається з першого принципу зовнішнього доповнення. Цей підхід, запропонований Стаффордом Біром у межах кібернетики та системного підходу [63], підкреслює, що закриті системи мають тенденцію до поступового саморуйнування. Отже, для уникнення такої проблеми, необхідно передбачити зовнішню відкритість та адаптивність системи, яка підтримуватиме її довгострокову життєздатність.

У контексті вертикальних господарств це реалізується шляхом впровадження багатофункціональних зон, орієнтованих не лише на виробничі завдання, а й на суспільно-культурні потреби, а також створення гнучких планувальних рішень та рівномірного розподілу інженерних систем. Такі підходи сприяють пристосування об'єкта до динамічних змін у соціально-економічному, містобудівному та адміністративно-організаційному контекстах.

Таким чином, розташування та контекстуальні особливості агро-ферм є вирішальними факторами, які впливають на особливості впровадження таких рішень. Зокрема, у разі інтеграції таких об'єктів у структуру міських соціальних просторів, відкриваються можливості для створення просторів, які включатимуть рекреаційні та комерційні зони, наприклад, кафе, супермаркети, музеї чи зелені насадження.

Такий підхід сприяє підвищенню громадської залученості, генерує додатковий дохід, знижуючи залежність від виробничих надходжень, а також забезпечує соціальну та культурну цінність. У цьому контексті принцип зовнішнього доповнення знаходить своє практичне застосування, забезпечуючи інтеграцію об'єкта в міський простір і підвищуючи його значущість у містобудівній структурі.

Окрім цього, внутрішні трансформації системи, такі, як зміни у виробничих потребах або технологічних аспектах вертикального фермерства, нерідко вимагають перегляду просторової організації обладнання та відповідних приміщень. Проте, у промислових умовах такі коригування можуть супроводжуватися значними витратами часу та ресурсів [50, 59]. Тож, з метою мінімізації цих затрат, доцільним є впровадження гнучких планувальних структур та децентралізованих інженерних систем. В свою чергу, такий підхід відповідає принципу зовнішнього доповнення [63] завдяки забезпеченню адаптивності архітектурного простору до внутрішніх перетворень.

Наступний принцип економії та заощадження ресурсів [34, 50, 170, 172] є також однією із ключових засад, що сприяє досягненню сталого функціонування вертикальних рослинницьких комплексів. Він передбачає реалізацію низки заходів, які охоплюють різні етапи проектування, будівництва та експлуатації об'єкта. Серед таких заходів вирізняються:

- варіативність функціонально-планувальної та об'ємно-просторової структури, яка включає розробку кількох архітектурних і функціональних моделей, що дозволяє обрати оптимальний варіант, адаптований до місцевих умов [59, 161, 181];

- оцінка якості проектних рішень шляхом застосування сучасних методик дослідження архітектурної доцільності та загальної стійкості системи [59, 60, 182];

- інтеграція відновлюваних ресурсів, які підвищують сталість будівлі та виробничих процесів [34, 39, 109];

- енергоефективні архітектурні прийоми, спрямовані на оптимізацію тепловитрат у межах будівлі [15, 185, 186].

Засади варіативності архітектурних рішень [59, 161, 181] реалізуються на початкових етапах проектування через розробку різноманітних архітектурно-планувальних моделей, що відрізняються за ключовими параметрами, такими як висота будівлі, площа будівлі та огорожуючих конструкцій, функціональна організація основних та допоміжних приміщень, використані матеріали, формоутворення та конструктивні рішення.

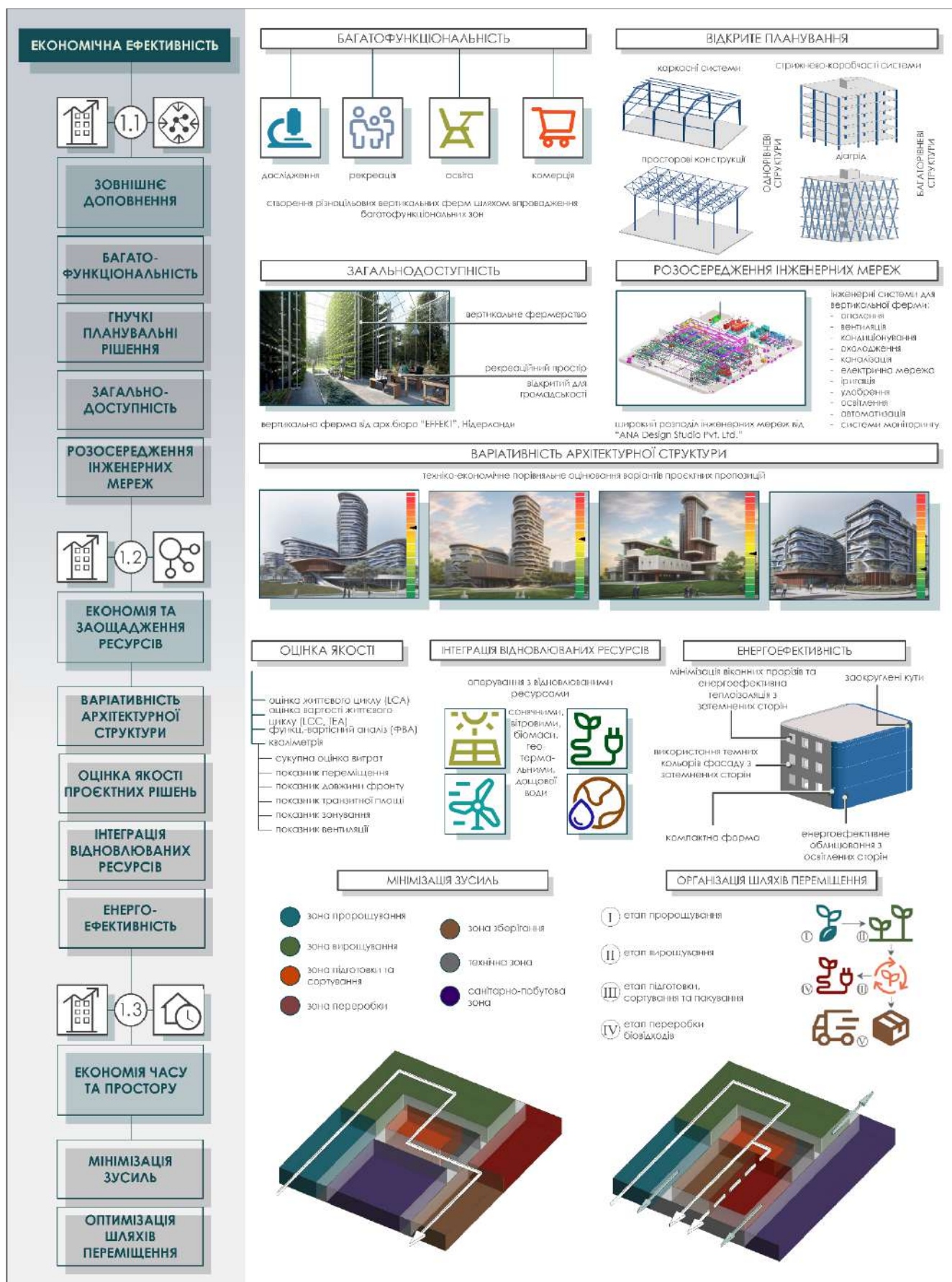


Рис. 2.2.1 Група принципів економічної ефективності архітектурно-просторової організації вертикальних рослинницьких господарств

Відповідно, такий підхід створює умови для вибору найоптимальнішої структури, яка узгоджується із специфічним екологічним, технічним та економічним вимогам конкретного проєкту. Обрана модель може бути адаптована до місцевих умов експлуатації через її інтеграцію з навколишнім середовищем, що також є важливою складовою ефективного проєктування будівель ферм.

В свою чергу, визначення доцільності вибору варіанту та раціональності архітектурного рішення промислової споруди має бути доказовим та базуватись на якісних та кількісних методах порівняльної оцінки [59]. Одним із таких підходів є техніко-економічне обґрунтування (ТЕО), що включає показники економічної, енергетичної та екологічної ефективності, а також є одним із обов'язковим елементів проєктної документації об'єкта будівництва [59, 187].

Раціональність просторово-планувальних рішень визначається їх відповідністю функціонально-технологічному призначенню об'єкта, що забезпечує оптимізацію витрат на будівництво та експлуатацію [59]. При цьому ТЕО розробляється на основі вихідних даних і обґрунтовує ключові проєктні рішення: виробничу потужність, номенклатуру продукції, забезпечення ресурсами, вибір ділянки будівництва, основні техніко-економічні показники (ТЕП), тощо [59, 187].

Таким чином, для вертикальних ферм, як для промислових споруд, обґрунтування архітектурної організації будівлі має базуватись на розрахунку та аналізу техніко-економічних показників, що включають наступні параметри: площа забудови, поверховість і висота поверху, будівельний об'єм, загальна і виробнича площа, питомі показники виробничої, допоміжної, загальної площі і будівельного об'єму, площі огорожуючих конструкцій, робоча, загальна площа та будівельний об'єм на одиницю потужності (врожайності), коефіцієнти. [59, 187].

Адаптуючи та доповнюючи систему об'ємно-планувальних коефіцієнтів ТЕП для громадських споруд [59], для будівель вертикальних рослинницьких господарств запропоновано використання наступних індикаторів для оцінки раціональності та технологічності рішень: (I) *коефіцієнт робочої площі* k_1 (рівняння 2.1), що характеризує співвідношення виробничих приміщень до загальної площі будівлі [59]; (II) *коефіцієнт робочого об'єму* k_2 (рівняння 2.2), який визначає

співвідношення будівельного об'єму основних виробничих зон до загального об'єму будівлі та є особливо актуальним для агро-ферм у яких приміщення вирощування займає висоту в декілька рівнів відносно стандартизованої висоти допоміжних зон; (III) *коефіцієнт продуктивності площі* k_3 (рівняння 2.3), що характеризує виробничу ефективність архітектурних рішень через співвідношення річної врожайності до загальної площі будівлі; (IV) *коефіцієнт продуктивності об'єму* k_4 (рівняння 2.4), який, аналогічно до попереднього індикатора, відображає вихід продукції відносно одиниці загального будівельного об'єму будівлі; (V) *коефіцієнт ефективності розміщення обладнання* k_5 (рівняння 2.5), який характеризує щільність розташування культиваційних модулів у виробничому приміщенні через співвідношення площі сліду культиваційного устаткування до площі приміщення вирощування; (VI) *коефіцієнт ефективності вирощування* k_6 (рівняння 2.6), що відображає оптимальність показнику вирощування у виробничих приміщеннях через відношення сумарної площі вирощування з усіх поверхонь культиваційних модулів до загальної площі приміщення вирощування.

$$(2.1) \qquad (2.2)$$

$$k_1 = \frac{S_{MC}}{S}, \qquad k_4 = \frac{Y}{V},$$

$$(2.3) \qquad (2.4)$$

$$k_2 = \frac{V_{MC}}{V}, \qquad k_5 = \frac{S_M \times N_M}{S_{MC}},$$

$$(2.5) \qquad (2.6)$$

$$k_3 = \frac{Y}{S}, \qquad k_6 = \frac{S_{TG}}{S_{MC}},$$

де: k_1 - коефіцієнт робочої площі будівлі вертикальної ферми;

k_2 - коефіцієнт робочого будівельного об'єму;

k_3 - коефіцієнт продуктивності площі;

k_4 - коефіцієнт продуктивності об'єму;

k_5 - коефіцієнт ефективності розміщення обладнання;

k_6 - коефіцієнт ефективності вирощування;

S_{MC} – сумарна площа виробничих приміщень, m^2 ;

S - загальна площа будівлі, м²;

V_{MC} - сумарний будівельний об'єм виробничих приміщень, м³;

V - загальний будівельний об'єм будівлі, м³;

Y - річна врожайність ферми, кг/рік;

S_M - площа сліду одного культиваційного модуля, м²;

N_M - кількість модулів;

S_{TG} - сумарна площа вирощування з усіх модулів, м².

Окрім цього, для оцінки якості та ефективності архітектурних рішень доцільно застосовувати засади кваліметрії, що забезпечить кількісну оцінку ефективності архітектурних рішень, за допомогою розрахунку різноманітних індикаторів: переміщення, транзитна площа, довжина фронту меблів, зонування та вентиляція, сукупна оцінка витрат, критерій якості, тощо [60, 181, 182, 188].

Проте, згідно з принципом визначальних ознак Г. Лаврика, доцільним є врахування лише основних чинників, що впливають на сталий розвиток та функціонування системи [161]. В контексті агро-промислових господарств, таким чинником виступає, в першу чергу, просторово-планувальна організація будівлі [59], що обумовлює оптимальне оперування технологічними процесами. Таким чином, для оцінки якості архітектурних рішень будівель вертикальних ферм пропонується використання індикаторів переміщення на додаток до досліджених коефіцієнтів раціональності та технологічності функціонально-планувальної структури.

Відповідно, індикатор переміщення характеризує динаміку руху працівників і продукції, та враховує такі параметри, як інтенсивність використання маршрутів, довжину пересування та їхню частоту [182]. Адаптуючи метод мінімізації переміщень за Д. Яблонським, розрахунок даного показника для виробничих приміщень вертикальних ферм запропоновано за наступною формулою:

(2.7)

$$N = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m P_{ij} L_{ij} J_{ij},$$

де: P_{ij} – інтенсивність потоку (кількість працівників або одиниць продукції, що переміщуються з i -ої до j -ої виробничої зони);

L_{ij} – ефективна довжина маршруту між виробничими зонами i та j , м;

J_{ij} – частота переміщень між виробничими зонами (кількість проходів або транспортувань продукції за зміну чи інший період).

Важливим компонентом ТЕО також є оцінка впливу на навколишнє середовище, що враховує екологічні аспекти проектної діяльності [59, 187]. Для даного аналізу застосовується методика оцінки життєвого циклу (англ. Life Cycle Assessment, LCA), що є багатоступеневою процедурою для встановлення кількісних параметрів впливу будівлі на довкілля протягом визначених термінів її експлуатації [189].

LCA для вертикальних ферм здійснюється відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044 у чотири етапи: визначення мети та області застосування із встановленням функціональної одиниці → інвентаризаційний аналіз та збір даних → розрахунок впливу через класифікацію і характеристикацію показників → інтерпретація та аналіз результатів [190, 191].

Таким чином, на першому етапі мета оцінки проекту агро-підприємства може визначатись, як порівняння проектних рішень, оптимізація ресурсоспоживання, обґрунтування екологічної стійкості будівлі [190, 191]. В свою чергу, область застосування встановлюється відповідно до періоду життєвого циклу господарства (наприклад, "cradle-to-gate" для аналізу операційної ефективності або "cradle-to-grave" для повного життєвого циклу будівлі). Функціональною одиницею може виступати: кілограм чи одиниця готової продукції; річний врожай з 1 м² площі вирощування; загальна площа будівлі чи продуктивність ферми за визначений інтервал часу, тощо.

Наступна стадія передбачає збір та систематизацію даних щодо: обсягів будівельних матеріалів та або конструктивних елементів (бетон, метал, скло і т.п.); специфікації інженерного та культивацийного обладнання (модулі вирощування, системи освітлення, клімат-контролю, іригації, тощо); споживання операційних ресурсів (енергія, вода, добрива, CO₂); та кількості і типів очікуваних відходів [190, 191]. Для кожного елемента визначаються співвідносні метричні показники (м², м³, л, кВт*год, кг, шт. і т.д.) на попередньо встановлену функціональну одиницю виміру. Разом ці дані вносяться до спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, SimaPro[®], OpenLCA[®] або One Click LCA[®] [192–194], із профільних або загальних баз даних таких, як ecoinvent[®] або GaBi[®] [190, 191].

Третій етап трансформує інвентаризаційні дані у кількісні значення екологічного впливу ферми. Відповідно, даний аналіз здійснюється автоматично програмним комплексом через стандартизовані показники за різноманітними категоріями, серед яких найбільш актуальними для ВФ є: викиди парникових газів або потенціал глобального потепління (GHG або GWP, кг CO₂-екв); виснаження абіотичних ресурсів (ADP, кг Sb-екв); евтрофікація (EP, кг PO₄³⁻-екв); окислення (AP, кг SO₂-екв); виснаження озонового шару (ODP, кг CFC-11-екв); споживання водних ресурсів (м³); та використання земельних ділянок (м²/рік) [190, 191].

Останній крок, який передбачає інтерпретацію отриманих результатів, спрямований на систематизацію та узагальнення проведеного аналізу з метою виявлення ключових аспектів впливу вертикальних ферм на навколишнє середовище [190, 191]. Цей процес дозволяє ідентифікувати критичні точки впливу, серед яких можуть бути застосування специфічних матеріалів чи обладнання або різні процеси пов'язані із спорудженням й оперуванням будівлею. Як наслідок, дані результати формують підґрунтя для обрання проблемно-орієнтованих стратегій, спрямованих на вирішення виявлених питань, а також можуть бути використані для порівняльної оцінки стійкості різних архітектурних рішень агро-об'єкту.

В свою чергу, однією із стратегій покращення сталості та ефективності функціонування ферми є імплементація відновлюваних ресурсів [34, 39, 109]. Для забезпечення економічно доцільних проєктних рішень таких об'єктів раціональним

є впровадження екологічно-орієнтованих технологій, що спрямовані на оптимізацію енергозабезпечення, теплопостачання, водовикористання, споживання поживних речовин і вуглекислого газу [111, 117, 192, 193].

Відповідно, до цих технологій належать фотоелектричні панелі, теплові насоси, системи збору дощової води та установки для переробки органічних відходів. Проте, конкретний вибір технологій, їх специфікація та інтеграція залежать від особливостей проєкту, включно з технічними та природньо-кліматичними умовами місцевості [84, 109, 194–202].

Фотоелектричні сонячні панелі та вітрові турбіни є найпоширенішими технологіями для забезпечення сталого виробництва електроенергії у вертикальних фермах [111, 117]. Окрім цього, біогазовий реактор є ефективним енергетичним ресурсом для вертикального фермерства, що також спрямований на зменшення відходів системи. Це досягається завдяки переробці органічних відходів фермерства на біогаз, що використовується для генерації електроенергії. Водночас він забезпечує додаткові ресурси для вирощування рослин, такі як вуглекислий газ (CO_2) і залишки води [89]. Ці вторинні продукти можуть бути інтегровані у виробничий процес, сприяючи замкненості циклів використання ресурсів та забезпечуючи відповідність принципам циркулярної економіки.

Окрім біогазового реактора, додатковими технологіями є організація системи збору дощової води через спеціальні колектори, розташовані на дахах або прилеглих територіях, що сприяє раціональному використанню водних ресурсів [39, 111, 117].

Відновлювані джерела тепла є теж важливим компонентом забезпечення економічної життєздатності та екологічної стійкості вертикальних ферм. Сонячні теплові колектори та геотермальні теплові насоси [203] забезпечують стабільне та відновлюване опалення приміщень. В свою чергу, котли на біомасі, що використовують органічні відходи [111, 117], є ефективним рішенням для одночасного перероблення відходів і генерації теплової енергії.

Додатковим засобом оптимізації теплопостачання є використання надлишкового тепла, що генерується світлодіодними лампами [193, 204]. За

допомогою теплообмінників це тепло може бути акумульовано та перенаправлено для підтримки оптимального температурного режиму в інших приміщеннях будівлі. Така інтеграція джерел тепла сприяє зменшенню витрат на опалення та покращує загальну енергоефективність ферми.

Узагальнюючи викладене, інтеграція відновлюваних джерел енергії, тепла, води та використання сучасних технологій дозволяє забезпечити будівлю та виробничі процеси необхідними ресурсами. Такий підхід створює умови для впровадження сталої системи замкненого циклу, що поєднує зовнішні відновлювані джерела енергії з внутрішньою валоризацією відходів [205]. Це не лише реалізує принципи економії та раціонального використання ресурсів, але й забезпечує екологічну, технологічну та економічну стійкість вертикальних ферм [50]. Подібна синергія технологій є фундаментальною для розвитку інноваційних моделей міського агровиробництва [50, 52].

Енергоефективні архітектурні методи є іще одним важливим підходом для підвищення функціональної та економічної ефективності будівель вертикальних ферм. Зокрема, орієнтація довгого фасаду на південну сторону та короткого — на північ дозволяє зменшити термовтрати. В свою чергу, мінімізація площі огорожувальних конструкцій та компактність форми будівлі (наближеної до куба) забезпечує раціональне використання матеріалів і підвищує тепло-акумуляцію [15, 185, 186].

Додатково застосовуються температурне зонування, використання облицювальних матеріалів, текстур та кольорів відповідно до терморегуляційних потреб, а також впровадження енергоефективної ізоляції [15, 185, 186]. Окрім цього, мінімізація площі скління на північному фасаді знижує втрати тепла, водночас заокруглення кутів сприяють оптимізованому обтіканню повітряними потоками [15, 185, 186]. Усі ці рішення допомагають уникнути завихрень та надмірної швидкості вітру, що знижує тепловтрати.

Останній принцип групи – принцип економії часу та простору [61, 182] є похідним від минулого, проте його відокремлено оскільки ці ресурси мають вирішальне значення для забезпечення ефективності самого виробництва. Ця

засада полягає у скороченні шляхів переміщення об'єктів (продукції, матеріалів) та суб'єктів (працівників) усередині системи, що оптимізує використання внутрішньої площі та знижує експлуатаційні витрати. Зокрема, проектування функціонально-планувальної структури вертикальної ферми повинно враховувати послідовність основних етапів виробничого циклу: (1) пророщування продукції → (2) вирощування → (3) підготовка, сортування та пакування врожаю → (4) переробка біовідходів → (5) тимчасове зберігання та відвантаження готової продукції.

Ретельне зонування та оптимізація руху продукції між зазначеними етапами сприяє підвищенню ефективності всіх операцій. Врахування зв'язків між технологічними процесами та мінімізація транзитних зон дозволяє зменшити затрати часу, ресурсу та трудовитрат [59, 61, 182]. Таким чином, принцип економії часу та простору забезпечує раціональне використання виробничих площ, сприяє скороченню операційних розходів і підвищенню загальної продуктивності вертикальної ферми.

Планування будівель вертикальних ферм має бути спрямоване на оптимізацію виробничих потоків і процесів [34, 50], імплементуючи попередньо означені принципи економічної ефективності. Зокрема, вхідні потоки включають матеріали, обладнання та ресурси для вирощування рослин (наприклад, добрива, поживні речовини, субстрат, насіння і т.д.). Вихідні потоки формуються з готової та упакованої продукції, а також відходів виробництва. У разі організації замкнутого циклу, частина відходів може бути утилізована в межах внутрішньої системи.

Перш за все, важливою умовою є розділення вхідних та вихідних потоків системи, забезпечення якої можливе завдяки облаштуванню окремих входів у будівлю та відповідних зон на прилеглий території

Організація шляхів переміщення органічної продукції у вертикальних фермах залежить від обраної просторової структури будівлі, яка може бути горизонтальною або вертикальною. У випадку горизонтальної структури виробничі зони організовуються за лінійною (конвеєрною) або циклічною схемою,

що забезпечує послідовність технологічного процесу. Функціональне зонування приміщень базується на оптимізації переміщення продукції, ресурсів і працівників.

Узагальнюючи розглянуті принципи економічної ефективності, можна стверджувати, що їх застосування є ключовим для забезпечення стійкості вертикальних ферм як сучасних сільськогосподарських об'єктів. Принципи зовнішнього доповнення, економії та заощадження ресурсів, а також оптимізації часу і простору спрямовані на створення економічно стійкої, адаптивної та функціонально ефективною структури. Їх практичне впровадження дозволяє оптимізувати витрати, забезпечити довготривалу експлуатацію об'єкта та максимально використати виробничий потенціал.

Інтеграція енергоефективних технологій та інноваційних архітектурних рішень не лише мінімізує екологічний слід виробництва, але й сприяє підвищенню економічної доцільності будівель [39, 205]. Зокрема, створення систем замкненого циклу, інтеграція відновлюваних джерел енергії та раціональна організація простору дозволяють досягти балансу між економічною вигодою та стійкістю. Таким чином, ці принципи стають основою для забезпечення довготривалої конкурентоспроможності вертикальних фермерських господарств.

Однак економічна ефективність є лише однією зі складових життєздатного проектування. Важливо також забезпечити естетичну, функціональну та соціальну інтеграцію вертикальних ферм у міський контекст, враховуючи їх вплив на навколишнє середовище та архітектурний баланс [50, 52]. Саме поєднання економічної раціональності з естетичною привабливістю та соціальною значущістю дозволяє забезпечити комплексну ефективність ВФ.

2.3 Гармонізація та цілісність як визначальні принципи об'ємно-просторової організації вертикальних ферм

Економічно ефективні засади проектування також включають питання естетичної та функціональної інтеграції об'єктів вертикальних ферм у міський простір. Врахування архітектурної гармонії є логічним продовженням розглянутих

раніше принципів, адже саме вони забезпечують баланс між забезпеченням функціональної відповідності і позитивним художньо-композиційним впливом на міський ландшафт, що створює цілісний об'єкт урбан-інфраструктури [50]. У цьому контексті вертикальні ферми мають слугувати не лише виробничими спорудами, але й естетично привабливими елементами міської структури, які втілюють сучасні архітектурні та технологічні підходи [50, 52].

Відповідно, група цілісності та гармонізації архітектурних рішень включає такі принципи, як контекстуалізм, симбіоз функції та форми, ототожнення конструкції та форми, гармонізацію об'ємно-просторових і фасадних рішень, а також впровадження інноваційних технологій [68], рис. 2.3.1. Зазначені засади спрямовані на формування інтегрованих і впізнаваних архітектурних рішень, які ефективно використовують внутрішній простір та загальну структуру, водночас підвищуючи комерційну цінність споруд завдяки об'ємно-просторовим, що також відповідає їхньому функціональному призначенню.

У ширшому контексті міського розвитку, сталий розвиток та підтримка архітектурної гармонії значною мірою залежать від ретельно продуманого проектування кожного компонента забудови [180]. Особливого значення це набуває під час інтеграції сучасних промислових споруд [52], зокрема вертикальних ферм.

Перш за все, такі інноваційні агропромислові комплекси демонструють високий потенціал у вирішенні завдання забезпечення міського населення якісною харчовою продукцією [34]. Водночас, їх ефективне функціонування часто вимагає значних територіальних ресурсів, що суттєво впливає на формування міського середовища. Інтеграція таких споруд у сформовану забудову передбачає вирішення низки архітектурно-містобудівних завдань, серед яких забезпечення гармонійного та естетичного поєднання вертикальних ферм із міським ландшафтом без втрати їх промислової функціональності.

Таким чином, перший принцип – контекстуалізм (рис. 2.3.1, 2.1) – спрямований на врахування впливу навколишнього середовища та існуючих особливостей міської забудови в процесі архітектурного проектування [52].

Оскільки вертикальні ферми належать до агропромислових споруд, які інтегруються в різноманітні міські ландшафти, їхній зовнішній вигляд повинен гармонійно відповідати архітектурному контексту. Водночас така гармонія не повинна перешкоджати виконанню функціональних завдань ферми.

Відповідно до даного принципу, основними детермінантами архітектурно-просторового планування ферми є місцеві містобудівні умови, які включають обмеження щодо висотності, відстаней між будівлями та інших нормативних параметрів (рис. 2.3.1, 3), а також характеристики прилеглої забудови [52]. Зокрема, беруться до уваги функціональне призначення сусідніх споруд, їх висота, архітектурний стиль та матеріали оздоблення.

Містобудівні обмеження, серед яких ключовими є гранична висота будівель, мінімальні відступи від меж земельної ділянки та інших об'єктів [52], істотно впливають на параметри розміру та місце розташування вертикального господарства. У разі відсутності нормативних обмежень по висоті раціональним рішенням є багатоповерхова організація структури будівлі. Такий підхід сприяє максимально ефективному використанню горизонтального простору та забезпечує високу продуктивність на обмеженій території.

З архітектурно-просторової точки зору найдоцільнішими є три типи просторової організації: окремо розміщена структура (всі функціональні блоки розташовані в одній будівлі), прибудована (вертикальна ферма та допоміжні приміщення функціонально поєднані), а також вбудовано-прибудована (частина допоміжних приміщень винесена за межі основної будівлі) [164]. Вибір типу структури залежить від умов забудови, обмежень ділянки та виробничих потреб.

У разі наявності обмежень щодо максимально допустимої висоти забудови доцільним рішенням є проектування малоповерхової вертикальної ферми [52]. Просторове планування таких будівель зазвичай виконується у формі прямокутника, квадрата або їх модифікацій з внутрішнім відкритим двором чи вирізом. Такий підхід забезпечує оптимальну організацію функціональних зон та виробничих процесів, зберігаючи їх адаптивність до встановлених містобудівних вимог і обмежень.



Вертикальна ферма може виконувати роль композиційного та естетичного акценту території за умови (рис. 2.3.1, 1), що навколишня забудова не має чітко виражених домінант [52]. З точки зору об'ємно-просторової структури, акцентність такої споруди досягається шляхом створення великої висоти або значної масивності, наприклад, через об'єднання кількох елементів у єдину монолітну композицію [206, 207]. Водночас важливо враховувати вплив подібного об'єкта на санітарно-гігієнічні умови, місцевий мікроклімат [208, 209], зокрема утворення вихорів, посилення вітрових потоків, створення тіньових бар'єрів, та його інтеграцію в загальний композиційний ансамбль міського простору, особливо в межах громадських центрів.

Важливим аспектом інтеграції вертикальної ферми у міське середовище є дотримання масштабу навколишньої забудови [206]. Для гармонійного сприйняття споруди, її архітектурної концепції та забезпечення естетичного балансу об'ємно-просторової композиції рекомендується організація прилеглих громадських просторів, таких як великі сквери або парки. Подібні рішення сприяють формуванню комфортного середовища, відкривають архітектурний об'єкт для огляду з різних точок зору та створюють візуальну рівновагу між новою спорудою та існуючою забудовою.

При проектуванні вертикальної ферми як другорядного композиційного елемента міської забудови (рис. 2.3.1, 1), необхідно враховувати висотний регламент сусідніх будівель. Для створення гармонійного об'ємно-просторового співвідношення рекомендується адаптувати висоту споруди, роблячи її на один-два поверхи вищою або нижчою за прилеглі об'єкти.

Важливим аспектом є дотримання горизонтального членування фасадів, яке повинно відповідати рівням поверхів сусідніх будівель, що може бути складним завданням у випадках різних типів забудови (житлової, комерційної чи промислової). У такому випадку раціональним рішенням є проектування висоти одного поверху ферми, яка дорівнює висоті двох-трьох поверхів прилеглих будівель, враховуючи специфіку технологічних процесів та функціональне призначення.

Наступним ключовим принципом, що визначає архітектурні рішення для вертикальних ферм, є принцип симбіозу функції та форми (рис. 2.3.1, 2.2). Цей підхід базується на інтеграції зовнішнього вигляду споруди з її функціональним призначенням [50, 51], що включає вирощування рослин і виробництво їстівної продукції. Архітектурна форма будівлі повинна відображати її технологічну сутність, підпорядковуватись виробничим вимогам та забезпечуючи зручність експлуатації [50, 51].

Наприклад, специфічне обладнання для вирощування рослин потребує значного внутрішнього об'єму та відкритих просторів, що обумовлює висотність приміщень. У багатоповерхових конструкціях вертикальна організація виробничих приміщень забезпечує раціональне використання площі, а також сприяє створенню архітектурного акценту через домінуючий вертикальний силует будівлі [34]. Такий підхід дозволяє гармонійно інтегрувати функціональність і естетику, підкреслюючи роль вертикальної ферми у міському середовищі.

Архітектурна виразність малоповерхових вертикальних ферм значною мірою залежить від обраного типу організації виробничих процесів [50, 51], який може бути лінійним або кільцевим. Лінійна організація характеризується невикористанням відходів та надлишків у повторному виробничому циклі. У цьому контексті найбільш доцільним є планування будівлі у формі витягнутого прямокутника, що відповідає послідовності технологічного процесу та сприяє раціональному розподілу зон вхідних і вихідних потоків.

Натомість кільцевий тип організації, який передбачає повторне використання відходів у виробничому процесі, обумовлює інший підхід до формоутворення. У такому випадку оптимальним рішенням є форма, близька до квадрата, що забезпечує зручну організацію виробничих зон, сприяє економії площі та оптимізації процесів.

Фасадні рішення сучасних промислових будівель базуються на використанні простих геометричних форм, ритмічних композицій та чіткого модульного членування, що сприяє створенню єдиного архітектурного образу, який виразно передає функціональне призначення споруди [210]. Основними тенденціями в

архітектурі фасадів вертикальних ферм є домінування лінійних форм, структурної ритмічності та горизонтального членування, що підкреслюють їх індустріальний характер (рис. 2.3.1, 4-7).

Крім того, застосування зелених кольорів, інтеграція світлового оформлення та використання скляних оболонок у виробничих зонах дозволяють створити асоціативний зв'язок з процесами вирощування рослин, які є основою вертикального фермерства (рис. 2.3.1, 4-7). Лаконічне оздоблення допоміжних приміщень доповнює цей образ, забезпечуючи естетичну та функціональну гармонію фасадного рішення вертикальних господарств.

Принцип ототожнення конструкції та форми передбачає розробку конструктивних рішень, у яких архітектурний об'єм гармонійно взаємодіє зі структурними елементами, підтримуючи функціональне призначення будівлі [50–52]. Технологічні особливості вертикальних ферм значною мірою впливають на вибір таких конструктивних систем, що водночас визначають просторову організацію та зовнішній вигляд будівлі.

Особливо це характерно для одноповерхових комплексів, у яких висота споруди облаштовується згідно з параметрами гідропонних чи аеропонних систем, які, в свою чергу, можуть досягати 15 метрів [211–213]. Такий підхід сприяє досягненню високих показників ефективності, оптимізуючи використання площі приміщення для вирощування культур.

Застосування відкритих каркасних конструкцій, таких як ферми, арки чи балки, дозволяє створювати легкий, але цілісний архітектурний образ, що поєднує естетику з функціональною стійкістю споруди. Окрім цього, використання просторових конструкцій, таких як оболонки чи складчасті форми, дозволяє забезпечити пластичність і об'ємність фасадів, підкреслюючи скульптурність архітектурних елементів. Гра світла і тіні на поверхнях таких елементів посилює візуальну привабливість будівлі, акцентуючи її естетичну унікальність. Ці типи конструктивних систем є оптимальними для промислових об'єктів на кшталт вертикальних ферм, адже вони не лише відповідають необхідним параметрам висоти, але й забезпечують створення відкритого, вільного внутрішнього простору.

Така архітектурна гнучкість дозволяє адаптувати приміщення вертикальної ферми до змінних потреб, що є важливим елементом стійкості споруди. Водночас, впровадження подібних рішень підтримує реалізацію принципу зовнішнього доповнення [63, 67], сприяючи сталій інтеграції будівлі у міське середовище [61, 67].

Для забезпечення адаптивності та гнучкості багатоповерхових і висотних будівель ферм доцільним є застосування конструктивних систем стрижневого, оболонкового або стрижнево-коробчастого типу [214]. Такі системи забезпечують рівномірне розподілення навантаження та дозволяють створювати чітко структуровані просторові блоки із відкритим плануванням, що відповідає потребам технологічного процесу.

В такому випадку, конструктивні елементи, зокрема несучі колони та перекриття, завдяки своїй модульній природі формують чіткий ритм та членування, що візуально структурує фасад та сприяє гармонізації і статичності архітектурного образу (рис. 2.3.1, 8).

Окремо слід зазначити, що використання каркасів діагрідного типу значно підсилює естетичну привабливість будівлі [11, 215]. Геометричне "мереживо", утворене такими системами, створює ефект легкості та інтерактивності, а складна текстура фасадів акцентує гру світла і тіні, забезпечуючи динамічність архітектурного виразу (рис. 2.3.1, 9). Подібний підхід підтримує реалізацію принципів гармонізації, забезпечуючи відповідність між зовнішньою формою, внутрішньою функціональністю та естетичною виразністю.

Наступний принцип гармонізації об'ємно-просторових і фасадних рішень спрямований на досягнення збалансованості між зовнішньою естетикою будівлі, її об'ємно-просторовою організацією та функціональною різноманітністю. Реалізація цих засад в архітектурі вертикальних ферм досягається завдяки використанню композиційних прийомів, таких як контраст і нюанс у ритмі фасадних елементів, симетрія чи асиметрія у структурній організації, а також статичність чи динамічність у загальному формоутворенні будівлі [206].

Такі підходи забезпечують узгодженість між архітектурним дизайном і технологічними вимогами. Наприклад, контраст між матеріалами або кольорами фасаду може підкреслювати функціональні зони споруди, тоді як використання ритмічного поділу конструктивних елементів допомагає створити впорядкований і гармонійний вигляд (рис. 2.3.1, 10, 11). Завдяки цьому вертикальна ферма інтегрується в міський контекст як елемент дизайну середовища, зберігаючи як свою промислову функціональність, так і естетичну виразність.

Реалізація принципу гармонізації може також включати використання елементів архітектурного експресіонізму, які дозволяють висловити функціональні особливості споруди через дизайн фасадів [216]. Зокрема, кольорові та текстурні рішення фасадів можуть відображати асоціації з вирощуваними культурами, передаючи різноманітність кольорової гами та фактур, характерних для агропромислових процесів. Інтеграція цих елементів в оздоблення фасадів основних функціональних зон будівлі сприяє формуванню характерного архітектурного образу.

Такий підхід не лише підкреслює функціональне призначення вертикальної ферми, а й сприяє створенню інтуїтивно зрозумілого образу споруди, який сприймається як живий та динамічний. Це забезпечує привабливість об'єкта як з архітектурної, так і з комерційної точки зору, підвищуючи його впізнаваність у міському середовищі.

Прикладом реалізації даного принципу є вертикальна ферма Dragonfly, (рис. 2.3.1, 12) розроблена Вінсентом Каллебо. Цей проєкт відображає синтез біонічних форм і сучасної архітектури. Концепція споруди, за формою натхненна крилом бабки [216], поєднує елементи, які асоціюються з природними формами та процесами. Кольорова гама з домінуванням зелених і коричневих відтінків апелює до флори та субстрату, підкреслюючи рослинницький характер об'єкта.

Крім того, структурне членування фасадів відтворює візерунок листового жилкування, що відображає основи біофільного дизайну. Це рішення не лише гармонійно інтегрує будівлю у природний контекст, але й формує її унікальний

візуальний образ, що символізує взаємодію між природою та сучасними технологіями.

Крім того, гармонізація об'ємно-просторових і фасадних рішень відіграє важливу роль у формуванні архітектурного образу вертикальних ферм, забезпечуючи зв'язок між зовнішнім виглядом споруди та її функціональною структурою. Зокрема, раніше встановлено, що для приміщень, призначених для вирощування рослин, доцільним є використання суцільного фасадного скління [46]. Таким чином, ця основна функціональна зона стає архітектурним акцентом будівлі, формуючи її впізнаваний образ у міському середовищі.

Водночас, адміністративні приміщення, що мають допоміжне призначення, можуть бути спроектовані із використанням стандартних віконних прорізів. Це рішення дозволяє візуально відрізнити основну виробничу зону від допоміжних, підкреслюючи функціональну різноманітність будівлі та її архітектурну гармонізацію.

Завершальним принципом, проте не менш значущим, виступає інтеграція новітніх технологій у процесі проектування вертикальних ферм [111]. Одним із таких підходів є використання "розумних" та адаптивних фасадних систем, які оснащуються спеціалізованими датчиками для моніторингу параметрів освітленості, температури та інших умов довкілля. Такі фасади здатні автоматично змінювати свою фізичну конфігурацію залежно від потреб об'єкта.

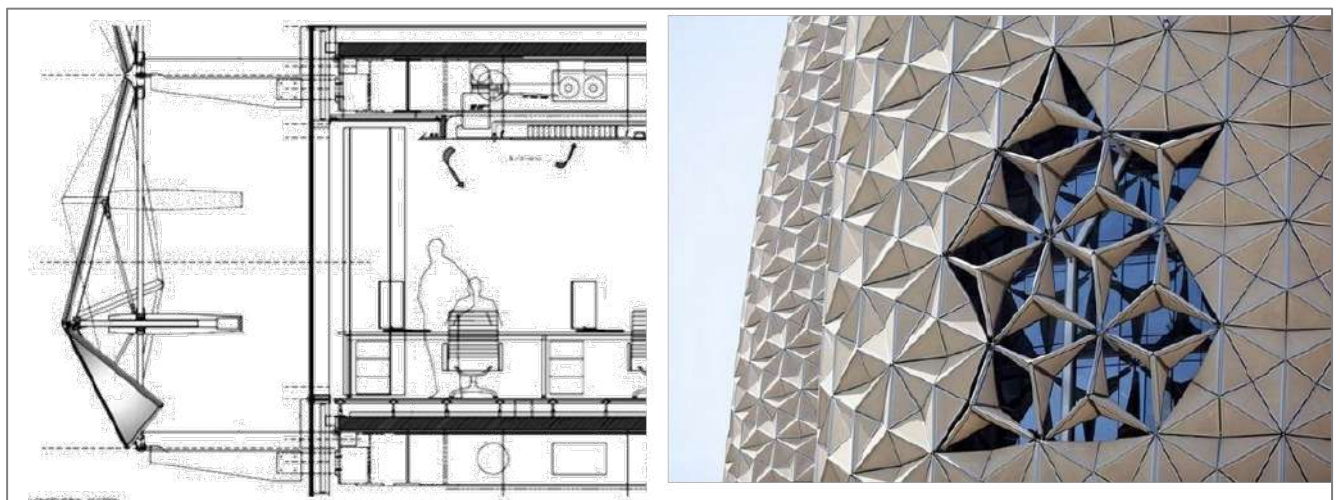


Рис. 2.3.2 Динамічний фасад будівлі Аль-Бахр, ОАЕ

Показовим прикладом застосування цього принципу є фасад веж Аль-Бахр в Об'єднаних Арабських Еміратах (рис. 2.3.2), конструкція якого базується на тисячах перфорованих панелей, що змінюють положення для контролю сонячного випромінювання [217]. У контексті вертикальних ферм впровадження таких технологій забезпечує відповідність середовища вирощування до вимог рослин та зовнішніх умов, оптимізуючи рівень інсоляції та покращуючи адаптивність споруд.

Інтеграція установок відновлюваної енергетики є невід'ємною складовою сучасних вертикальних ферм, спрямованою на підвищення енергоефективності та екологічної стійкості об'єктів [35, 39, 109, 111]. Використання таких технологій, як вітрові турбіни, сонячні панелі та теплові колектори, сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел енергії, одночасно формуючи інноваційний архітектурний образ споруди.

Відповідно, розміщення вітрових турбін має вплив на об'ємно-композиційний образ споруди (рис. 2.3.1, 15). Зокрема, їх устаткування навколо будівлі є елементом навколишнього ландшафту. Ті, що знаходиться вздовж фасаду зверху до низу слугує для акцентування вертикальності. Розміщення на даху виступає як заключний архітектурний елемент, а між поверховими блоками виконує роль композиційних зв'язків.

Окрім цього, форма споруди може бути спроектована з урахуванням аеродинамічних прийомів, що сприяють спрямуванню повітряних потоків до турбін, збільшуючи їх продуктивність [218]. Такий підхід не лише підвищує ефективність процесу виробництва відновлюваної енергії, але й забезпечує унікальність проєктного рішення завдяки плавним, обтічним формам, що створюють аеродинамічний ефект.

Влаштування озеленення дахів і фасадів є доволі доцільним компонентом архітектурного формування вертикальних ферм, який інтегрує передові технології з принципами дизайн експресіонізму. Використання таких елементів не лише сприяє покращенню естетичного вигляду будівель, але й виконує низку ключових функцій. Зокрема, зелені дахи та фасади забезпечують ефективну тепло- та звукоізоляцію, сприяють зниженню рівня забруднення навколишнього

середовища, поліпшують якість повітря та підвищують загальний рівень озеленення урбанізованих територій [219].

Окрім екологічних переваг, такі рішення сприяють адаптації міського середовища до кліматичних змін, зокрема шляхом зменшення ефекту теплових островів [219]. Це також сприяє підвищенню соціальної привабливості вертикальних ферм, створюючи комфортне та естетично привабливе середовище для мешканців. Таким чином, інтеграція екстер'єрного озеленення стає невід'ємним аспектом сталого архітектурного дизайну вертикальних сільськогосподарських об'єктів.

У підсумку, розглянуті принципи гармонійності та цілісності архітектурних рішень вертикальних ферм не лише підкреслюють значення їхньої естетичної інтеграції в міський контекст, але й формують основу для створення інноваційних агропромислових об'єктів. Використання контекстуалізму, симбіозу функції та форми, ототожнення конструкції та форми, гармонізації об'ємно-просторових рішень і впровадження новітніх технологій забезпечує комплексний підхід до архітектурного планування. В свою чергу, він дозволяє створювати функціонально ефективні, економічно вигідні та візуально виразні споруди.

Застосування зазначених принципів дозволяє інтегрувати вертикальні ферми в існуючі міські структури, зберігаючи баланс між промисловою функціональністю та архітектурною гармонією [34, 50, 52]. Важливість цього підходу полягає не лише у вирішенні сучасних задач продовольчої безпеки, але й у покращенні естетичних та функціональних характеристик міських виробничих промислових споруд.

Результати розробки даної групи принципів є ключовим етапом дослідження, який формує теоретичний і практичний фундамент для подальших архітектурно-містобудівних розробок. Висвітлені принципи економічної ефективності та архітектурної цілісності й гармонізації утворюють єдину взаємозв'язану систему, яка сприяє створенню стійких і ефективних об'єктів, а також слугують теоретичною основою для дослідження і розробки вертикальних рослинницьких господарств.

Висновки по другому розділу

1. Запропоновано методику дослідження вертикальних ферм, яка орієнтована на вирішення проблем, пов'язаних із високими експлуатаційними витратами, негативним впливом на навколишнє середовище та планувальною недоцільністю і передбачає дослідження об'єкту рухаючись від загальних питань та принципів проектування до конкретних рішень на «міському» → «об'єктному» → та «просторовому» рівнях аналізу.

2. Досліджено систему еко-сталих рішень щодо оптимізації потоків виробництва, засновану на засадах циркулярної економіки, що включає аналіз літератури для визначення основних стратегій, оцінку їх ефективності та рекомендації щодо практичного застосування при просторово-планувальній організації вертикальних ферм.

3. Сформульовано 2 групи принципів архітектурної організації вертикальних господарств, до 1-ї групи «економічної ефективності» увійшли принципи зовнішнього доповнення, економії ресурсів, збереження часу та простору, а до 2-ї групи «гармонізації та цілісності» включено засади контекстуалізму, симбіозу функції і форми, ототожнення конструкції та форми, гармонізації об'ємно-просторових та фасадних рішень, а також імплементації новітніх технологій.

4. Група принципів економічної ефективності спрямована на зменшення витрат та впливу на навколишнє середовище, а також на підвищення ефективності системи за рахунок застосування гнучких, адаптивних і технологічно обґрунтованих архітектурних та планувальних рішень протягом усього життєвого циклу проекту.

5. Група принципів гармонізації та цілісності визначає підходи до інтеграції вертикальних ферм у міське середовище з акцентом на їхню естетичну виразність, функціональну відповідність технологічному призначенню та інноваційність об'ємно-просторових та композиційних рішень.

6. Запропоновано методики кількісної оцінки архітектурних рішень – техніко-економічне обґрунтування та оцінку життєвого циклу, що встановлюють

відповідність об'ємно-просторових параметрів функціональному призначенню будівлі, економічну та екологічну ефективність системи на різних етапах розвитку проекту.

7. Надано перелік техніко-економічних показників для проектів вертикальних рослинницьких господарств, включно із запропонованими методами розрахунку коефіцієнтів ефективності використання площі й об'єму будівлі, продуктивності площі і об'єму, ефективності розміщення обладнання та ефективності вирощування.

8. Виявлено, що методика аналізу життєвого циклу є інструментом кількісної оцінки впливу будівлі вертикальної ферми на оточуюче середовище за такими показниками, як викиди парникових газів, виснаження викопних ресурсів, споживання водних ресурсів, забруднення еко-систем та ін., що має на меті виявити найвагоміші чинники екологічного впливу системи для розробки подальших проблемно-орієнтованих стратегій покращення сталості архітектурних рішень.

9. Запропоновано кваліметричні методи оцінки якості проектних рішень для застосування у будівлях вертикальних господарств, що включає адаптацію індикатора переміщення до просторово-функціональних особливостей агро-підприємств, які є визначним чинниками ефективної експлуатації таких об'єктів.

РОЗДІЛ III

ІМЛЕМЕНТАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ЕКО-СТАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У ВЕРТИКАЛЬНИХ РОСЛИННИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ

3.1 Критерії аналізу та оцінки ефективної інтеграції сталих рішень для вертикальних агро-комплексів

Хоча вертикальні рослинницькі господарства мають низку переваг, таких як підвищення продуктивності, зменшення використання земельних ресурсів і води, їх загальний вплив на довкілля викликає значні сумніви.

Тож, концепція екологічно стійкої архітектури вертикальних ферм має базуватись на розумінні чинників даних екологічних питань та їх взаємозв'язку між ефективними архітектурними рішеннями. На відміну від традиційних громадських чи житлових будівель, де екологічний вплив переважно визначається характеристиками будівельних матеріалів та об'ємно-просторових рішень, у вертикальних фермах значну роль відіграють виробничі потоки. Тож вирішення проблем еко-доцільності промислових процесів базується саме на співвідносних технологічних аспектах, що, в свою чергу, формує специфічні вимоги до містобудівної, функціонально-планувальної та просторової організації таких агро-споруд.

Для кількісної оцінки показника «екологічної стійкості» будівель вертикальних господарств широко використовується стандартизована методологічна база — аналіз життєвого циклу (див. розділ 2.2). Зокрема, використання терміну життєвого циклу будівлі «*cradle-to-grave*» забезпечує комплексне дослідження системи протягом усіх стадій функціонування та передпроектних процесів: видобуток сировини, транспортування матеріалів та спорудження будівлі, виробництво продукції та експлуатація споруди, утилізація чи переробка інфраструктурних, конструктивних систем та інших будівельних матеріалів (рис. 3.1.1). Натомість метод «*cradle-to-gate*» фокусується на оцінці

впливу на довкілля, охоплюючи етапи від видобутку первинних ресурсів до моменту, коли продукт залишає виробничий об'єкт.

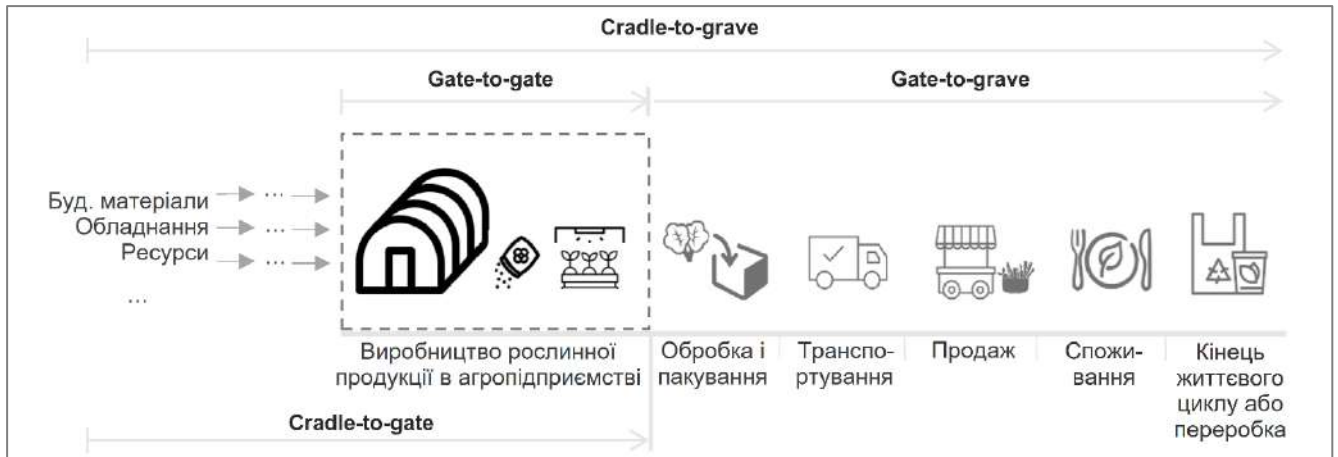


Рис. 3.1.1 Життєвий цикл виробництва у будівлі агро-господарства [107]

Обидва підходи дозволяють кількісно оцінити такі категорії впливу на оточуюче середовище, як викиди парникових газів (GHG), виснаження викопних ресурсів, споживання води та інші екологічні ефекти. Проте метод «cradle-to-gate» є більш поширеним у подібних дослідженнях вертикальних господарств, оскільки він дозволяє здійснювати ранню екологічну оцінку і полегшує порівняльний аналіз фокусуючись на основній функції будівель вертикальних ферм – виробництво продукції.

Останні дослідження LCA надали нові дані щодо стійкості та економічної життєздатності вертикальних господарств. Вони виявили комплексні взаємозв'язки між різними потоками виробництва та їх внеском у вплив на довкілля. Ці роботи забезпечують емпіричні докази, які дозволяють оцінити реальну екологічну ефективність вертикальних господарств у порівнянні із деякими заявленими перевагами щодо їх позитивної екологічної стійкості [100, 220, 221]. Водночас, результати конкретних оцінок демонструють, що, незважаючи на переваги у деяких категоріях впливу, загальна стійкість цих господарств значною мірою залежить від обраних операційних рішень та проєктних особливостей систем.

Наприклад, деякі LCA дослідження комерційних вертикальних рослинницьких підприємств вказують на високу інтенсивність вуглецевого сліду. Зокрема, для виробництва різних видів листової зелені загальний вуглецевий слід коливається від 0,42 кг CO₂-екв до 9,8 кг CO₂-екв на 1 кг товарної продукції, а середнє значення становить 4 кг CO₂-екв на 1 кг товару [84, 104, 107, 196, 222–224]. Детальний аналіз цих викидів за виробничими потоками показує, що ключовими складниками є: споживання енергії для освітлення та клімат-контролю (0,28–4,5 кг CO₂-екв), а також використання добрив (0,054–0,26 кг CO₂-екв). Окрім цього, збагачення вуглекислим газом, необхідне для оптимального росту рослин, додає ще близько 1,2 кг CO₂-екв до загального вуглецевого сліду системи.

З точки зору відносного внеску (табл. 3.1.1), дані LCA [104, 195, 196, 224] свідчать, що енергоспоживання є домінуючим чинником впливу на оточуюче середовище в різних системах вертикальних господарств. Наприклад, у дослідженні Гаргаро [224] використання електроенергії становило близько 37,8% від загальних викидів парникових газів та 32,3% від споживання викопних ресурсів. Аналогічно, інша дослідники заявили, що викиди, пов'язані з енергоспоживанням, складала приблизно 45,9% від загального обсягу парникових газів та 79,7% від споживання викопних ресурсів [104]. Така значна залежність від енергії обумовлена необхідністю використання штучних систем освітлення в приміщеннях вирощування для заміни природного сонячного світла, а також кліматичних систем для підтримання оптимальних умов внутрішнього середовища.

Таблиця 3.1.1

Частка викидів потоків виробництва від загальної кількості викидів парникових газів (GHG) усієї системи ВФ [104, 195, 196, 224]

	<i>середнє значення</i>	<i>мін. значення</i>	<i>макс. значення</i>
Енергетичні потреби	44.2%	37.8%	47.8%
Споживання добрив	3.2%	0.1%	7.3%
Споживання води	0.2%	0.002%	0.5%
Насичення CO₂	5.5%	4.3%	6.7%

Тож, для вирішення даного аспекту доцільним є розглядання різноманітних енергетично ефективних технологій, зокрема таких, як інтеграція відновлювальних джерел та енергетична валоризація вторинних продуктів. З архітектурною точки зору, імплементація подібних систем може вимагати проектування додаткових приміщень, функціональних зон та адаптацію інших конструктивних рішень будівлі.

Використання добрив та систем управління поживними речовинами також є важливим джерелом впливу на довкілля, хоча їхній внесок зазвичай нижчий, ніж енергії. Різні поживні компоненти, включно з кальцієвою селітрою, NPK-добривами (азот, фосфор, калій) та іншими хімічними сполуками, у середньому забезпечують 3,2% із максимально зафіксованим показником 7,2% від загальних викидів парникових газів [104, 195, 196, 224].

Технології орієнтовані на зниження вуглецевого сліду даного потоку можуть включати, як і системи переробки органічних відходів для отримання добрив, так і рециркуляцію безпосередньо самого поживного розчину із систем вирощування. В свою чергу, такі технології потребують подальшої розробки прийомів інтеграції відповідного обладнання разом із існуючими системами, а також передбачення співвідносних приміщень та функціональних зон для зберігання та управління добривами отриманих із вторинних джерел.

Споживання води, з точки зору виробничого потоку системи, часто вважають перевагою вертикальних фермерських систем. Підтверджується це твердження завдяки відносно мінімальному прямому впливу на викиди парникових газів. Згідно з оцінками, водний компонент у середньому становить лише близько 0,2% від загального обсягу GHG. Водночас слід враховувати, що екологічний вплив, пов'язаний із водою, включає не лише її пряме споживання, але й обробку стічних вод та пов'язані процеси, які загалом можуть становити приблизно 1,3% від загальних викидів парникових газів [104, 195, 196, 224].

Не зважаючи на відносно низький екологічний вплив даного компоненту, використання систем збору дощової води є доцільним для вертикальних ферм з точки зору загальної концепції циркулярності та збереження прісноводних

ресурсів. Тож, впровадження даної технології також вимагає архітектурних напрацювань щодо інтеграції спеціалізованого обладнання, а також передбачення відповідних функціональних зон для подальшого менеджменту та зберігання даного ресурсу.

Останнім із чотирьох основних виробничих потоків є збагачення вуглекислим газом, яке також має вагоме значення для оптимізації росту рослин у контрольованих умовах. Цей процес також вносить свій вклад у загальний вуглецевий слід. Згідно з оцінками, він забезпечує близько 5,5% від загальних викидів у відповідних досліджених LCA [104, 195, 196, 224].

Для зниження даного екологічного впливу, джерела отримання двоокису вуглецю можуть включати системи, де даний ресурс є вторинним продуктом основного процесу. В такому випадку, імплементація даних процесів має передбачати розробку подальших проєктних рішень щодо просторово-планувальної структури розміщення обладнання необхідного для зберігання та обробки CO₂.

Важливо зазначити, що інфраструктура, необхідна для систем вирощування, та застосування будівельних матеріалів і конструктивних систем також є вагомими чинниками впливу на довкілля. Було встановлено, що використання пластикових матеріалів і компонентів систем для вирощування разом становить близько 32,4% викидів CO₂-екв. та 37,7% споживання викопних ресурсів [104, 195, 196, 224]. Подібним чином, інші інфраструктурні впливи, такі як субстрат для вирощування, горщики та пакувальні матеріали, можуть спричиняти до 31,7% загальних викидів CO₂-екв. Хоча ці аспекти не входять до обсягу аналізу в межах даного дослідження, подальші розробки повинні приділити увагу циркулярним технологіям, пов'язаним із інфраструктурою, за для підвищення стійкості системи.

Таким чином, ефективне впровадження екологічно орієнтованих технологій у вертикальних фермах потребує комплексного технологічно-архітектурного підходу, що охоплює взаємозв'язок між обраними стратегіями циркулярності та містобудівним, функціонально-планувальним та просторовими рівнями проєктування. В свою чергу, це дозволяє створювати архітектурні рішення, які не

лише забезпечують оптимальні умови для виробничих процесів, але й мінімізують їх негативний вплив на довкілля через ефективну практичну імплементацію відповідних технологічних систем у будівлі вертикальних господарств.

Проте, варто зазначити, що потік споживання водних ресурсів було виключено з основного етапу аналізу з огляду на те, що даний ресурс має відносно незначну частку впливу на викиди парникових газів у порівнянні з іншими потоками системи (таблиця 3.1.1). Даний ресурс є частиною певних досліджених циркулярних стратегій, тож, в деяких випадках він, розглядається як вторинний потік системи, що впливає на остаточну екологічну та економічну оцінки. Окрім цього, з огляду на релевантність певних водно-орієнтованих стратегій у архітектурному контексті (наприклад, збір дощової води), цей потік також включено до рекомендацій щодо впровадження еко-стійких рішень в будівлі рослинницьких господарств.

Для доказовості вибору технологічного прийому покращення екологічної стійкості необхідно впровадити об'єктивну оцінку, за якою можливо визначити ефективність та доцільність впровадження конкретної стратегії в архітектурну структуру агро-господарства. Для будівель вертикальних ферм, такі критерії оцінки мають включати, як безпосередньо дані щодо потенціалу зниження вуглецевого сліду, так і іншу релевантну інформацію, що може впливати на визначення цієї доцільності (повноцінні результати оцінки наведено в додатку В). Зокрема, запропоновано наступні критерії:

- *Підхід до циркулярної стратегії:*
 - Зовнішні стратегії (використання міських чи промислових відходів).
 - Внутрішні стратегії (локальне відновлення та відновлюваність).
- *Циркулярна стратегія* (джерело та/або метод заміщення чи відновлення ресурсу).
- *Кількісна оцінка:*
 - Потенціал заміщення чи відновлення (у відсотках від початкового вхідного ресурсу):
 - Енергія: електроенергія та тепло для всієї системи.

- Поживні речовини: коефіцієнти відновлення основних макроелементів (N, P, K) і другорядних макроелементів (Mg, Ca, S).
- Вуглекислий газ (CO₂).
- Потенціал скорочення парникових газів (GHG), кг CO₂-екв. (порівняно з базовим лінійним сценарієм).
- Техніко-економічні показники, якщо доступно (порівняно з базовим лінійним сценарієм; категорії змінюються).
- *Інші релевантні дані*, що потенційно впливають на ефективність системи:
 - Функціональні одиниці, використані для розрахунків екологічного чи економічного впливу.
 - Загальна площа об'єкта
 - Річна врожайність ферми.
 - Культури, що досліджувалися.
 - Технологія вирощування.
 - Місцерозташування
 - Тип будівельної конструкції (тільки для енергії).

Перш за все, поділ технологій за «*підходом до циркулярної стратегії*» на «зовнішні» та «внутрішні» забезпечує логічну структурування результатів дослідження. У цьому контексті «зовнішні» підходи передбачають інтеграцію циркулярних технологій із джерел поза межами споруди вертикального господарства. Зокрема, використання муніципальних або промислових відходів та вторинної сировини.

Натомість, «*внутрішні*» підходи зосереджені на створенні замкненого циклу всередині об'єкта. Це включає потворне використання та переробку залишкових продуктів утворених внаслідок виробничих процесів безпосередньо у будівлі ВФ. Тож, такий поділ полегшує узагальнення даних і розробку комплексних практичних рекомендацій щодо подальшої архітектурної імплементації обраних технологій.

Водночас, показник «*циркулярна стратегія*» описує конкретний технологічний прийом, який, в свою чергу, визначає специфічні вимоги до

містобудівних, функціонально-планувальних чи просторових рішень, адже ефективно практичне впровадження таких стратегій напряду залежить від розробки співвідносної архітектурної організації.

«Кількісна оцінка» забезпечує емпіричне обґрунтування вибору технологій через показники потенціалів «заміщення чи відновлення ресурсів» та «скорочення парникових газів». Це є необхідною умовою для доказового обґрунтування доцільності застосування конкретного прийому з метою вирішення питань екологічної стійкості вертикальних господарств, зокрема, щодо зменшення вуглецевого сліду та ресурсоспоживання будівлі ферми.

«Функціональні одиниці виміру» у цьому контексті визначають розрахункову одиницю дослідження LCA. Зокрема, у проаналізованих дослідженнях одиниці виміру для підрахунку вуглецевого сліду варіювалися залежно від обраної методики. Найпоширенішими є кількість викидів парникових газів (кг CO₂-екв) на одиницю м² площі будівлі чи м² вирощування, на кг продукції або на річний врожай (кг, тони, кількість рослин). Такий підхід дозволяє оцінювати співвідношення екологічного впливу до архітектурних або виробничих показників ферми.

Хоча «функціональні одиниці виміру» можуть відрізнятися у різних дослідженнях, наявність повних даних дозволяє конвертувати дані показники. Наприклад, використання «кг CO₂-екв/м² площі будівлі» надає більш архітектурний контекст завдяки розрахунку метричного показника екологічного впливу будівлі на одиницю її площі. В свою чергу, для здійснення такого перерахунку необхідно враховувати дані про «річну врожайність» (або врожайність за обраний період) та «загальну площу об'єкта».

Таким чином, перерахунок кг CO₂-екв/кг продукції до кг CO₂-екв/м²/рік площі будівлі (або на інший часовий проміжок) здійснюється за наступним рівнянням (3.1):

(3.1)

$$GHG_S = \frac{GHG_Y \times Y}{S},$$

де: GHG_S – річний обсяг викидів парникових газів на один метр квадратний площі будівлі вертикального господарства, CO_2 -екв/ m^2 /рік;

GHG_Y – річний обсяг викидів парникових газів на один кілограм виробленого врожаю, CO_2 -екв/ m^2 /рік;

Y – річний врожай господарства, кг/рік;

S – загальна площа будівлі господарства, m^2 .

Проте кількісні оцінки ефективності технологічних рішень потребують додаткової деталізації та контексту, адже результати аналізу залежать від проектних характеристик, таких як місце розташування споруди ВФ, її площа, архітектурна структура, спеціалізація та метод вирощування.

Інформація про «досліджувані культури» забезпечує контекстуальну відповідність кількісних показників, адже ефективність технологій може варіюватися залежно від спеціалізації виробництва, таким чином додатково уточнюючи доцільність застосування конкретного прийому залежно від проектних характеристик.

В свою чергу, «тип будівельної конструкції» суттєво впливає на енергетичну ефективність об'єкта, зокрема, в даному контексті це залежить від теплопровідності матеріалів, використаних для огорожувальних конструкцій. Відповідно, даний критерій враховує специфіку споруди: чи це утеплена будівля, ферма-контейнер, скляна або пластикова теплиця. Така характеристика дозволяє пояснити різні закономірності енергоспоживання.

Додаткову контекстуальну інформацію також надає показник «місцезорозташування», який може реферувати до кліматичних умов регіону, де розташований об'єкт співвідносного дослідження. Перш за все, температурний режим зовнішнього середовища впливає на рівень енергоспоживання будівлі. Окрім цього, даний критерій є особливо релевантним при оцінюванні відновлюваних джерел, таких як фотоелектричні панелі, вітряки чи системи збору дощової води, адже доцільність їх застосування часто визначається місцевими умовами середовища, зокрема, рівнем інсоляції, кількості опадів та вітровими умовами.

Підсумовуючи, така комплексна система критеріїв забезпечує всебічний підхід до оцінки доцільності застосування конкретних технологічних рішень у контексті їх архітектурної імплементації. Вона дозволяє розробляти обґрунтовані рекомендації щодо проектування екологічно стійких будівель вертикальних ферм, враховуючи проектну специфіку кожного об'єкта.

3.2 Продуктивність та екологічна ефективності технологічних прийомів для архітектурних рішень вертикальних ферм

Аналіз існуючих досліджень енергоспоживання у вертикальних фермах виявив чіткі закономірності щодо доцільності та ефективності застосування різноманітних циркулярних технологій орієнтованих на потік теплової та електричної енергії, які безпосередньо впливають на формування екологічно-стійких архітектурно-планувальних рішень таких споруд.

Перш за все, відповідно до зібраних літературних даних, ефективність різноманітних енерго-орієнтованих стратегій підвищення еко-стійкості будівлі, зокрема співвідносних показників зниження викиду парникових газів та ресурсоспоживання господарства, значною мірою залежать не тільки від обраних стратегій, а й від географічного розташування, архітектурної конфігурації та спеціалізації ферми (додаток В, табл. В.1, табл. В.2).

Також було визначено, що серед основних зовнішніх підходів були використані кооперація із місцевим заводом аеробного бродіння, інтеграція промислових тепло-викидів та мережеве постачання енергії із відновлювальних ресурсів, яке також було поєднано із внутрішнім підходом рекуперації надлишкового тепла. Натомість, серед внутрішніх були застосовані стратегії щодо інтеграції фотоелектричних панелей, вітряків і біомасових теплових установок.

Серед проаналізованих досліджень було також встановлено їх орієнтацію на заміщення конкретного типу енергії: теплової або електричної. Зокрема, із загальної кількості стратегій (16 позицій), 11 зосереджені на електроенергії, 2 — виключно на тепловій та 3 — на обидва типи.

Дослідження Йоенсуу, Сандісона, Гаргаро та Ромео [222–225] встановили, що перехід на централізоване мережеве енергопостачання з відновлюваних джерел є ефективною стратегією для забезпечення сталого функціонування будівлі вертикальної ферми в різних географічних регіонах. Це рішення не лише повністю задовольняє потреби об'єкта в енергоресурсах, але й дозволяє зменшити викиди парникових газів на 22–80%.

Зокрема, комбінований підхід разом із застосуванням внутрішньої стратегії використання систем рекуперації надлишкового тепла від штучного освітлення має потенціал скоротити вуглецевий слід вертикального господарства на 60%, а також додатково замістити потреби у опалювальні будівлі на 75% завдяки інтеграції обладнання клімат-контролю з теплообмінниками, вентиляційними установками та автоматизованими регуляторами температури у приміщеннях вирощування рослин.

В свою чергу, дослідження Даневада встановило, що кооперація між агрогосподарством та міським заводом анаеробного бродіння (рис. 3.2.5, 2а-б), що знаходиться на відстані 20 км від об'єкту дослідження, є ефективною симбіотичною стратегією для мінімізації екологічного сліду та підвищення енергоефективності будівлі ферми [226]. У цій моделі органічні рештки вирощуваних томатів (переважно листя) використовуються як сировина для анаеробного бродіння, тоді як біогаз, отриманий на основі цих та інших муніципальних відходів (схема виробництва біогазу зображена на), є джерелом забезпечення енергетичних потреб будівлі ВФ.

Імплементация такої циркулярної стратегії має потенціал замістити до 90% потреб в електро- та 100% теплопостачанні разом із зниженням вуглецевого сліду будівлі до 41%. Відповідно, досягнення зазначених результатів забезпечується завдяки інтеграції системи газопостачання не лише всередині будівлі, а й напрямку між агрогосподарством та анаеробним заводом, що дозволяє ефективно транспортувати біогаз. Додатково, дана стратегія передбачає адаптацію функціонально-планувальної структури для включення зон обробки, тимчасового

зберігання та подальшого відправлення органічних відходів у приміщеннях сортування зібраної продукції та загальних кімнатах зберігання відходів.

Останньою із зовнішніх енергетичних стратегій є дослідження МакДоналда [199] щодо інтеграції відпрацьованого тепла промислових міських підприємств у систему клімат-контролю агро-комплексів. У цій моделі рослинницькі господарства використовують гарячі гази та пару, що генеруються в процесі різних індустріальних процесів міста, для опалення та підтримання оптимального мікроклімату у виробничих приміщеннях ферми. Передача тепла здійснюється через систему теплообмінників, трубопроводів та автоматизованих регуляторів температури, що забезпечує подачу та рівномірний розподіл енергії у зоні вирощування.

Використання такого підходу не лише підвищує енергоефективність вертикальних ферм завдяки повноцінному заміщенню традиційних джерел тепла вторинними індустріальними відходами [199], а й сприяє формуванню стійких промислових кластерів із замкненим циклом використання ресурсів у міському середовищі.

Окрім цього, цей приклад також є наочною ілюстрацією залежності ефективності еко-стійких рішень від спеціалізації господарства. Зокрема, імплементація зазначених прийомів дозволила знизити вуглецевий слід будівлі на 93% у випадку вирощування коноплі та на 22% для томатів [199]. В даному випадку, це пояснюється тим, що конопля утримує вуглець у своїх волокнах на десятиліття, тоді як у томатах він швидко повертається в атмосферу після споживання та розкладу залишків.

Серед внутрішніх стратегій енергоефективності найбільш широко застосованими були дослідження щодо використання сонячної енергії у роботах Блома (рис. 3.2.4), Лі (рис. 3.2.1, а), Мартіна (рис. 3.2.3, 1), Паркеса та Тео (рис. 3.2.2). Було виявлено, що ефективність результатів переважно зумовлена місцерозташуванням об'єкта та конфігурацією системи [84, 107, 195, 196, 227].

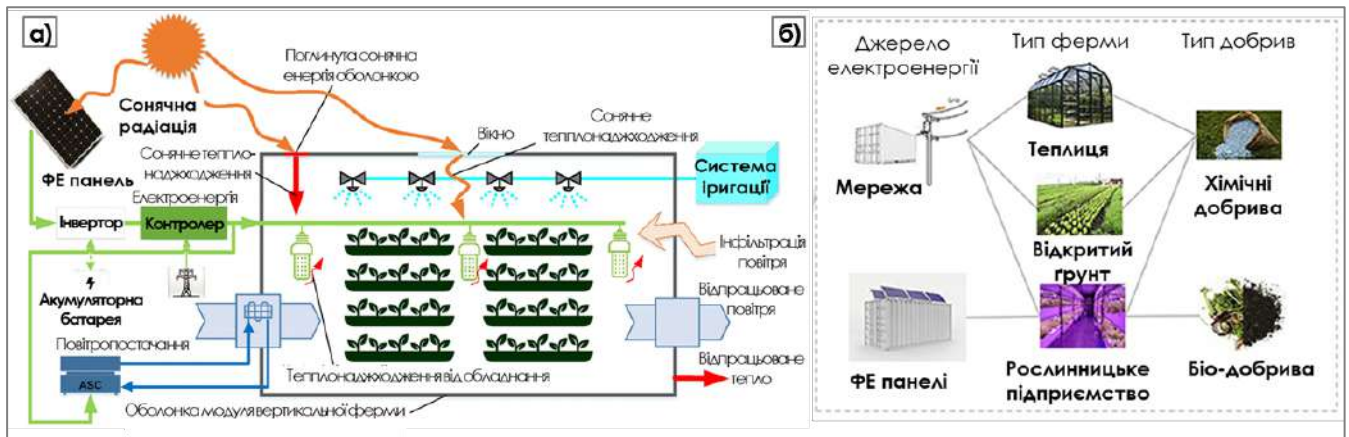


Рис. 3.2.1 Дослідження Л. Лі, Сінгапур [107]: а) функціонально-технологічна схема вертикальної ферми; б) типи систем використаних для порівняльних розрахунків у роботі.

Зокрема, для регіонів із високим рівнем річної інсоляції було встановлено, що використання фотоелектричних панелей (ФЕП) має потенціал заміщення електроенергії в межах 32–100%, що відповідно скоротило викиди парникових газів будівлі на 25–85% [107, 195, 227]. Основні конфігурації передбачали розташування ФЕП на дахах ферм (рис. 3.2.1; рис. 3.2.2, а; рис. 3.2.3, 1, 1а) або використання фасадних систем із інтегрованими фотоелементами на південних частинах зовнішніх огорожувальних конструкцій (рис. 3.2.3, б, в) [107, 195, 227].

Натомість, при місцезнаходженні об'єкта у північних регіонах [84, 196] імплементація сонячних панелей виявила їх обмежену доцільність. Відповідно, дослідження у Швеції (рис. 3.2.3) показало, що низька сонячна активність регіону значно обмежує енергоефективність фотоелектричних панелей розташованих на даху будівлі із інтегрованою ВФ [196]. В свою чергу, це призвело до збільшення загального вуглецевого сліду об'єкту [196].

Водночас, у Нідерландах (рис. 3.2.4) ефективне застосування сонячних панелей було можлива лише за рахунок розширеної фотоелектричної площі: для забезпечення 1 м² вирощувальної площі у фермі необхідно було встановити 5,1 м² сонячних панелей на даху та фасадах споруди, що значно ускладнює практичну реалізацію такої стратегії для обмежених проєктних ділянок всередині щільної міської забудови [84].

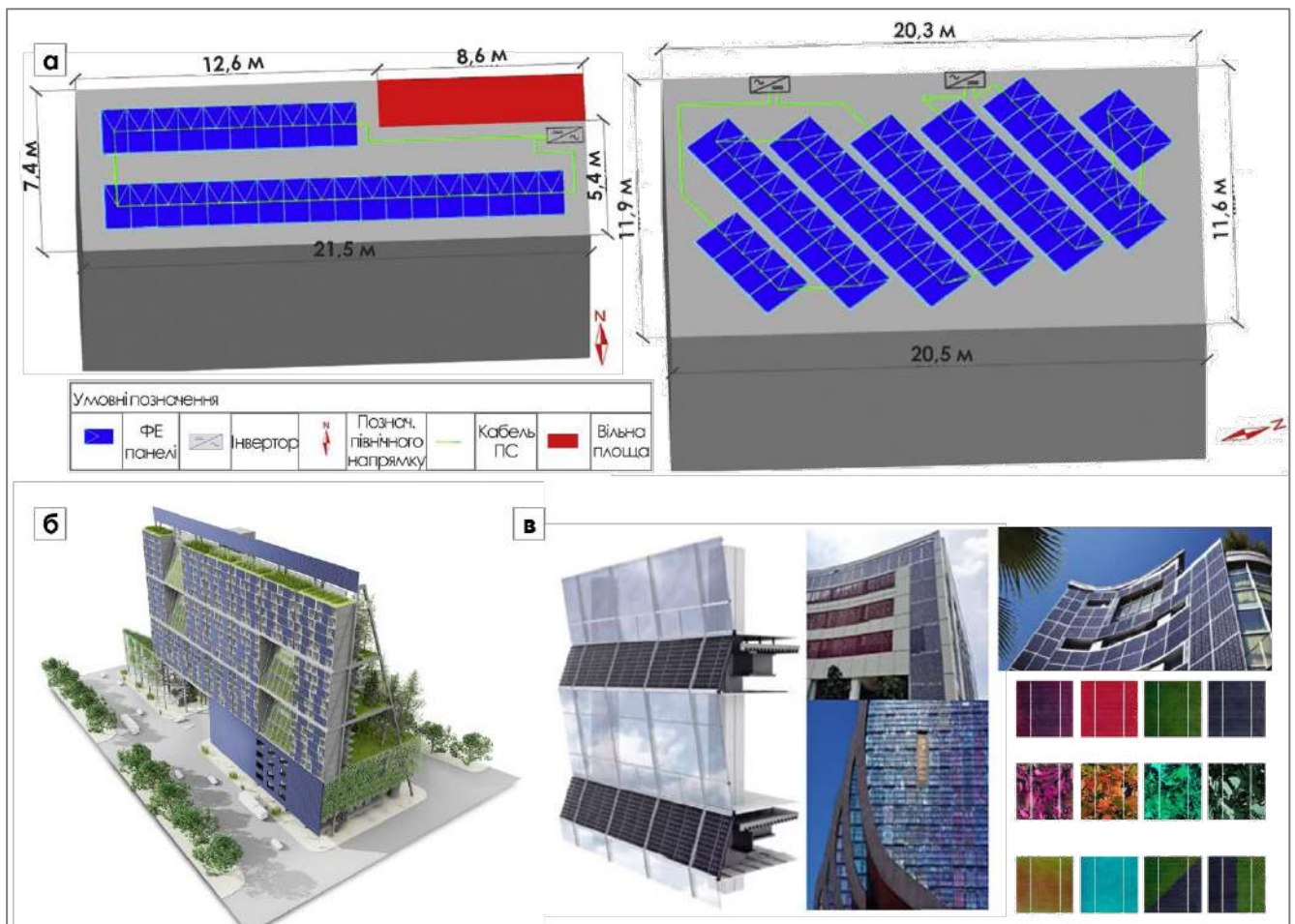


Рис. 3.2.2 Схеми розташування ФЕП: а) на даху споруди вертикального господарства у дослідженні Й. Л. Тео, Китай [227]; б) у структурі фасаду на прикладі будівлі багатофункціональної ферми [228]; в) у структурі фасаду на прикладах різних систем [229].

Серед внутрішніх енерго-стратегій також були досліджені підходи, що комбінували декілька прийомів. Зокрема, робота Мартінеса [197] аналізує підхід, що базується на використанні бімсової теплової установки (рис. 3.2.6) для обігріву всієї споруди та фотоелектричних панелей для електроживлення системи зрошення у приміщеннях вирощування. Впровадження цієї стратегії дозволило замістити до 100% потреби у тепlopостачанні та до 70% у електроенергії, що скоротило викиди парникових газів будівлі на 41% [197]. Ефективність функціонування даних впроваджень передбачала інтеграцію теплообмінних вузлів у технічних приміщеннях, адаптації трубопроводів для розподілу тепла, а також інсталяцію сонячних панелей на даху ферми.

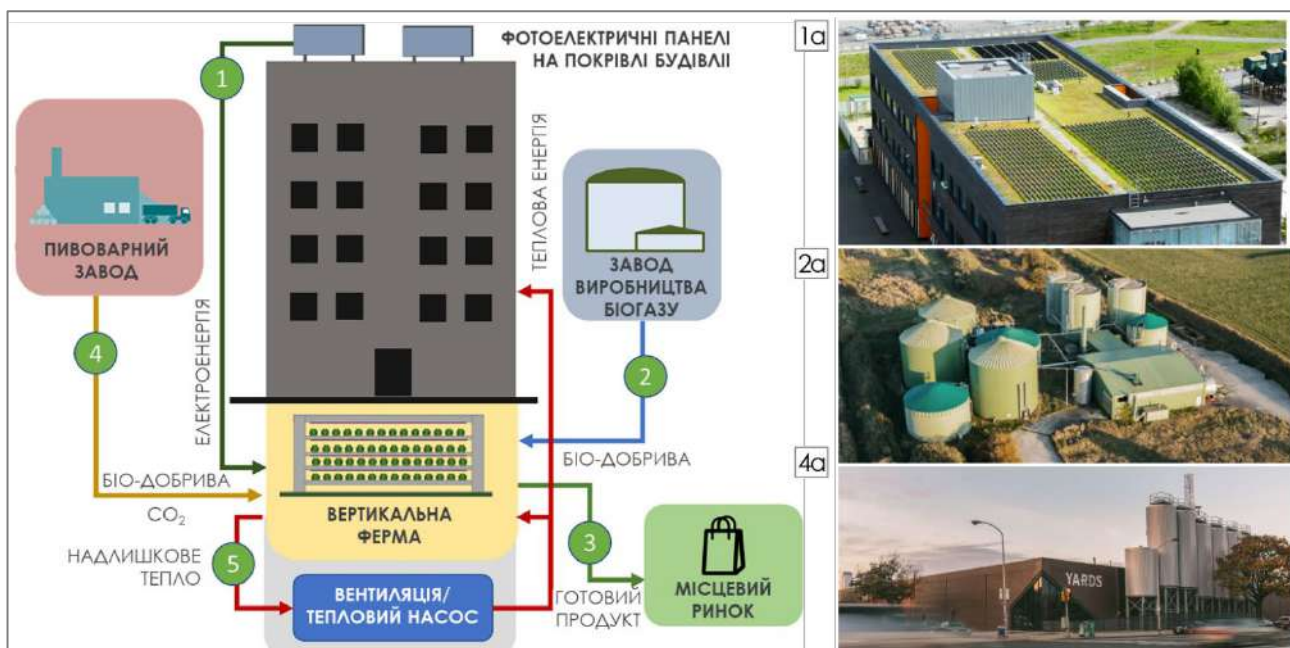


Рис. 3.2.3 Схема імплементації циркулярних стратегій в дослідженні М. Мартіна, Швеція [196]: 1) розташування фотоелектричних панелей на даху будівлі для використання відновлювальної електроенергії; 1a) приклад імплементації ФЕП на покрівлі будівлі [230] 2) кооперація із біогазовим заводом для отримання біодобрив; 2a) приклад заводу виробництва біогазу [231] 3) локальне постачання продукції; 4) кооперація із заводом пивоваріння для отримання біодобрив та CO_2 ; 4a) приклад заводу пивоваріння [232]; 5) відновлення надлишкового тепла з ферми для опалення житлової будівлі



Рис. 3.2.4 Модель гіпотетичної вертикальної ферми та характеристики фотоелектричних панелей досліджених в роботі Т. Блома, Нідерланди [84]

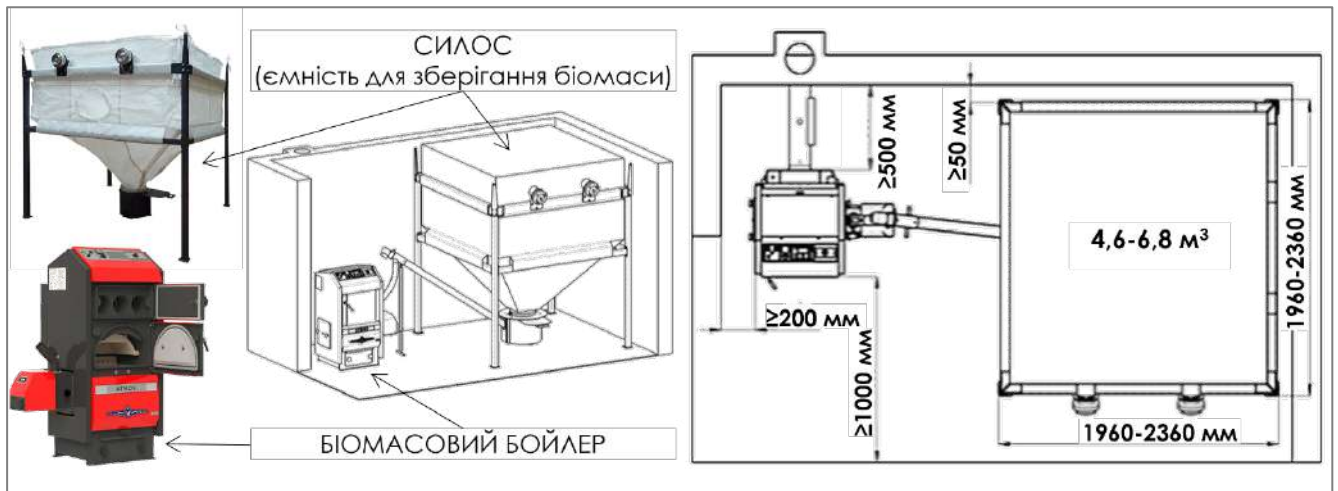


Рис. 3.2.5 Схема котельної для теплової установки на основі сухої біомаси [233]

В свою чергу, дослідження Ванга [198] розглядало застосування комбінованої системи, що включала ФЕ панелі та вітрові турбіни для енергозабезпечення ферми. Панелі були розміщені на південних дахових схилах, тоді як малі вітряки встановлювалися на верхніх конструктивних частинах будівлі для використання повітряних потоків на висоті 15–20 м [198]. Проте ця стратегія показала обмежену ефективність через низьку середньорічну швидкість вітру та високі витрати на обслуговування [198]. Зокрема, було зафіксовано збільшення вуглецевого сліду через енергоємне виробництво обладнання та нестабільність роботи системи в змінних погодних умовах.

Аналіз досліджень зосереджених на циркулярних стратегіях для постачання поживних речовин також виявив різноманітні підходи. Зокрема, серед зовнішніх були встановлені симбіотичні кооперації для застосування вторинних ресурсів із заводів очищення стічних вод (рис. 3.2.6, 1а-б), анаеробного бродіння (рис. 3.2.6, 2а-б) та пивоваріння (рис. 3.2.6, 3а-б) або компостування муніципальних відходів.

В свою чергу, на внутрішній циркулярності були зосереджені стратегії рециркуляції фільтрату, мембранної фільтрації, хімічного осадження та компостування органічних рештків виробництва.

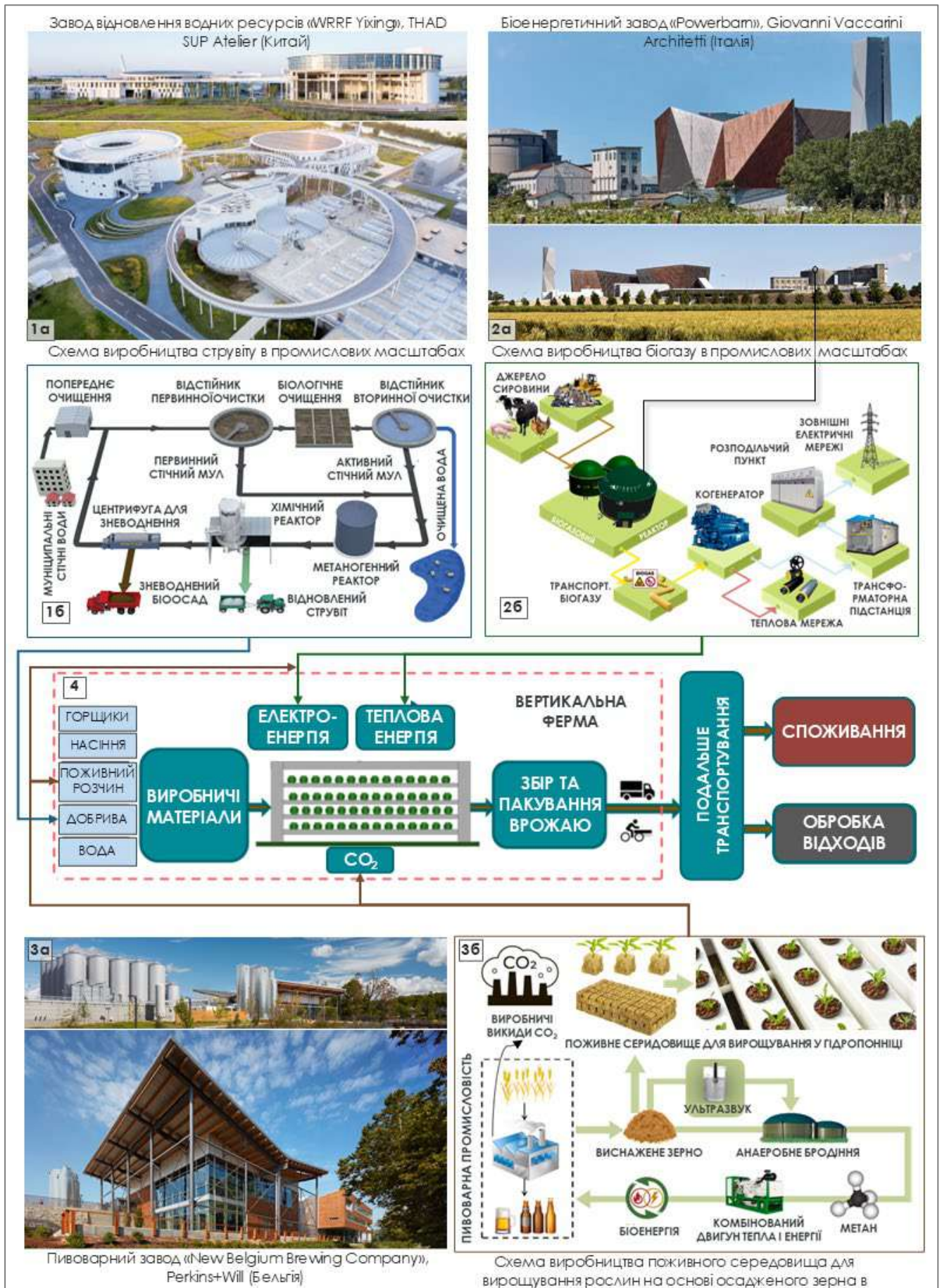


Рис. 3.2.6 Циркулярні стратегії зовнішньої симбіотичної кооперації [110, 234–238]

Відповідно, аналіз доцільності застосування конкретного прийому виявив, що показники екологічної стійкості будівлі переважно залежать від типу впровадженої циркулярної технології, зокрема такі показники, як потенціал скорочення вуглецевого сліду будівлі ферми та співвідносному показнику відновлення основних макроелементів: азоту (N), фосфору (P) і калію (K), а також другорядних макроелементів, таких як магній (Mg), кальцій (Ca) і сірка (S). Загальні результати наведено в додатку В (табл. В.3 та табл. В.4).

Перш за все, дослідження Аркас-Пільц розглядає можливість використання струвіту (рис. 3.2.7), отриманого з міських очисних споруд (рис. 3.2.6, 1а-б), як альтернативного джерела фосфорного добрива для вертикальних рослинницьких господарств, що має потенціал повноцінного заміщення цього ресурсу [239].

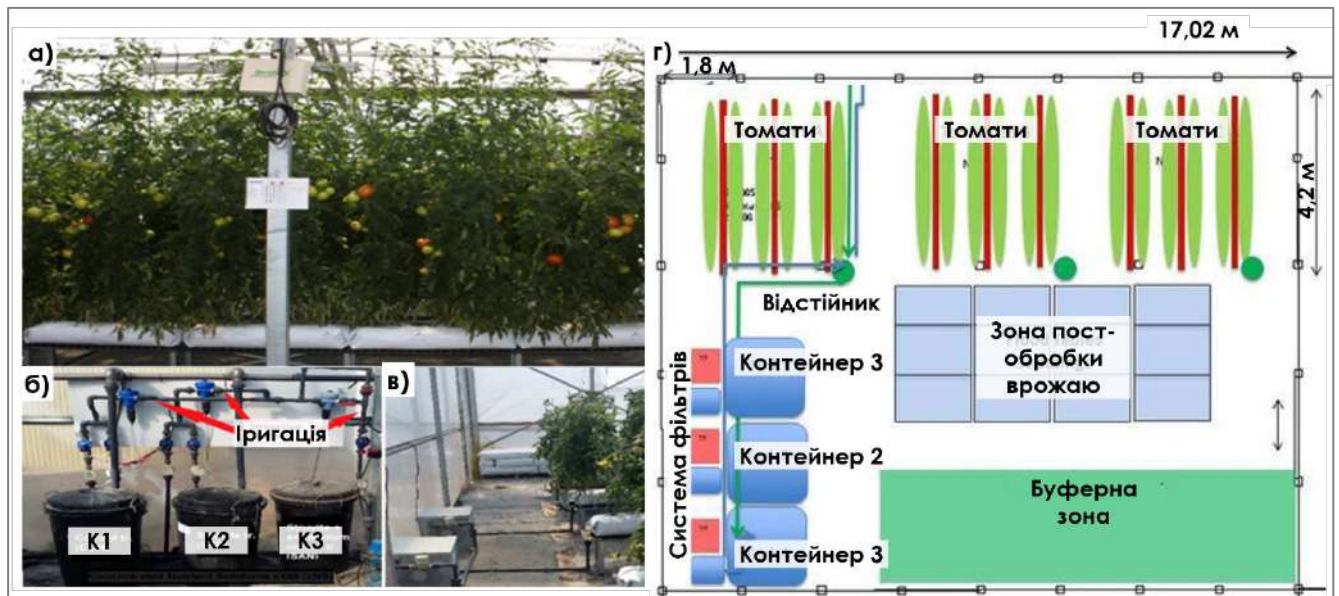


Рис. 3.2.7 Використання струвіту для гідропонного вирощування томатів [240, 241]: а) гідропонні модулі з томатами; б) система інтеграції струвіту для іригації рослин (K1 – контейнер з поживним розчином, K2, K3 – контейнери зі струвітом); в) дренажна система; г) приклад функціонально-планувальної схема виробничої зони для вирощування томатів.

Основна концепція цієї зовнішньої стратегії полягає у вилученні Р-вмісних сполук із стічних вод міста та їх подальшому використанні у вигляді мінералу

струвіту для поступового постачання добрив у системах вирощування вертикальних ферм [239].

Для ефективної інтеграції цієї стратегії у будівлю агро-господарства було передбачено спеціальні контейнери для внесення гранульованого струвіту (рис. 3.2.7) у гідропонні установки, що розташовані у приміщеннях вирощування рослин, а також встановлення датчиків моніторингу розчинення фосфору у воді [239]. Функціонально-планувальні рішення також включають зони для розміщення контейнерів для тимчасового зберігання струвіту перед його подальшою інтеграцією в систему іригацію та удобрення (рис. 3.2.7, б, г).

В свою чергу, роботи Мартіна [196, 242] досліджують промисловий симбіоз із заводом анаеробного бродіння як альтернативного джерела поживних речовин для вертикальних рослинницьких господарств (див. рис. 3.2.3, 2, рис. 3.2.6, 1а-б). Основна концепція цієї стратегії базується на вилученні корисних макроелементів із біогазового дигестату, що залишається після ферментації органічних відходів, та його подальшому використанні у системах гідропонного вирощування для будівель ферм [196, 242].

Відповідно, це передбачає встановлення контейнерів із дигестатом всередині функціональних зон для його зберігання та обробки, які, в свою чергу, раціонально розташовуються біля приміщень із системами управління нутрієнтами для рослин, що забезпечить оптимізацію потоків та логістичних процесів щодо менеджменту даного матеріалу.

Отже, впровадження подібної зовнішньої стратегії та відповідних прийомів здатні замінити від 45% до 82% потреби у фосфорі, від 29% до 74% потреби у калії, а також забезпечити повноцінне заміщення азотного добрива. Окрім цього, використання цієї стратегії сприяє зниженню вуглецевого сліду будівлі близько 2% [196, 242].

Згадане дослідження Мартіна [196] також аналізує можливість використання вторинних органічних продуктів міського заводу пивоваріння (див. рис. 3.2.3, 4, рис. 3.2.6, 3а-б), як альтернативного джерела для живлення рослин у вертикальних фермах. Основна концепція цієї стратегії базується на утилізації «виснаженого

зерна», яке залишається після процесу пивоваріння, та його переробці у органічний субстрат або компонент поживних розчинів для гідропонного вирощування, що здатен повноцінно замінити NPK-добрива для агро-підприємств, а також підвищити загальну стійкість будівлі на 0,7% [196].

Отже, для ефективної інтеграції цієї стратегії в будівлю вертикального господарства необхідно передбачити спеціальні зони зберігання, обробки та підготовки пивоварного зерна. Зокрема, ізольовані приміщення для попередньої ферментації або висушування матеріалу, де розташовуються резервуари для підготовки даної сировини перед її переміщенням до зон управління поживними речовинами для подальшого змішування із іншими добривами.

Останньою із зовнішніх стратегій щодо нутрієнтів є дослідження Ароземена-Поло [243], яке розглядає можливість валоризації органічних муніципальних твердих відходів. Основна концепція цієї стратегії полягає у перетворенні органічних залишків із харчових відходів, зелених насаджень чи з інших підприємств у компост, що використовується для утворення поживного субстрату для використання у міських агро-господарствах.

За результатами дослідження, було встановлено, що даний підхід здатен забезпечити близько 5% азоту і калію, та 38% фосфору, а також значно зменшити вуглецевий слід будівлі на 130% [243], що досягається через створення вторинного позитивного екологічного ефекту завдяки уникненню викидів, пов'язаних із виробництвом і транспортуванням конвенційних систем постачання мінеральних добрив.

Для ефективної інтеграції цієї стратегії у будівлю вертикального господарства необхідні функціонально адаптовані зони для зберігання компосту у спеціалізованих контейнерах разом із станціями його подальшої переробки для використання у якості органічного субстрату, тобто транспортування в приміщення вирощування рослин для застосування даного субстрату у гідропонних модулях.

Серед стратегій внутрішнього самозабезпечення поживними речовинами, найпоширенішими виявились концепції зосереджені на відновленні залишкових нутрієнтів із гідропонного розчину [18, 200, 201]. Зокрема, попри наявність

різноманітних технологій даного впровадження таких, як мембрана фільтрація та хімічне осадження, авторами досліджень було встановлено, що найбільш доцільною є рециркуляція фільтрату [18]. Основна ідея цього підходу полягає у повторному використанні залишкового живильного розчину, який містить частину не засвоєних рослинами макроелементів.

Результати досліджень показали, що інтеграція технологічного обладнання для рециркуляції фільтрату у гідропонні системи, розташовані в приміщенні вирощування, здатні замінити 5-54% NPK добрив та 15-60% вторинних нутрієнтів таких, як магній, кальцій та сульфур [18, 200, 201]. Як наслідок, даний ресурсощадний прийом здатний покращити сталість функціонування будівлі до близько 50% в порівнянні із лінійною системою організації виробництва [18, 200, 201].

Тож, для досягнення таких результатів необхідно передбачити зони розміщення резервуарів для накопичення фільтрату (рис. 3.2.8), а також інтеграцію додаткових фільтрів для механічного очищення твердих частинок та ультрафіолетові лампи для знезараження розчину у системи вирощування рослин.

Дані також підтверджують, що стратегія рециркуляції фільтрату не лише сприяє збереженню поживних речовин у системі вирощування, але й дозволяє скоротити споживання води до 40% під час виробництва у вертикальних рослинницьких господарствах [200, 201].

Окрім цього, у цих дослідженнях було також інтегровано системи збору дощової води, що дозволило додатково імплементувати відновлювальне джерело прісноводних ресурсів. Зокрема, застосована система збору дощової води була розміщена на даху споруди вертикальної ферми-теплиці та складалась з водозбірної поверхні площею 400 м², яка додатково доповнюється 500 м² від сусідньої будівлі. Дощова вода фільтрувалась і накопичувалась у підземному резервуарі об'ємом 100 м³, звідки вона за потреби перекачується у два 300-літрові баки, розташовані у спеціалізованому приміщенні ферми, інтегрованої на верхньому поверсі будівлі [200, 201].

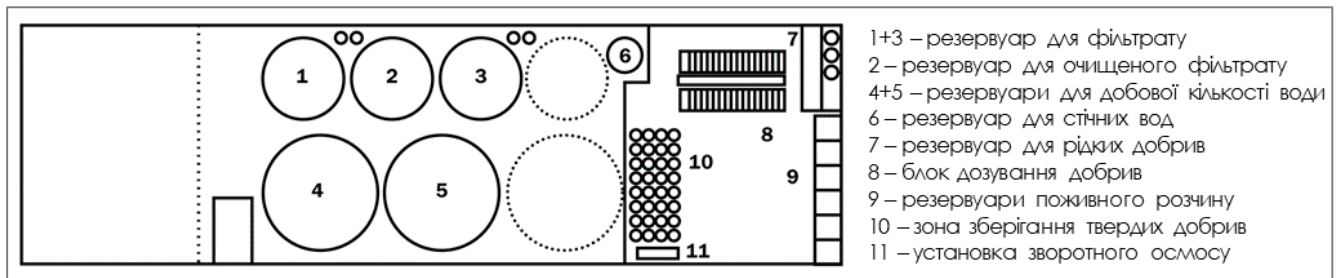


Рис. 3.2.8 Схема влаштування технічного приміщення для менеджменту та зберігання водних ресурсів та поживних речовин [244]

Останньою стратегією даного потоку є компостування внутрішніх органічних відходів виробництва, зокрема неїстівних залишків врожаю, для отримання поживного субстрату, що було досліджено у роботі Мофаттеха [194]. Попри малий потенціал самозабезпечення поживними речовинами, в середньому близько 0,3% для різних макроелементів, даний внутрішній підхід може знизити викиди парникових газів будівлі на 12% [194].

Отже, в разі застосування такого методу, необхідна інтеграція функціональних зон для сортування, обробки, тимчасового зберігання та подальшої переробки органічних залишків зібраного врожаю, що включають спеціалізовані відокремлені приміщення для компостування, що обладнані системами контролю вологості, температури та аерації [194]. Розміщення таких приміщень є доцільним у підвальних поверхах з точки зору санітарно-гігієнічних та безпекових умов. В свою чергу, зв'язок із зоною сортування врожаю та приміщенням вирощування, в яке відправляється кінцево оброблений компост в якості поживного розчину, доцільно організовувати за допомогою підйомників.

Компостування біо-залишків також є однією з ефективних зовнішніх циркулярних стратегій забезпечення будівлі вертикальної ферми двоокисом вуглецю, необхідним для насичення середовища у приміщеннях вирощування рослин, що було досліджено у роботі Томпсона [245]. Дана стратегія передбачає вилучення CO_2 , що утворюється в процесі мікробної аеробної деградації органічних відходів, та його подальше використання у будівлях ВФ із розрахунку 0,32-429,27 г CO_2 /кг відходів в залежності від типу сировини [245].

Відповідно, даний підхід дозволяє підвищити стійкість функціонування споруди завдяки повноцінному заміщенню потреб у даному ресурсі, а також зменшенню в середньому на 60% витрат на даний компонент виробництва в порівнянні із конвенційними джерелами постачання [245], що додатково підвищує економічну ефективність експлуатації будівлі агро-господарства.

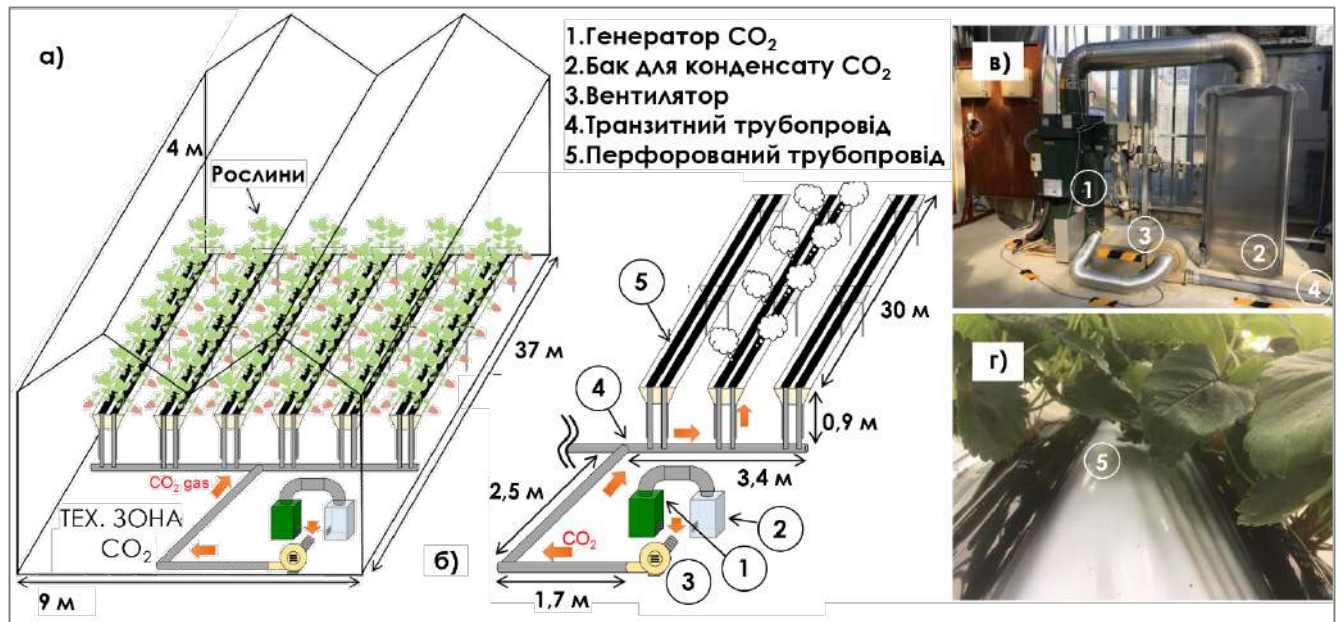


Рис. 3.2.9 Влаштування системи подачі вуглекислого газу у рослинницьких господарствах [246]: а) схема розміщення технічної зони постачання CO_2 в приміщенні вирощування; б) схема та розміри обладнання системи; в) вигляд системи; г) інтеграція трубопроводу подачі газу в модуль вирощування рослин.

Для інтеграції цієї стратегії у будівлю ферми необхідне розміщення додаткової технічної зони для контейнерів зберігання вуглекислого газу та його подальшу інтеграцію в систему насичення CO_2 , яка окрім даного обладнання також включає загальний та локальний газопровід для транспортування CO_2 до систем вирощування рослин (рис. 3.2.9). Попередньо проаналізоване дослідження МакДоналда [199] також розглядає можливість використання CO_2 , отриманого з промислових відходів, як частину комплексного зовнішнього циркулярного підходу до ресурсозабезпечення агропромислових комплексів. У цій моделі викиди CO_2 , що утворюються у процесах виробництва сталі, одночасно з

відпрацьованим теплом, використовуються для регулювання умов середовища культивуції у приміщеннях вирощування.

Як було попередньо зазначено, підвищення екологічної стійкості будівлі можливе на 20% в разі вирощування помідорів та на 90% для коноплі, а також за рахунок повноцінного заміщення даним джерелом потребу у вуглекислому газі та опаленні ферми [199].

Архітектурна адаптація даної технології включає інтеграцію розподільчих систем для рівномірного насичення CO_2 у приміщеннях вирощування, що передбачає встановлення систем подачі газу через контрольовану вентиляцію, а також спеціалізовані технічні приміщення із обладнання для попереднього транспортування та зберігання двоокису вуглецю.

Серед внутрішніх стратегій самозабезпечення даної сировиною було проаналізовано дослідження Зеїдлера [89], що розглядає використання вуглекислого газу, як вторинного продукту анаеробного бродіння, для місцевої валоризації органічних відходів виробництва у ВФ (рис. 3.2.10).



Рис. 3.2.10 Об'ємно-планувальна схема технічних приміщень для обробки біовідходів з метою отримання поживних речовин, електроенергії та вуглекислого газу методом анаеробного бродіння

Основний принцип цієї стратегії полягає у використанні газів, що утворюються під час біологічного розкладання органічної біомаси в безкисневих

умовах, що дозволяє не лише забезпечити агропромисловий комплекс вуглекислим газом, але й підвищити загальну енергоефективність об'єкту [89]. Імплементация та використання установки біогазового реактору дозволило компенсувати до 75% потреби у вуглекислому газі з розрахунку в середньому $0,1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2/\text{кг}$ біомаси отриманої з неїстівних частин врожаю [89].

Даний проєкт (рис. 3.2.10) передбачав розміщення окремих приміщень для біореакторів анаеробного бродіння в межах функціональних зон для менеджменту біо-відходів, що розташовані на підземних поверхах будівлі. Відходи виробництва було попередньо відсортовано у відповідній зоні, що знаходилась на верхній рівнях споруди. Дана сировина транспортувалися через спеціальні підйомники та конвеєри до зони тимчасового зберігання перед подальшою обробкою у біогазових установках.

Після процесу анаеробного бродіння отриманий газ розділявся за допомогою мембранної технології на дві фракції – CO_2 та CH_4 , кожна з яких зберігалася в окремих резервуарах під високим тиском. Для забезпечення рівномірної подачі CO_2 в приміщення вирощування була імплементована система автоматизованого контролю концентрації газу, що була синхронізована із вентиляційною інфраструктурою будівлі [89].

3.3 Впровадження енергоефективних та екологічно стійких рішень при проєктуванні вертикальних господарств

Узагальнюючи попередні напрацювання, можна, перш за все, виділити стратегії за їх підходом. Відповідно, серед основних зовнішніх технологій доцільно імплементувати стратегії промислового симбіозу (див. рис. 3.2.6) із заводами анаеробного бродіння, пивоваріння та очистки стічних вод, а також компостування муніципальних відходів – стратегії, які можуть повноцінно забезпечити усіма

основними ресурсами виробництва та покращити стійкість експлуатації будівлі ферми.

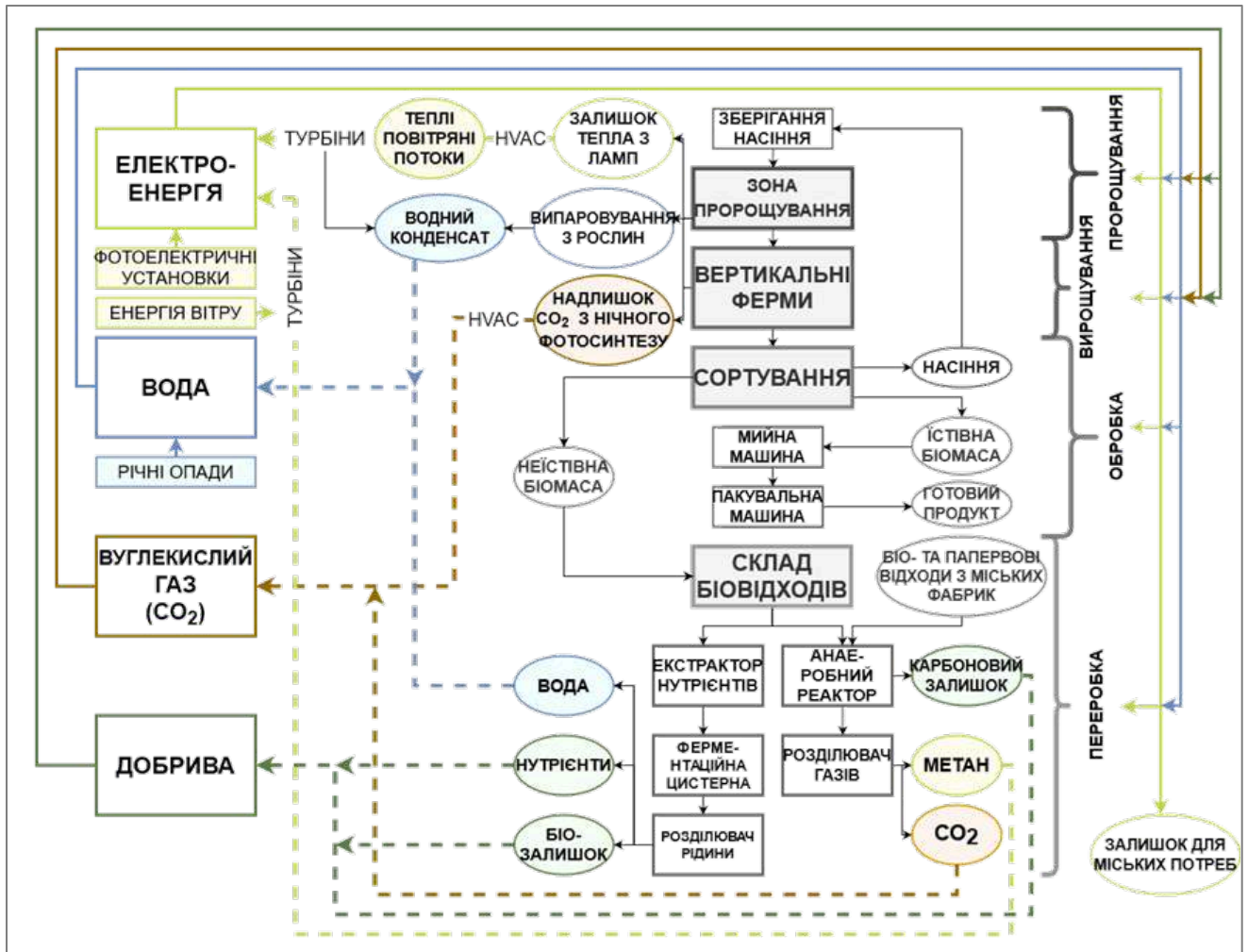


Рис. 3.3.1 Схема внутрішніх циркулярних стратегій для забезпечення вертикальної ферми виробничими ресурсами

В свою чергу, внутрішніми підходами самозабезпечення та використання відновлювальних джерел доцільно впроваджувати фотоелектричні панелі, системи збору дощової води, вітряки, установку біогазового реактору, обладнання для рециркуляції фільтрату, використання надлишкового тепла штучного освітлення та компостування неїстівної біомаси врожаю, що здатні частково компенсувати потреби в електропостачанні, опаленні, насиченні вуглекислим газом та поживними речовинами одночасно знижуючи вуглецевий слід споруди вертикальної ферми (рис. 3.3.1).

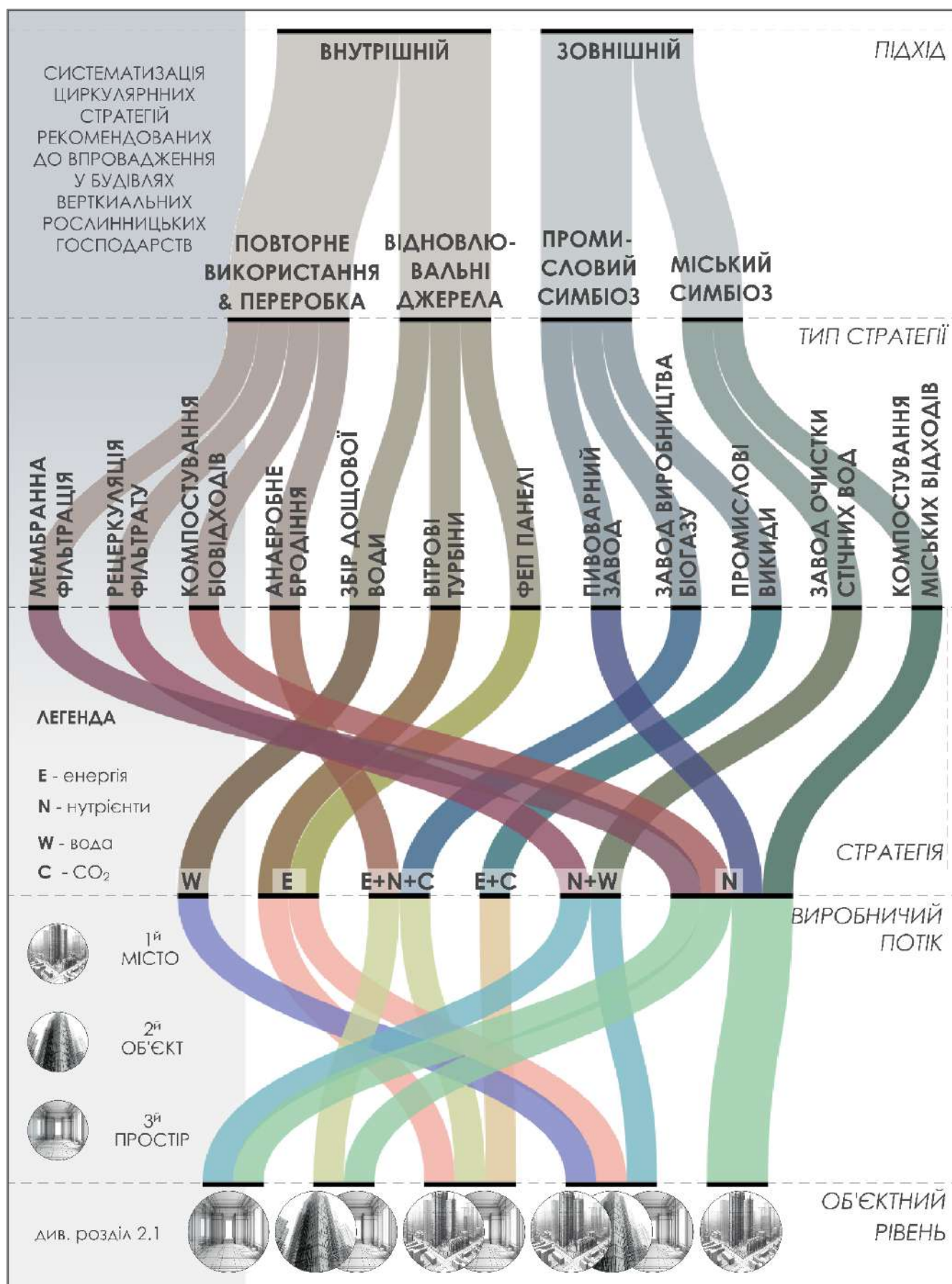


Рис. 3.3.2 Характеризація циркулярних стратегій за взаємозв'язком «Стратегія — Потік — Об'єктний рівень будівлі»

Наступний етап систематизації включає реорганізацію стратегій з метою їх більш відповідного узгодження із завданнями подальшої практичної імплементації. Відповідно, стратегії, представлені у розділі 2.2 та додатку В, були сформовані через систематичний процес узагальнення та категоризації, спираючись на детальний аналіз окремих підходів, викладений у попередньому розділі. Цей процес мав на меті спрощення розкиду стратегій шляхом виділення загальних концепцій, об'єднання подібних підходів та виключення тих, які були визнані неефективними або нерелевантними для архітектурної інтеграції.

Першим основним критерієм для узагальнення стратегій було встановлено концептуальну подібність, в межах якої технічно відмінні, але концептуально схожі підходи об'єднувалися у ширші, більш універсальні категорії. Наприклад, різні застосування фотоелектричних панелей (наприклад, панелі на даху та на фасадах, включно із системами різної потужності), були об'єднані в єдину категорію «фотоелектричні панелі», оскільки вони базуються на загальних принципах імплементації обладнання для збору сонячної енергії у різні частини будівлі ферми, хоча й відрізняються технічними характеристиками та деталями впровадження.

Другим важливим критерієм було визначено об'єднання стратегій, що охоплюють кілька ресурсів. Аналіз встановив, що деякі підходи, які попередньо було класифіковано за окремими потоками, насправді представляють різні вторинні продукти однієї і тієї ж системи. Наприклад, «місцевий завод анаеробного бродіння» (енергетичний потік), «суспензія з біогазового дигестату» та «біодобрива від регіонального виробника біогазу» (потік нутрієнтів) були об'єднані у стратегію «завод виробництва біогазу», яка охоплює транспортування та зберігання подальше зберігання у спеціалізованих приміщеннях різних вторинних продуктів даного підприємства, що також передбачає подальшу імплементацію отриманої сировини у виробничі процеси, зокрема у приміщення вирощування, будівель агропромислового комплексу.

У процесі відбору також було враховано ефективність стратегій, що дозволило виключити підходи з негативним екологічним впливом (наприклад,

«хімічне осадження»). Водночас стратегії зі змінними показниками ефективності, такі як використання вітрової та сонячної енергії, були збережені, оскільки результати їх реалізації значною мірою залежать від локальних умов і можуть бути потенційно ефективними в інших контекстах.

В свою чергу, архітектурна релевантність була встановлена як ключовий фільтр у фінальному відборі. Відповідно, пріоритет було надано підходам, які вимагали специфічних рішень на різних об'єктних рівнях будівлі. Таким чином, стратегії, орієнтовані переважно на адміністративні чи організаційні зміни (наприклад, різні варіації стратегії національного постачання електроенергії), були виключені. Крім того, комбіновані стратегії (наприклад, «фотоелектричні панелі та вітряки») були розділені на окремі компоненти відповідно до особливостей їх технічного впровадження («ФЕП панелі» та «вітрові турбіни»), оскільки їх практична інтеграція у фасадні системи, на покрівлях будівлі чи на прилеглих територіях об'єкту є незалежною та розділеною один від одного.

Цей систематичний підхід до вибору та категоризації стратегій надає модель, яка поєднує принципи циркулярної економіки та встановлені прийоми з практичними вимогами до їх архітектурної реалізації. Результуючий набір стратегій, представлений на рис. 3.3.2, є комплексним, але водночас сфокусованим інструментарієм для інтеграції цих систем у будівлі вертикальних фермерських господарств.

Імплементация цих технологій у міське середовище та будівлі вертикальних господарств вимагає багаторівневого підходу, який враховує міський, об'єктний і просторовий рівні, розглянуті у розділі 2.1 дисертації.

Перш за все, інтеграція на міському рівні підкреслює важливість розташування вертикальних ферм і їх узгодження із зовнішніми системами та чинниками. Цей рівень акцентує увагу на двох ключових аспектах: середовищному контексті та операційній ефективності. Зокрема, ефективна імплементація системи відновлюваної енергії, наприклад, вітрових турбін, залежать від локального контексту, оскільки їх ефективність визначається швидкістю вітру, а можливості влаштування – нормативними документами та міськими обмеженнями. Для

досягнення максимальної ефективності, вітряки доцільно встановлювати в місцях з постійними потоками повітря та середньою швидкістю вітру щонайменше 3,5 м/с [247].

В свою чергу, стратегії урбан симбіозу, такі як компостування муніципальних біо-відходів чи очищення стічних вод, вимагають розташування ферми поблизу відповідної інфраструктури для ефективного управління даними потоками. Індустріальних об'єктів, що оптимізує обмін ресурсами та зменшує транспортні витрати. Зокрема, в даному випадку, оптимальним показником місцезнаходження вертикальної ферми є в радіусі до 20 км від першоджерела сировини [226].

Організація територіального планування безпосередньо самого підприємства передбачає диференціацію технологічних майданчиків з урахуванням специфіки вхідних та вихідних матеріальних потоків. Відповідно, генеральний план вертикальної ферми (рис. 3.3.3) доцільно структурувати на основі сегрегації транспортно-логістичних потоків, де проїзди та маневрові майданчики для вантажного транспорту повинні диференціюватися для вхідної сировини/вихідної готової продукції (рис. 3.3.3, №8-9) та вихідних біовідходів (рис. 3.3.3, №10-11).

Перш за все, в межах єдиний підсобної зони доцільним є передбачення відокремлених пунктів прийому сировинних матеріалів від пунктів відправки готової продукції з метою оптимізації логістичних процесів (рис. 3.3.3, №8). Однак, при обмежених територіальних ресурсах, допускається інтеграція даних функціональних зон за умови забезпечення відповідних технологічних параметрів. Натомість, ділянка менеджменту відходів (рис. 3.3.3, №10-11) має бути функціонально ізольована для забезпечення санітарно-епідеміологічної безпеки аграрного виробництва.

Інфраструктура основної підсобної зони («чистих» потоків) має включати спеціалізовані майданчики для завантаження сировини (рис. 3.3.3, №8), заправки балонів CO₂ (рис. 3.3.3, №9) та відвантаження готової продукції (рис. 3.3.3, №8). З точки зору функціонально-просторової організації, зазначені ділянки рекомендовано розташовувати з прямим комунікаційним зв'язком із відповідними

технічними приміщеннями вертикальної ферми. Зокрема, заправка балонів вуглекислого газу має здійснюватися безпосередньо з транспортного засобу (рис. 3.3.3, №9) до даних резервуарів, розташованих ззовні або у всередині будівлі (рис. 3.3.5, а-29, в) з прямим виходом до даної ділянки.

Розвантаження сировини, включно тієї, що отримана з вторинних джерел (струвіту, дигестату, компосту чи виснаженого зерна) доцільно влаштовувати у технічних приміщеннях (рис. 3.3.5, а-31), що мають безпосередній функціональний зв'язок із зонами зберігання поживних речовин (рис. 3.3.5, а-23, в-1, в-2) та сировини (рис. 3.3.5, б-34, б-49) через вертикальні комунікації (вантажні ліфти) або горизонтальні (технологічні коридори). В свою чергу, дані складські зони для зберігання нутрієнтів доцільно влаштовувати із прямим функціональним зв'язком із приміщенням менеджменту поливу та удобрення.

Підсобна зона відходів («брудних» потоків) має передбачати майданчик для контейнерів побутового сміття (рис. 3.3.3, №10), а також зону завантаження біовідходів (рис. 3.3.3, №11), що має безпосередній функціональний зв'язок із ізольованим приміщенням для їх тимчасового зберігання (рис. 3.3.5, а-28).

Логістичні процеси між транспортом та будівлею забезпечуються за допомогою завантажувальних рамп та платформ (рис. 3.3.4), що інтегруються у зовнішній стіні будівлі. Відстань між даними платформами повинна забезпечувати вільне відкривання дверей транспортних засобів; зокрема, стандартні навантажувальні доки рекомендовано проєктувати шириною не менше 3.7 м при мінімальній відстані до краю майданчика – 1.5 м [248, 249].

Для наведених підсобних майданчиків рекомендовано використання твердого покриття, що розраховане на динамічне навантаження від відповідної техніки. Параметричні характеристики даних майданчиків, при тупиковому проїзді, необхідно проєктувати розміром не менше 12×12 м (оптимальні розміри визначаються відповідно до параметрів найбільш габаритного транспортного засобу) із мінімальною шириною проїздів на ділянці 3,5 м [165, 250].

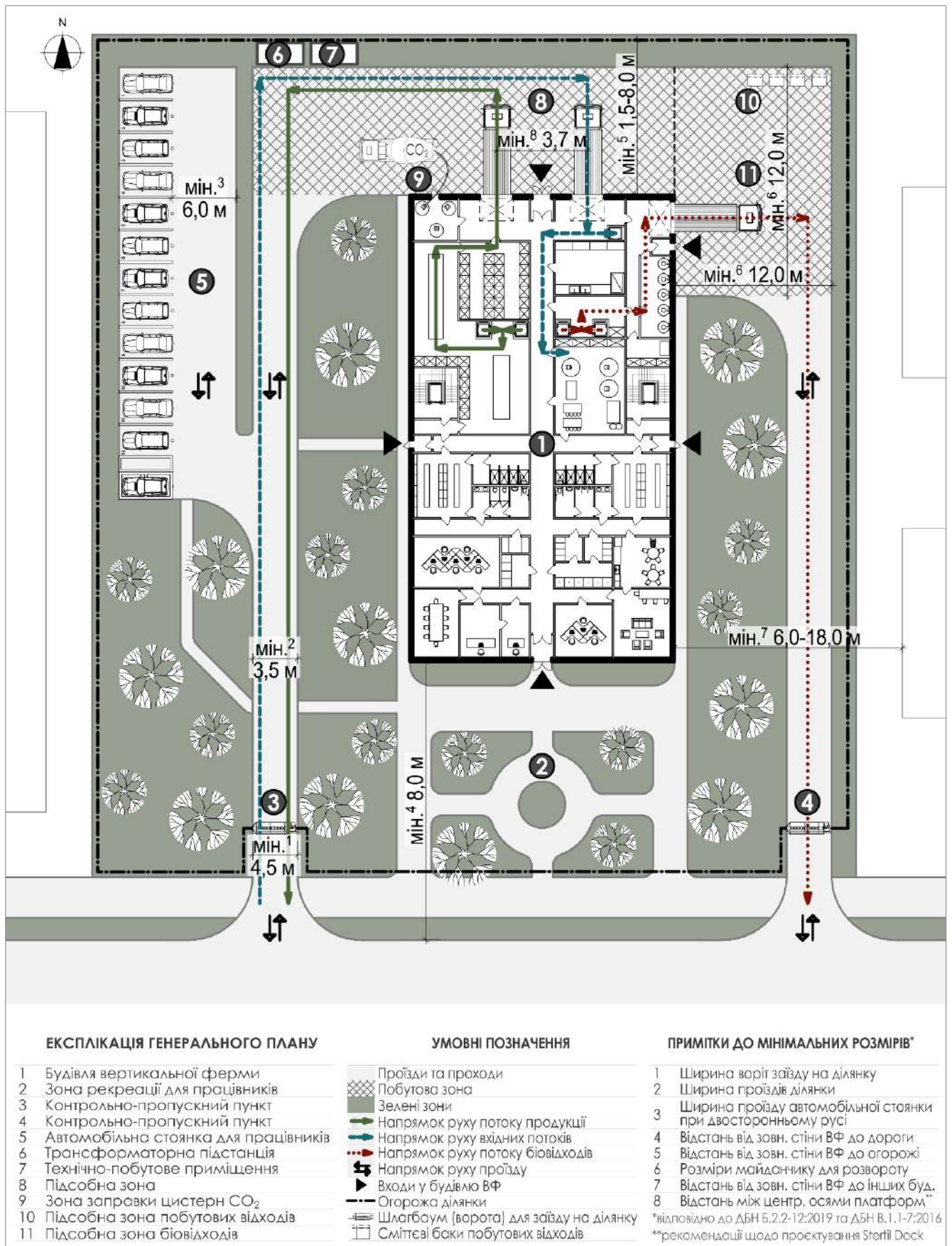


Рис. 3.3.3 Організація генерального плану ділянки вертикального рослинницького підприємства

Загальні рекомендації щодо проектування генерального плану агропідприємства також включають необхідність забезпечення периметральної огорожі та контрольно-пропускних пунктів з шириною воріт не менше 4,5 м та передбачення зон для персоналу: зелені зони, рекреаційні простори (рис. 3.3.3, зона №2) та автомобільні стоянки (рис. 3.3.3, зона №5) з виділенням 10% місць для осіб з інвалідністю [250]. В свою чергу, коефіцієнт щільності забудови має становити не менше 40%, до якого входять площа контуру самої будівлі ферми, підсобних майданчиків, складських та інженерно-технічних споруд, включаючи підземні об'єкти, над якими заборонено розміщення інших архітектурних елементів [250].

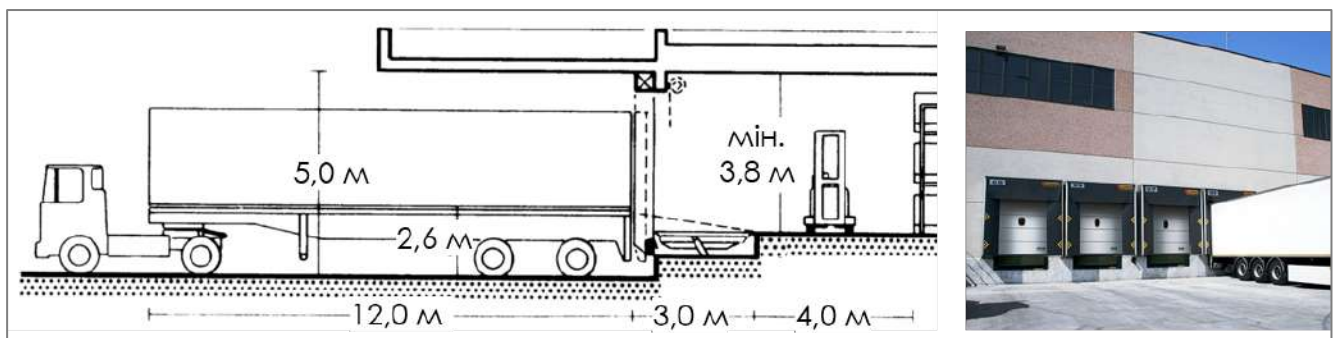


Рис. 3.3.4 Схема влаштування завантажувальної платформи [248, 249]

На рівні об'єкту імплементація циркулярних стратегій передбачає адаптації у функціонально-планувальній структурі. Зокрема, для ефективного впровадження стратегій використання вуглекислого газу, як і для конвенційних джерел так і з побічних чи вторинних продуктів (див. розділ 3.2), необхідно передбачити виокремлену функціональну зону для розміщення балонів CO₂. При інтеграції даної зони всередині будівлі рекомендовано розташовувати обладнання в ізольованих від робочих зон приміщеннях на рівні першого поверху та біля зовнішньої стіни (рис. 3.3.5, а-29, д) для забезпечення оптимальних параметрів безпеки та експлуатаційної ефективності [251].

Використання та збір дощової води також потребує планувальних адаптацій. Розташування зон для резервуарів зберігання даного ресурсу може бути, як і у підземному технічному поверсі будівлі (рис. 3.3.5, г), так і на першому рівні [252] в межах приміщення менеджменту удобрення та поливу. В свою чергу, параметри

даного технічного приміщення визначаються продуктивною потужністю агропідприємства та культурами, що вирощуються [244], а його планувальне рішення має передбачати резервування площі для потенційного розширення технологічного обладнання, зокрема додаткових ємностей для поживних розчинів та рідких добрив (див. рис. 3.2.8). Архітектурні рішення даної зони також передбачають влаштування твердого покриття підлоги з відповідною несучою здатністю для розміщення обладнання, а також запобігання впливу прямих сонячних променів (розташування у приміщеннях без віконних прорізів чи із затемненим покриттям) та надмірних вібрацій [253].

Натомість, місцеві біогазові установки потребують спеціалізованих зон для співвідносних операційних етапів, включаючи переробку відходів, їх зберігання та генерацію біогазу (див. рис. 3.2.10). Їх розташування є доцільним у спеціально ізольованих функціональних зонах для обробки відходів, які рекомендовано розташовувати у підземних поверхах будівлі з точки зору забезпечення безпеки технічного процесу та вивільнення простору верхніх поверхів для процесів, що потребують природнього освітлення – адміністративних приміщень (рис. 3.3.5, а, б: №1-6, 12; 46) чи зон процесу вирощування рослин (рис. 3.3.5, б: №33, 41, 44, 45).

Більше того, для ферм, що використовують валоризацію органічних відходів за допомогою анаеробного бродіння, в рамках заходів безпеки слід додатково розрахувати категорію вибухопожежної та пожежної небезпеки для приміщення біогазового реактора. Оскільки метан, що є продуктом анаеробної реакції, є горючим газом з вибухонебезпечними властивостями, приміщення зазвичай відносять до категорії Б або А (залежно від розрахованого значення надлишкового тиску вибуху). З точки зору забезпечення безпеки, такі приміщення також вимагають використання вогнестійких матеріалів та конструкцій як заходів для зменшення ризиків, пов'язаних із можливими аваріями. Зокрема, це передбачає використання протипожежних перегородок та перекриттів 1-го класу з використанням негорючих матеріалів, що запобігають поширенню вогню між приміщеннями, належні шляхи евакуації, а також запобіжні клапани або інші технічні рішення для зниження тиску у разі вибуху [165, 254].

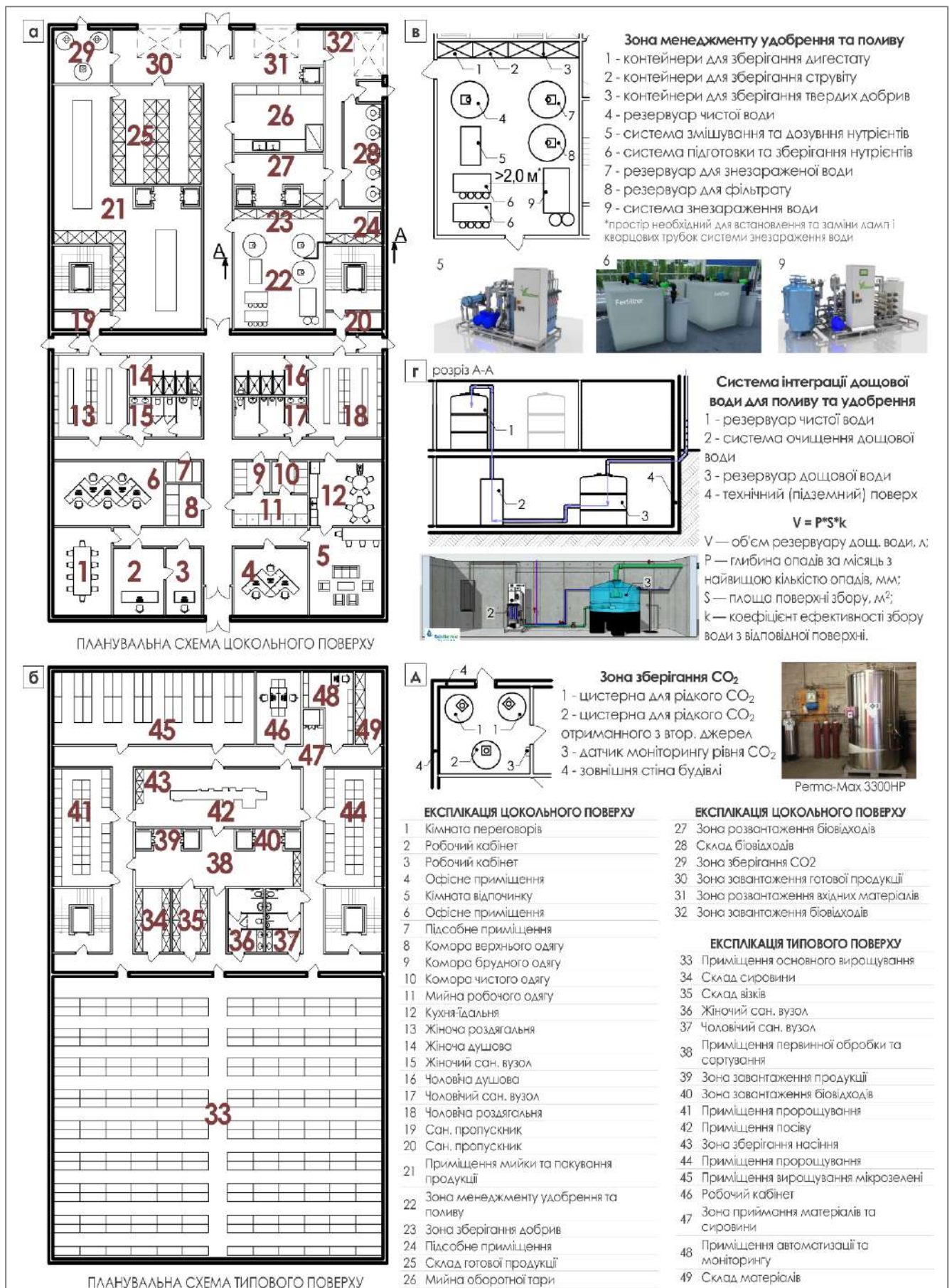


Рис. 3.3.5 Просторово-планувальні прийоми імплементації циркулярних стратегій у будівлю вертикальної ферми

В свою чергу, інтеграція інфраструктури відновлюваної енергії передбачає структурні адаптації для зменшення вібрацій та шуму, що сприяє підвищенню безпеки, довговічності та комфорту будівлі. Окрім цього, встановлення фотоелектричних панелей або вітрових турбін на дахах чи фасадах суттєво змінює візуальну ідентичність будівлі, створюючи динамічний і композиційно розділений дизайн, який впливає на загальний архітектурний образ (див. розділ 2.3).

Наприклад, серед світлопрозорих фасадних доцільним є застосування фотоелектричного комбінованого вакуумного скління (PVCVG – англ. photovoltaic combined vacuum glazing), рис. 3.3.6 [255, 256]. Дана технологія не тільки забезпечує ефективну теплову інсоляцію, а й одночасно генерує сонячну електричну енергію із коефіцієнтом корисної дії близько до 14% [255].

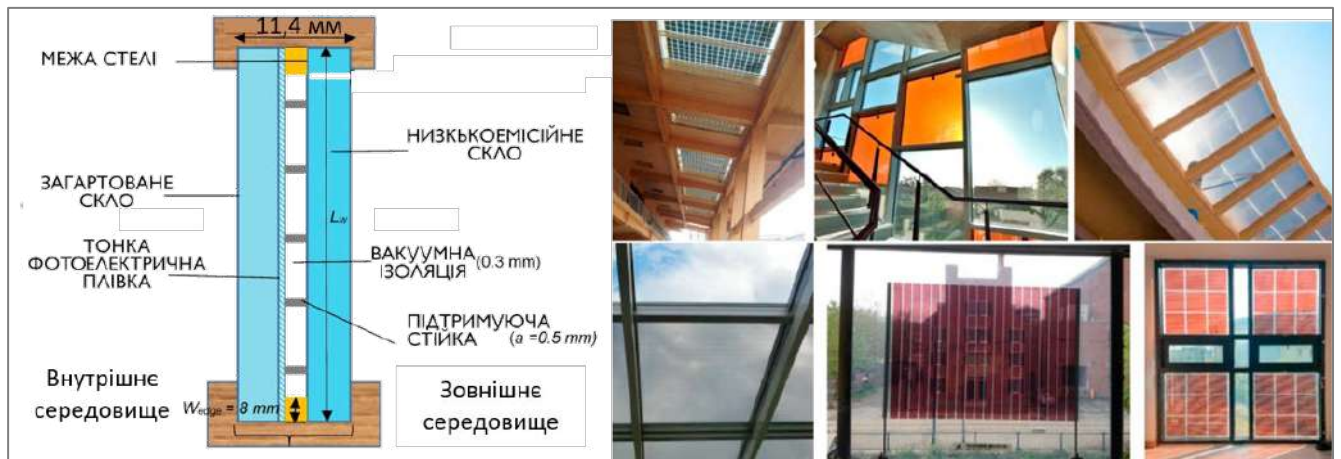


Рис. 3.3.6 Структура та приклади фотоелектричного скління [255, 256]

Слід зазначити, що така система має коефіцієнт пропускання світла лише 50,8%. [256]. Таким чином, оптимальне фасадне рішення для вертикальних рослинницьких господарств передбачає поєднання звичайного скління та фотоелектричного в пропорції від 40-20% до 60-80% відповідно [255], що забезпечує баланс між генерацією електроенергії та належним освітленням для росту рослин.

Розгляд просторового рівня передбачає інтеграцію та розміщення ключової інфраструктури, обладнання та технічних систем у межах різних зон будівлі для забезпечення технічного виконання процесів у вертикальній фермі. Наприклад,

системи збору дощової води доцільно влаштовувати на покрівлях будівлі звідки зібрані опади накопичуються у підземному або підвальному резервуарі (рис. 3.3.5, г-3) та через систему фільтрації (рис. 3.3.5, г-2) перенаправляється у цистерну зберігання чистої води (рис. 3.3.5, г-1), що розташована у зоні менеджменту поливу та удобрення (рис. 3.3.5, а-22, в).

Аналогічно, імплементація стратегії рециркуляції фільтрату також потребує влаштування додаткового обладнання – резервуару для виведеного залишкового розчину (рис. 3.3.5, в-8), який перенаправляється через установку знезараження (рис. 3.3.5, в-9) до баку зберігання очищеного фільтрату (рис. 3.3.5, в-7), звідки в подальшому інтегрується в систему підготовки добрив (рис. 3.3.5, в-6) та дозування поживних речовин (рис. 3.3.5, в-5).

В свою чергу, розрахунок об'єму цистерни для зберігання води у вертикальних фермах ґрунтується на комплексному аналізі співвідношення ризиків переривання постачання та інвестиційних витрат на обладнання й площу для резервуарів [257]. Проте, загальна рекомендована мінімальна місткість коливається в діапазоні від 0,75 до 5,0 денних норм іригаційної потреби [257].

Натомість, для розрахунку об'єму акумулювання дощової води рекомендується застосовувати методику, що базується на місячних показниках атмосферних опадів [258] для конкретного географічного розташування вертикальної ферми, що розраховується за наступною формулою (3.2):

(3.2)

$$V = P \times S \times k,$$

де: V — проєктний об'єм резервуару для дощової води, л;

P — розрахункова кількість опадів за місяць з максимальною кількістю атмосферних опадів, мм;

S — ефективна площа поверхні збору дощової води, м²;

k — коефіцієнт ефективності збору води з відповідної поверхні, що залежить характеристики покриття ділянки збору опадів [258].

Розташування устаткування також має забезпечувати ергономічний доступ для технічного обслуговування, зокрема для установки знезараження на основі ультрафіолетових ламп (рис. 3.3.5, в-9) необхідно передбачити експлуатаційний буферний простір мінімальною шириною 2 м з боку влаштування змінних елементів, враховуючи, що довжина кварцових трубок становить близько 1,5 м [253]. Додаткові експлуатаційні вимоги також включають підтримку температурного режиму приміщення у діапазоні 5-30°C та відносної вологості не вище 85%, а також обладнання системою вентиляцією для запобігання акумуляції шкідливих випарів [253, 259].

В свою чергу, експлуатаційні вимоги для зони зберігання балонів вуглекислого газу (рис. 3.3.5, а-29, д) передбачають, що дане приміщення має забезпечувати достатній об'єм повітря для підтримки рівня кисню в межах 18-25%, інтегрує посилену системи вентиляції із розміщенням моніторів рівня CO₂, а випускні клапани балонів мають виводитись назовні [251]. Дане устаткування також доцільно розміщувати у інших приміщеннях, куди подається вуглекислий газ – кімнатах вирощування та пророщення рослин (рис. 3.3.5, б: №33, 41, 44, 45).

Процеси анаеробного бродіння потребують зон для встановлення біогазових установок і пов'язаної інфраструктури (див. рис. 3.2.10) такої, як резервуари зберігання біомаси, системи контролю температури, вдосконалену систем постачання повітря та видалення газів, автоматичне пожежогасіння та пожежну сигналізацію [165, 254].

Комплексний аналіз циркулярних стратегій підтверджує їх значний потенціал для підвищення екологічної стійкості вертикальних агропромислових об'єктів. Зниження викидів парникових газів та оптимізація ресурсоспоживання у будівлях вертикальних господарств безпосередньо залежить від імплементації принципів локальної самодостатності та зовнішнього симбіозу. Таким чином, впровадження та адаптація відповідних просторово-планувальних рішень, що орієнтовані на забезпечення ефективного управління ресурсами виробництва, є необхідною умовою забезпечення сталості всієї архітектурної системи ферми.

Висновки по третьому розділу

1. Встановлено, що основними компонентами екологічного впливу вертикальних ферм під час фази функціонування будівлі є енергоспоживання (44,2%), використання добрив (3,2%), споживання води (0,2%) та насичення CO₂ (5,5%), що необхідні для забезпечення процесу вирощування рослин.

2. Впроваджено систему критеріїв оцінки циркулярних стратегій, що враховує не лише їх екологічну ефективність (потенціал заміщення ресурсів, зниження GHG), але й архітектурну релевантність для подальшої систематизації та імплементації у просторово-планувальну структуру будівлі вертикальної ферми.

3. Серед зовнішніх стратегій найбільш ефективними визначено симбіотичні кооперації із муніципальними та промисловими системами, що здатні повністю замінити ресурси виробництва (енергія, поживні речовини, CO₂) та знизити GHG на 22-93% у порівнянні з лінійною системою, що, в свою чергу, впливають на особливості місцезоташування ферми та функціонально-планувальну структуру будівлі.

4. Проаналізовано архітектурні прийоми впровадження внутрішніх стратегій самозабезпечення, що мають потенціал заміщення ресурсів від 0,1% до 100% із можливістю знизити GHG на 1,7-83% завдяки інтеграції фотоелектричних панелей, розміщення вітряків, влаштування систем рециркуляції фільтрату та компостування відходів.

5. Систематизовано результати відповідно до взаємозв'язку між типом стратегії, виробничим потоком та архітектурним рівнем об'єкту, а також та надано практичні рекомендації щодо архітектурної імплементації циркулярних стратегій: на рівні «місто» - через оптимальне розташування відносно міської інфраструктури та оптимізацію генерального плану; на рівні «об'єкт» - через функціонально-планувальну організацію та конструктивні рішення; на рівні «простір» - через деталізацію розміщення обладнання, технічних систем та експлуатаційні вимоги.

6. Надано рекомендації щодо містобудівного розташування вертикальних ферм, що передбачають оптимальне розміщення будівлі у радіусі до 20 км від

джерела вторинної сировини та передбачення роздільних логістичних вузлів для менеджменту вхідних та вихідних потоків виробництва, а також наведено вимоги щодо влаштування та параметрів основних архітектурних елементів ділянки підприємства.

7. Встановлено прийоми щодо функціонально-планувальної організації будівлі для імплементації циркулярних стратегій: розміщення зон переробки відходів у підвальних рівнях; влаштування приміщень для зберігання та обробки вторинних ресурсів поблизу систем їх менеджменту; інтеграція фотоелектричних панелей у світлопрозорі конструкції із співвідношенням звичайного та фотоелектричного скла у співвідношенні від 40-20% до 60-80%.

8. Наведено перелік основного обладнання для імплементації стратегій використання дощової води (резервуари для зберігання, системи фільтрації, цистерни чистої води), рециркуляції фільтрату (баки для відпрацьованого й очищеного фільтрату, установки знезараження) та анаеробного бродіння (біогазові установки, ємності зберігання біомаси, системи контролю температури) та надано рекомендації щодо розрахунку резервуарів для зберігання водних ресурсів відносно денної потреби в іригації та місячного об'єму опадів регіону.

9. Надано експлуатаційні вимоги до приміщень розміщення наведеного обладнання: забезпечення ергономічного доступу для технічного обслуговування (мінімальний буферний простір 2 м для установок знезараження), підтримка оптимальних параметрів мікроклімату (температура 5-30°C, відносна вологість до 85%), посилена вентиляція для приміщень зберігання та утилізації CO₂ з моніторами його рівня, а також впровадження вогнестійких матеріалів та конструкцій.

РОЗДІЛ IV

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУРНО-ПРОСТОРОВИХ РІШЕНЬ ВЕРТИКАЛЬНИХ РОСЛИННИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

4.1 Містобудівні рекомендації розміщення рослинницьких агро-промислових комплексів

Відповідно до встановленої методики, що передбачає поступову деталізацію інформації (див. розділ 2.1), доцільно розпочати розробку архітектурно-просторових рішень вертикальних рослинницьких господарств із дослідження загальної функціональної структури даних об'єктів та їх ролі у містобудівній системі у вигляді принципової структурно-графічної моделі міської мережі агро-господарств.

Не зважаючи на характеристики запропонованих економічних та містобудівних концепції (див. розділ 2.1) у контексті їх застосування для мережі вертикальних господарств, жодна з цих моделей не враховує такі важливі аспекти, як міське зонування, транспортна інфраструктура та взаємозв'язок із архітектурними й виробничими параметрами будівлі. В свою чергу, це породжує необхідність розробки повноцінної системи містобудівної інтеграції, що враховує дані особливості разом із специфікою вертикальних агропідприємств.

Таким чином, розглянуті теорії, закладають базу для утворення моделі інтеграції рослинницьких комплексів, засновану на принципі ієрархічної адаптації будівель ферм. Пропонується система, яка визначає ключові параметри згідно з різними рівнями об'єкту. Дані параметри включають особливості розташування, архітектурні та операційні характеристики ферми, що також базуються на попередньо визначених класифікаційних моделях (див. розділ 1.3).

Перш за все, пропонується виділити чотири міські масштаби інтеграції вертикальних ферм, позначені як "рівні обслуговування міста" [61, 62]: *4-й – міський рівень, 3-й – міжрайонний, 2-й – районний та 1-й – локальний*. Кожен рівень спрямований на обслуговування одного або декількох груп споживачів

різних масштабів продовольчого попиту: 1-й рівень – місцеві продуктові магазини, кафе, ринки та приватні підприємці; 2-й – міні-маркети, ресторани та ринки; 3-й – супермаркети, мережеві ресторани, міські ринки, дистриб'ютори з помірним та високим попитом на продукти харчування; 4й – гіпермаркети, великі мережі супермаркетів, дистриб'ютори з помірним та високим попитом на продукти харчування.

В свою чергу, припускається, що параметри вертикальних ферм залежать від рівня обслуговування, враховуючи співвідносні характеристики, серед яких особливості розташування (транспортна інфраструктура, функціональне зонування) та цільові групи споживачів (рис. 4.1.1). Ці фактори визначають ключові параметри архітектурного та операційного дизайну, серед яких: висотність будівлі, можливості функціонального розширення чи кооперації, потужність виробництва, спеціалізація продукції та впровадження стратегій сталого розвитку. Таким чином, кожен рівень обслуговування має специфічні проєктні характеристики, що відповідають його функціональній ролі та масштабу.

Зокрема, вертикальні підприємства *4-го (міського) рівня* обслуговування орієнтовані на забезпечення значних обсягів поставок для споживачів 4-го та 3-го рівнів. Враховуючи те, що розташування цих споживачів є у різних частинах міста, розміщення таких ферм має оптимізувати час доставки продукції до всіх кінцевих точок. Господарства цього рівня здебільшого представляють собою великі автономні агропромислові комплекси, що потребують значної площі для задоволення комунальних, логістичних та виробничих потреб. Тож, найбільш доцільним є їх розташування у великих транспортних вузлах, локальних промислових зонах, на околицях або в приміських районах.

Прикладом вертикальної ферми 4-го рівня є проєкт *Bustanica Emirates*, реалізований *Emirates Flight Catering* та *Crop One Holdings* у Дубаї (рис. 4.1.2, «*Bustanica, OAE*»). Ця триповерхова будівля загальною площею 30 тис. квадратних метрів розташована поблизу міжнародного аеропорту Аль-Мактум, що забезпечує оптимальну логістичну доступність, як для постачання в місцеві продовольчі мережі, так і для національних чи експортних забезпечень [260, 261]. Виробнича

потужність об'єкту становить понад 1000 тон листової зелені на рік, що забезпечується 27 приміщеннями для вирощування, розподілених на трьох рівнях споруди, що також робить її однією з найбільших вертикальних ферм у світі.

Вертикальні ферми *3-го рівня обслуговування* орієнтовані на задоволення потреб споживачів середнього масштабу, зокрема супермаркетів, мережеских ресторанів та місцевих ринків. Характерною рисою таких об'єктів є їхній значний потенціал для функціональної кооперації, що передбачає інтеграцію з різноцільовими об'єктами, або функціонального розширення, що включає доповнення виробництва комерційними, громадськими чи іншими структурами.

Розташування цих господарств є оптимальним, як і у межах спеціалізованих міських центрів відповідно до їх трансфункціонального призначення, так і в промислових територіях, транспортних вузлах або приміських районах, які, в свою чергу, забезпечують зручний доступ до різноманітної інфраструктури. Таким чином, проектування таких ферм може варіюватися від автономних високопродуктивних виробництв до інтегрованих систем, здатних адаптуватися до специфічних потреб міського середовища.

Вертикальне господарство у паризькому передмісті Роменвіль від архітектурної фірми Pimelgo (рис. 4.1.2, «Pimelgo, Франція») представляє собою приклад комплекс міжрайонного рівня обслуговування. Архітектурна структура складається з двох функціональних блоків будівлі загальною площею 2000 м² на якій влаштовано 1000 м² культивацийного простору. Комплекс також включає освітній простір та ресторан для продажу вирощеної продукції, що розташовані на першому поверсі, в той час як виробничі зони влаштовані на верхніх рівнях споруди [262].

До об'єктів *2-го (районного) рівня обслуговування* належать компактні вертикальні ферми або малі архітектурні форми, зокрема модульні установки, адаптовані для інтеграції в соціальні, комерційні та культурні простори. Такі ферми спрямовані на обслуговування мінімаркетів, локальних продовольчих ринків, продуктових магазинів, ресторанів і кафе, задовольняючи потреби як 2-го, так і 1-го рівня споживачів. Їх розташування є доволі гнучким і може бути влаштовано в

різних частинах міста, обмежуючись потребою у зручній транспортній доступності, достатньому просторі для оптимальної функціональності та, за потреби, можливості інтеграції в існуючу інфраструктуру.

Наприклад, вертикальна ферма, спроектована компанією Kono Designs у Токіо (рис. 4.1.2, «Pasona Farm, Японія»), інтегрована в 9-поверхову офісну будівлю компанії Pasona Group [263], і є яскравим прикладом об'єкта 2-го рівня обслуговування. Основне завдання ферми полягає у забезпеченні продуктами місцевого кафетерію, який обслуговує співробітників компанії. Продукція вирощується у спеціально облаштованих приміщеннях на даху та у підвальних рівнях будівлі, що мінімізує просторові витрати першочергових зон. Крім того, фермерські системи інтегровані в інтер'єри офісу: вони розташовані на стінах, у конференц-залах та загальних зонах, виконуючи додаткову функцію озеленення та створення сприятливого мікроклімату. Працівники також можуть брати участь у процесі вирощування, що слугує інструментом для підвищення екологічної обізнаності та зменшення стресу.

Завдяки такому рішення Kono Designs досягла подвійної мети: забезпечення локального сталого виробництва продуктів харчування та створення здорового, комфортного офісного середовища, інтегруючи принципи соціальної відповідальності й інноваційного використання внутрішнього простору.

Фермерські господарства *місцевого (1-го) рівня обслуговування* зазвичай реалізують принцип нульової доставки, що передбачає їх розташування безпосередньо в межах території потенційного споживача, зокрема місцевих продовольчих ринків та закладів харчування. Такий підхід дозволяє мінімізувати транспортні витрати та скоротити термін зберігання продукції.

Прикладом таких господарств є вертикальні модульні ферми, розроблені компанією Infarm (рис. 4.1.2, «Infarm, Німеччина»). Їх конструкція являє собою автономні контейнери з площею 25 м² і висотою 5 метрів, а основною їх спеціалізацією є вирощування комерційно-привабливих культур, таких як листові і мікро-зелень, які оптимально підходять для компактних умов. Врожайність таких

об'єктів сягає близько 4,5 тонн на рік, що робить їх компактним, проте продуктивним рішенням для інтеграції у супермаркети та ресторани [264].

Зазначені рівні вертикальних ферм та співвідносні особливості, як наслідок, обумовлюють притаманні характеристики самої будівлі, зокрема, потенціал для функціонального розширення та кооперації, що є важливою частиною сталого розвитку таких об'єктів згідно з принципами економічної ефективності.

Таким чином, для потужних вертикальних ферм на міському рівнях найефективнішими стратегіями є науково-промислові рішення, що обумовлено їх специфічним розташуванням, частіш за все віддаленим від соціальних центрів міста. В даному випадку, розширення передбачає інтеграцію великих дослідницьких лабораторій, експериментальних площ для інноваційних методів вирощування та сучасних засобів контролю якості продукції. Завдяки цьому такі ферми стають платформами для наукових досліджень, які сприяють вдосконаленню технологій вертикального фермерства на більш глобальному рівні.

Незважаючи на переважно віддалене розташування від соціальних центрів населення, ферми 4-го рівня мають також значний потенціал для освітнього розширення. Відповідно, вони можуть використовуватися як бази для навчання і стажування студентів університетів та інших навчальних закладів, забезпечуючи доступ до сучасних технологій та виробничих процесів.

Також для ферм даного рівня є доцільною функціональна кооперація, зокрема, промислового типу, що реалізується через розширення існуючих виробничих потужностей або симбіотичне партнерство з іншими підприємствами. Використання спільної інфраструктури значно знижує витрати на нове будівництво та сприяє раціональному використанню ресурсів, підвищуючи ефективність функціонування великомасштабних агропідприємств.

Вертикальні ферми 3-го (міжрайонного) рівня характеризуються високою адаптивністю, що робить їх придатними для реалізації різноманітних стратегій функціональної кооперації та розширення. Такі ферми здатні ефективно реагувати на потреби міської інфраструктури через наукове співробітництво з університетами, соціальну взаємодію з громадськими центрами, промислово

кооперацію з прилеглими підприємствами або комерційну співпрацю з мережами супермаркетів. Унаслідок цього міжрайонні вертикальні ферми виконують роль багатофункціональних вузлів міської структури, сприяючи міській продовольчій безпеці, соціальній інтеграції та досягненню цілей сталого розвитку.

Вертикальні ферми 2-го (районного) рівня, попри їх відносно невеликий масштаб, зберігають значний потенціал для розширення за рахунок локалізованих стратегій, таких як впровадження освітніх програм або створення точок прямого продажу продукції. З іншого боку, компактність цих господарств також робить доцільним функціональну кооперацію завдяки адаптивній інтеграції в існуючі міські структури. Зокрема, в офісні будівлі, громадські центри, торговельні заклади, а також в старі промислові приміщення з метою рефункціоналізації таких об'єктів. Такий підхід не лише забезпечує максимальну ефективність використання простору і ресурсів, але й сприяє соціальному залученню, створюючи нові можливості для співпраці з місцевими громадами та організаціями.

Надзвичайна компактність локальних-ферм 1-го рівня також обумовлює раціональність застосування функціональної кооперації. Завдяки своїй гнучкості, такі підприємства легко пристосовуються до розміщення в наукових, комерційних і державних установах, забезпечуючи виробництво свіжих продуктів харчування безпосередньо у цільовій точці. Така інтеграція сприяє локальній продовольчій безпеці, зменшуючи витрати на транспортування, а також додає цінності міським структурам завдяки їх доповненню інноваційним та екологічно орієнтованими рішеннями.

Окрім функціональної структури, запропонована ієрархічна система також визначає співвідносні архітектурно-операційні характеристики будівель вертикальних рослинницьких господарств відповідно до багато-критеріальної класифікаційної моделі.

Перш за все, такі параметри, як об'ємно-просторова структура та висотність вертикальних агропідприємств, мають відображати їх виробничу потужність та функціональні призначення, втілюючи принципи цілісності та гармонізації. Тож, для високо-врожайних ферм 4-го рівня є притаманними окреморозміщені

багатоповерхові або висотні конфігурації, із каркасною, оболонковою та великопрольотною конструктивно-планувальною схемою, що є оптимально пристосованою для розміщення відповідного технологічного устаткування.

У випадках використання одноповерхових споруд, їх численна місткість досягається завдяки значній висоті приміщення, що може досягати близько 15 метрів. Такі об'ємні рішення сприяють більш ефективному використанню горизонтального простору, водночас підтримуючи технологічні потреби та масштаби виробництва, необхідні для задоволення значного попиту на продукцію.

Крім того, у певних випадках, об'єкти даного рівня виконуються у вигляді напівприбудованих або комбінованих структур, що підтримує доцільність інтеграції додаткового функціонального призначення, наприклад, науково-дослідних компонентів. Окрім архітектурної гармонізації, такий підхід також дозволяє ефективно ізолювати лабораторні приміщення та організувати додаткові шляхи евакуації, підвищуючи безпеку об'єкта в надзвичайних ситуаціях.

Вертикальні ферми 3-го рівня обслуговування, характеризуються значною гнучкістю об'ємно-просторових рішень, що дозволяє реалізувати різні архітектурні конфігурації — від окремо розташованих споруд до комбінованих. Висота таких об'єктів зазвичай коливається від мало- до високо-поверхових, залежно від функціональних вимог і контекстуальних особливостей. Ця адаптивність забезпечує ефективну інтеграцію з міською інфраструктурою, дозволяючи враховувати локальні архітектурно-планувальні умови, а також можливості розширення чи кооперації. Відповідно, вибір конкретного об'ємно-просторового формату здійснюється з урахуванням зазначених особливостей.

Ферми 2-го рівня обслуговування, хоча можуть влаштовуватись як окремі споруди, найчастіше реалізуються у форматі комбінованих або інтегрованих конфігурацій. Ці компактні проекти, зазвичай низької або середньої поверховості (1–9 поверхів), сприяють інтеграції з існуючими різноцільовими міськими структурами, такими як громадські, комерційні чи освітні будівлі. В свою чергу, використання комбінованих та вбудованих структур дозволяє не тільки максимально ефективно використовувати простір, знижуючи витрати на нове

будівництво, а також забезпечує гармонійну інтеграцію в архітектурний контекст об'єкта.

Вертикальні ферми 1-го рівня обслуговування, подібно до об'єктів 2-го рівня, також зазвичай реалізуються у форматі вбудованих або комбінованих конфігурацій. Так мікро ферми, інтегровані як одно рівневі модулі або як спеціалізовані приміщення, розташовуються на окремому поверсі чи в структурі окремої зони.

Такий підхід підкреслює їхню універсальність імплементації в існуючі об'єкти, дозволяючи цілісну інтеграцію з супермаркетами, ресторанами, громадськими просторами чи з такими захисними спорудами, як бомбосховища і укриття. Як наслідок, такі мікро ферми виконують не лише роль локального постачальника свіжих продуктів, але й сприяють сталому розвитку, покращуючи екологічний і соціальний баланс міських структур, а також відповідну продовольчу безпеку.

Виробнича потужність та спеціалізація культур є також характерними параметрами ферм, які суттєво відрізняються залежно від рівня обслуговування. Таким чином, потужні міські господарства характеризуються їх значною продуктивністю, яка перевищує 500 тон врожаю на рік. Відповідно, масштаб та матеріально-технічні можливості таких операцій уможлиблює вирощування різноманітних культур в структурі одного комплексу. Серед них, як і більш комерційно-доцільні рослини такі, як зелень, томати, огірки, полуниця, так і відносно експериментальні чи вузько направлені – квіти, лікарські трави, канабіс чи інші фрукти й овочі.

На 3-му (міжрайонному) рівні обслуговування функціонують вертикальні ферми середньої потужності, які щорічно виробляють від 50 до 500 тон врожаю. Дані підприємства також можуть бути полі-спеціалізованими в межах однієї ферми. Проте, безпосередній набір культур для вирощування переважно охоплює найпоширеніші овочі і фрукти – томати, огірки, перець, листову та мікро-зелень і полуницю.

		характеристики	рівні обслуговування			
			4-й	3-й	2-й	1-й
ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ	ТОЧКИ ЗБУТУ	Дистриб'ютори з помірним та високим попитом	■	⊗	⊗	⊗
		Гіпермаркети	■	■	⊗	⊗
		Супермаркети	■	■	■	■
		Районні ринки	■	■	■	⊗
		Ресторани	■	■	■	■
		Мінімаркети	⊗	⊗	■	■
		Місцеві продуктові магазини	⊗	⊗	■	■
	МІСЦЕЗНА-ХОДЖЕННЯ	Великі транспортні вузли	■	■	⊗	⊗
		Промислові зони	■	■	■	⊗
		Громадські центри	⊗	■	■	■
Комерційні центри		■	■	■	■	
Житлові громади		⊗	■	■	■	
АРХІТЕКТУРНІ ПАРАМЕТРИ	ФУНКЦ. ДОПОВ.	Наукове доповнення	■	■	⊗	⊗
		Соціально-громадське доп.	⊗	■	⊗	⊗
		Освітнє доповнення	■	■	■	⊗
		Комерційне доповнення	■	■	■	⊗
	ФУНКЦ. КООП.	Наукова кооперація	⊗	■	■	■
		Соціально-громадська кооп.	⊗	■	■	⊗
		Промислова кооперація	■	■	■	■
		Комерційна кооперація	⊗	■	■	■
	СТРУКТУРА	Окремо стоячі	■	■	■	■
		Напівприбудовані	■	■	■	■
		Вбудовані	⊗	■	■	■
		Комбіновані	■	■	■	■
	ПОВЕРХОВІСТЬ	Малоповерхові (<3 рівнів)	■	■	■	■
Середньоповерх. (4-9 рівнів)		■	■	■	⊗	
Багатоповерхові (9-20 рівнів)		■	■	⊗	⊗	
Висотні (>20 рівнів)		■	⊗	⊗	⊗	
ОПЕРАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ	ВИРОБ. ПОТУЖ.	Низькопродуктивні	⊗	⊗	■	■
		Середньопродуктивні	⊗	■	■	⊗
		Високопродуктивні	■	■	■	■
	СПЕЦІАЛІЗАЦІЯ	Мікро-/листова зелень	■	■	■	■
		Ягоди	■	■	■	■
		Фрукти та овочі	■	■	■	⊗
		Канабіс	■	■	■	■
		Трави/медичні рослини	■	■	■	■
	ЕКО-СТАЛІСТЬ	Лінійна модель виробництва	⊗	⊗	■	■
		Зовнішнє повторне використання та переробка	■	■	■	■
Внутрішнє повторне використання та переробка		■	■	■	■	

■ рекомендовано

■ можливо

⊗ не доцільно

Рис. 4.1.1 Матриця функціональних, архітектурних та операційних параметрів вертикальних господарств в залежності від їх рівня обслуговування міста

Вертикальні господарства 2-го та 1-го рівнів обслуговування орієнтовані на невелике виробництво, обсяг якого не перевищує 50 тон продукції на рік. На комерційному масштабі, такі ферми переважно спеціалізуються на вирощуванні високорентабельних культур з коротким циклом вирощування, таких як мікрогрін, трави та листові зелені. З іншої точки зору, функціональна кооперація таких об'єктів, а також відповідне технологічне забезпечення, надає їм можливість вирощувати різноманітні рослини відповідно до потреб приймаючого об'єкта. Наприклад, у якості експериментального вирощування або наукових дослідження за певним напрямком чи культурою.

Дана модель інтеграції вертикальних ферм і відповідні рівні також визначають особливості застосування стратегій сталого розвитку – типу організації технологічного процесу. Тож, на міському рівні обслуговування, що характеризується великими виробничими потужностями і відповідно високооб'ємними відходами, доцільно впроваджувати замкнений або комбінований цикл виробництва із внутрішніми стратегіями повторного використання та переробки ресурсів. Зокрема, із такими підходами, як системи рециркуляції води, екстракту поживних речовин та переробки органічних залишків у біогаз. Такі технології не лише оптимізують використання ресурсів, але й створюють можливості для зовнішньої інтеграції, наприклад, переробки муніципальних біо-відходів для виробництва електроенергії чи добрива. Завдяки цьому ферми можуть стати ключовим елементом циркулярної економіки міста, що мінімізує, як і внутрішній, так і міській екологічний вплив та підвищує енергоефективність самої будівлі.

Вертикальні підприємства міжрайонного рівня, завдяки своїй універсальній структурі та середнім виробничим потужностям, також демонструють значний потенціал для впровадження як внутрішніх, так і зовнішніх стратегій циркулярності. Незважаючи на більш обмежений обсяг переробки порівняно з господарствами 4-го рівня, ці ферми здатні інтегрувати системи рециркуляції води і поживних речовин та базову переробку органічних залишків, водночас адаптуючись до потреб локальної інфраструктури. Крім того, вони можуть

слугувати вузловими елементами міських продовольчих систем, забезпечуючи важливу економічну та екологічну функцію, спрямовану на утилізацію міських відходів та підвищення локальної продовольчої безпеки.

Компактні вертикальні ферми районного рівня мають потенціал організації внутрішнього комбінованого циклу, як і ферми попереднього рівня. У разі інтеграції ферм до більш масштабних будівель або комплексів, доцільними також стають додаткові зовнішні стратегії симбіотичного використання ресурсів, які переважно залежать від особливостей функціональної кооперації.

Господарства локального рівня, зазвичай невеликі за масштабом, часто стикаються з обмеженнями у впровадженні комплексних стратегій циркулярності через дефіцит простору та ресурсів. У таких умовах найпоширенішим підходом залишається використання лінійних виробничих моделей. Проте, інтеграція цих господарств у міські об'єкти може забезпечити значний екологічний ефект внаслідок симбіотичних підходів. Наприклад, у рамках комерційної кооперації вертикальні ферми, інтегровані в ресторани, здатні використовувати надлишкове тепло від кухонного обладнання для забезпечення оптимальних кліматичних умов для вирощування продукції. Це сприяє підвищенню загальної енергоефективності системи, зменшенню впливу на довкілля та покращенню сталості такого рослинництва.

Таким чином, розробка загальної структурно-графічної моделі мережі вертикальних ферм передбачає ієрархічну організацію досліджених рівнів обслуговування, що розподіляються в межах міської структури відповідно до масштабів населеного пункту та продовольчого попиту. Відповідно, організація даної структури пропонується на основі шестикутних решіток Кристаллера, які рівномірно заповнюють територію міста та передбачають розташування ферм різного рівня відповідно до контекстуального масштабу.

Перш за все, припускається, що ідеальна модель мережі має відповідати загальному споживчому попиту населеного пункту, що забезпечує можливість покриття всіх типів рослинної продукції, яка може бути ефективно вирощена у вертикальних господарствах. Однак, враховуючи сучасний стан розвитку

агровиробництва, доцільно орієнтувати таку систему на компенсацію імпорتنих поставок або для оперативного постачання продукції з обмеженим терміном зберігання чи для інших специфічних локальних потреб.

Виходячи з цього, диференціація моделі відбувається залежно від загального потенціалу міста, що визначається його розміром – кількістю населення, а саме: найзначніші або крупніші міські поселення (понад 800 тис. осіб), значні або крупні (500-800 тис.), великі (250-500 тис.), середні (50-250 тис.) та малі (до 50 тис.) [250].

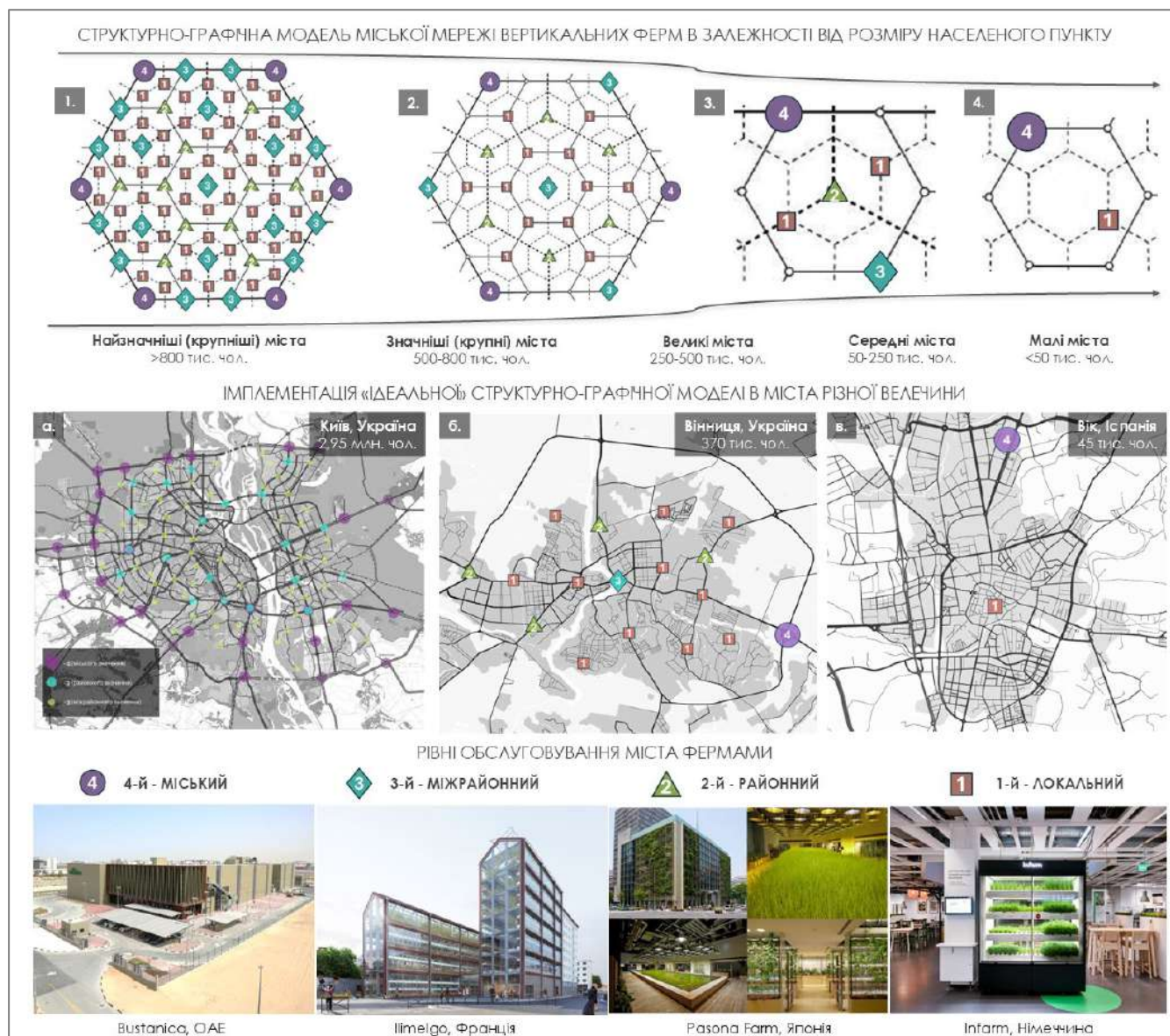


Рис. 4.1.2 Структурно-графічна модель мережі міських вертикальних рослинницьких господарств в залежності від групи населеного пункту

Для найзначніших та крупних значних міст (рис. 4.1.2, 1, а) характерне формування ідеальної ієрархічної системи, що включає всі рівні вертикальних ферм з повною диференціацією їх функціональних, архітектурних та операційних характеристик. В такій моделі периферійний пояс представлений комплексами підприємств четвертого та третього рівнів, що функціонують у зонах великих транспортних та промислових вузлів. Внутрішні радіуси включають ферми третього та другого рівнів, що розташовуються у соціальних, комерційних та освітньо-наукових кластерах. Подальше масштабування передбачає розміщення господарств першого рівня, що інтегруються безпосередньо в супермаркети, ресторани, чи інші заклади різного функціонального призначення.

Для значних та великих поселень (рис. 4.1.2, 2) передбачається скорочення периферійного рівня системи, що обмежує кількість ферм четвертого та третього рівнів на зовнішньому радіусі структури. Водночас ферми третього рівня можуть бути розташовані як у промислових районах, так і в центральній частині міста, формуючи продовольчі хаби середнього масштабу. Внутрішній рівень міста включає ферми другого рівня у функціональних центрах та локальні ферми першого рівня, що забезпечують безпосередню інтеграцію агропродовольчих процесів у міській інфраструктурі.

Для середніх населених пунктів (рис. 4.1.2, 3) модель передбачає розміщення поодиноких ферм четвертого або третього рівня на периферії міста, тоді як у центральній частині міста розташовані ферми другого та першого рівнів.

У малих містах (рис. 4.1.2, 4, в) вертикальні ферми представлені мінімальною кількістю об'єктів, що виконують роль основного продовольчого вузла. Основним типом підприємства в такій структурі є ферма четвертого рівня, що розміщується на периферії, та повноцінно забезпечує продовольчий попит населення. Додатково допускається розташування локальної ферми першого рівня, що може бути інтегрована у супермаркет чи ресторан.

Запропонована структурно-графічна модель мережі вертикальних рослинницьких ферм на основі шестикутних решіток та ієрархічних рівнів обслуговування населення [61, 62] фермами дозволяє оптимізувати розміщення

агрокомплексів у поселеннях різної величини, що, в свою чергу, сприяє раціональному використанню міських територій, мінімізації логістичних витрат та підвищення доступності мешканців до якісної рослинницької продукції. Гнучкість моделі створює передумови для сталого розвитку сучасних продовольчих урбан-систем, а також сприяє ефективній інтеграції рослинницьких господарств в існуючі містобудівні структури завдяки адаптації співвідносних функціональних, архітектурних та операційних характеристик об'єкту відносно різних масштабів.

4.2 Організація функціонально-планувальної структури вертикальних агрогосподарств

Наслідуючи ієрархічну архітектурну методологію організації вертикальних ферм, подальше дослідження стосується об'єктного рівня, впроваджуючи реалізацію попередньо розглянутих принципів проектування та безпосередньо напрацювань рівня «місто». Пропонується розглянути рекомендації щодо диференціації функцій ферм, функціонально-планувальні схеми та перелік приміщень з їх взаємозв'язками.

Встановлені особливості містобудівного розташування продемонстрували, що вертикальні господарства можуть бути стратегічно інтегровані в урбан середовище для максимального використання їх переваг, водночас вирішуючи проблеми, характерні для кожного рівня масштабів обслуговування. Відповідно, функціонально-планувальна типологія будівлі вертикальної ферми має враховувати специфіку даних рівнів. Таким чином, для даної ієрархічної відповідності запропоновано модель функцій ферми з трьома диференційованими наборами приміщень: розширеним, базовим і мінімальним (рис. 4.2.1)

Розширений набір приміщень враховує не тільки базові потреби підприємства відповідного рівня, а також відповідає співвідносному функціональному розширенню вертикальної ферми. Тож, він охоплює широкий спектр зон, що дозволяє забезпечити інтеграцію об'єкта з міськими функціями забезпечуючи першочергове промислове призначення.

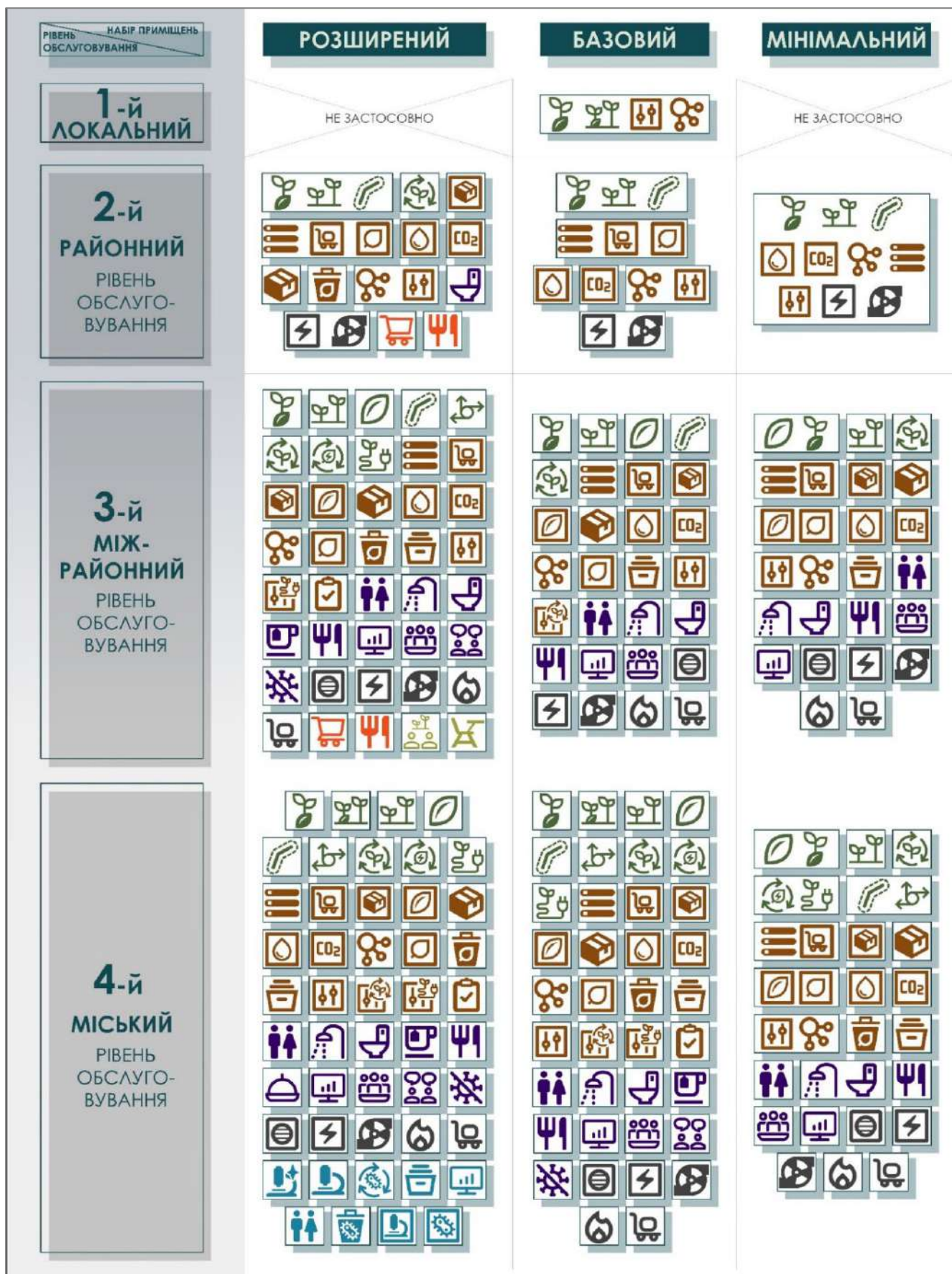


Рис. 4.2.1 Диференціація набору приміщень у будівлях вертикальних ферм залежно від рівня обслуговування (легенда приміщень наведена на рис. 4.2.3)

В свою чергу, базовий набір включає оптимальний склад приміщень, орієнтованих на основне цільове призначення агрокомплексу — вирощування сільськогосподарських культур, імплементуючи поєднання функціонального та ефективного архітектурного планування. Скорочений набір містить лише необхідні базові приміщення для належної роботи об'єкта, що підходить для обмежених умов та компактних структур.

Відповідно до класифікаційної моделі, зони функціонального розширення згруповані у чотири основні категорії: громадські – рекреаційні зони, зелені насадження, багатофункціональні відкриті зони; освітні – музеї, виставкові майданчики, навчальні хаби, експозиційно-виробничі ділянки; комерційні – супермаркети, ресторани, кафе, багатофункціональні робочі простори; наукові – лабораторії різного профілю, що забезпечують дослідницьку діяльність.

Важливо зазначити, що інтеграція громадських, освітніх та комерційних приміщень у структуру вертикальних ферм повинна відповідати чинним державним будівельним нормам (ДБН). В українському контексті це передбачає дотримання таких вимог: ДБН В.2.2-12:2019 "Планування і забудова територій", ДБН В.2.2-9:2018 "Громадські будинки та споруди", ДБН В.2.2-16:2019 "Культурно-видовищні заклади", ДБН В.2.2-25:2009 "Підприємства харчування (зклади ресторанного господарства)", ДБН В.2.2-23:2009 "Підприємства торгівлі", ДБН В.2.2-28:2010 "Будинки і споруди адміністративно-побутового призначення", ДБН В.2.2-40:2018 "Інклюзивність будинків і споруд", ДБН В.1.1-7:2016 "Пожежна безпека об'єктів будівництва" та ДБН В.1.2-7:2021 "Пожежна безпека". Дотримання цих нормативно-правових документів забезпечує відповідність додаткових функцій вертикальних ферм вимогам безпеки, інклюзивності та громадського використання, сприяючи їх цілісній соціальній інтеграції та функціональній універсальності.

З архітектурно-планувальної точки зору, інтеграція громадських, освітніх і комерційних категорій функціональних приміщень у структуру вертикальних ферм відбувається функціонально автономно. Ці приміщення зазвичай мають спільну інфраструктуру з вертикальною фермою, але залишаються ізольованими від

основних виробничих зон, що мінімізує втручання у технологічні процеси. Винятком є експозиційні зони, які можуть мати обмежений функціональний або візуальний зв'язок із сільськогосподарськими операціями завдяки влаштування огорожень, перегородок чи світлопрозорих захисних панелей.

На відміну від інших функціональних категорій, група наукових приміщень потребує подальшої специфікації, оскільки вони зазвичай функціонують у тісній взаємодії з основними сільськогосподарськими приміщеннями. Їх розширений розгляд також необхідний через питання, пов'язані з безпекою та обмеженнями, пов'язаними з лабораторними приміщеннями. Повний перелік приміщень наукової категорії наведено на рисунку 4.2.3 («наукові приміщення»).

Проте, перелічені функції та їх специфікація є другорядними для вертикальних ферм, адже саме основні приміщення забезпечують ключові процеси виробництва. Таким чином, вони включають в себе, як і базові приміщення, характерні для промислових об'єктів, та спеціалізовані для вертикального фермерства (рис. 4.2.3).

Відповідно, до груп цих приміщень належать: (1) виробнича група, що включає приміщення для забезпечення повного циклу виробництва у вертикальному рослинництві відповідно до основних етапів технологічного процесу; (2) інженерно-складська група, що орієнтована на ефективну логістику та управління процесами у вертикальній фермі; (3) побутово-службова група, що виконує допоміжну функцію, підтримуючи ефективність роботи персоналу і самої будівлі; (4) та технічна група, що складається із приміщень необхідних для функціонування ферми та забезпечення безперебійної роботи систем.

На основі досліджених груп приміщень та визначених функцій фермерських господарств кожного рівня обслуговування, запропоновано функціональну структуру прототипування з урахуванням специфіки міського рівня. Для фермерських господарств 4-го урбаністичного рівня базовий набір приміщень охоплює всі перелічені функціональні групи із повним набором приміщень, які, в свою чергу, необхідні для оптимального забезпечення значних виробничих потужностей таких господарств.

Скорочений набір приміщень для ферм даного рівня передбачає оптимізацію просторових рішень шляхом об'єднання або вилучення певних зон. Зокрема, можливою є інтеграція функцій підготовки насіння та приміщень для пророщування в єдину зону або елімінація розсадника, що є доцільним для об'єктів із обмеженим простором та відповідною технологічною специфікою.

Натомість, розширений набір приміщень включає вторинні функції, які доповнюють основну діяльність об'єкта, наприклад, створення лабораторних блоків, виставкових площ або зон роздрібної торгівлі продукцією.

Базовий набір приміщень 4-го рівня обслуговування трансформується в розширений набір для великих міжрайонних сільськогосподарських підприємств. В даному випадку, такий набір ефективно застосовується не лише для високопродуктивних господарств даного рівня, але й для різноцільового функціонального розширення ферми.

В свою чергу, базовий набір приміщень адаптується шляхом скорочення до основних функціональних зон, необхідних для стабільної роботи підприємства. До ключових елементів такого набору належать зони пророщування та вирощування, сортування і пакування продукції, складські приміщення, а також допоміжні зони для персоналу й технічних потреб.

Скорочений варіант передбачає об'єднання певних функціональних зон: наприклад, приміщень для пророщування і підготовки насіння, сховищ для насіння і сировини, а також інтеграцію декількох центрів управління та систем подачі поживних речовин. Такий підхід оптимізує використання простору, зберігаючи при цьому ефективність основних виробничих процесів.

Для ферм 2-го рівня, завдяки їх компактності та низькій продуктивності, можливе спрощення просторової організації через комбінування функціональних зон. У базовому наборі планування структурується на три ключові блоки: виробничий (зони пророщування і вирощування), складський та інженерний (приміщення для зберігання і управління системами), а також технічний (електричні та механічні системи).

Розширений набір дозволяє інтегрувати додаткові функції, такі як невеликі торгові або елементи закладу харчування. Для такого набору зони можуть бути також поділені з можливим додаванням приміщень для переробки відходів.

Натомість, скорочений набір приміщень фокусується на об'єднанні всіх систем у єдину зону, що особливо актуально для контейнерних ферм чи господарств зі стратегією нульової доставки, де складські та пакувальні приміщення значно обмежені або повністю відсутні.

Ферми локального рівня, через їхній малий масштаб, обмежені базовим набором приміщень, що включає тільки основні функціональні зони для вирощування та підтримки життєзабезпечення. Їх неавтономний характер обумовлює інтеграцію з існуючими будівлями, що дозволяє використовувати загальні технічні, інженерні, кадрові та складські приміщення основної структури. Проте, такий підхід значно знижує потребу у виділеному просторі, забезпечуючи ефективність організації виробництва на мінімальних площах та сприяючи економії відповідних ресурсів.

Рисунок 4.2.1 демонструє узагальнено диференціацію набору приміщень у будівлях вертикальних ферм залежно від рівня обслуговування. Спираючись на розроблені функціонально-планувальні прототипи, подальший розвиток структури передбачає деталізацію ключових архітектурних рішень, включаючи зонування, зв'язки між приміщеннями та заходи безпеки. основу для подальшої оптимізації їх архітектурно-планувальної організації.

Перш за все, архітектурні рішення для вертикальних ферм повинні узгоджуватися з відповідними будівельними нормами. Незважаючи на відсутність спеціальних національних або міжнародних стандартів для таких об'єктів, найбільш відповідним документом серед українського правового забезпечення є ДБН В.2.2-2:2024 "Теплиці та парники", який містить рекомендації для подібних споруд.

В свою чергу, склади мінеральних добрив та засобів захисту рослин слід проектувати згідно з ДБН В.2.2-7, а адміністративні та побутові приміщення – згідно з ДБН В.2.2-28 та ДБН В.2.2-40, в той час, як загальні складські будівлі та

приміщення повинні відповідати ДБН В.2.2-43, а холодильні камери – ДБН В.2.2-42. Використання цих норм забезпечує відповідність архітектурних рішень функціональним, санітарно-гігієнічним та безпековим вимогам, що є критично важливим для створення стійких і ефективних вертикальних ферм.

Розділена потоків системи є одним із ключовим аспектів ефективного функціонально-просторового планування. Відповідно, для будівель вертикальних господарств це досягається завдяки влаштування чотирьох логістичних блоків: для персоналу (працівників) ферми; для вхідних потоків (ресурси, матеріали, устаткування); для «чистих» вихідних потоків (готова продукція); та для «брудних» вихідних потоків (біо-відходи, сміття).

Логістичні блоки для вхідних та вихідних потоків системи повинні мати безпосередній доступ до санітарно-побутової зони ділянки, що забезпечує оптимальну організацію технологічних процесів. В свою чергу, вхідну групу для персоналу доцільно розташовувати у фронтальній частині будівлі з урахуванням близькості до транспортно-пішохідної інфраструктури та забезпечення безперешкодної евакуації із території господарства.

Окрім цього, раціональне просторове планування такого типу агро-об'єктів також залежить від технологічної організації підприємства. Згідно із класифікаційною моделлю (див. розділ 1.3), вертикальне фермерство реалізується через одну з двох організаційних схем: лінійну або циклічну. Відповідно, лінійний підхід включає послідовне виконання чотирьох ключових етапів та організацію співвідносних функціональних зон в структурі будівлі: пророщування рослин; вирощування продукції; подальша обробка врожаю (сортування, миття, пакування); зберігання та транспортування продукції до споживачів.

Циркулярний підхід додає п'ятий етап і відповідну зону – валоризацію відходів, де залишки, що підлягають вторинній переробці, обробляються окремо від основного продукту (див. розділ 3.3). Таким чином, їстівні частини врожаю переходять на стадії пакування та зберігання, розподіляючи на даному етапі «чисті» та «брудні» потоки рослинної продукції.

Як наслідок, ці моделі визначають планувальну організацію ферми, забезпечуючи співвідносність між виробничими етапами та їх відповідними функціональними зонами, що передбачає розділення будівлі на п'ять основних виробничих зон, а також допоміжні зони для персоналу та технічні кімнати.

Такі технологічні особливості також є основоположними для ефективних функціональних взаємозв'язків безпосередньо між приміщеннями у вертикальних господарствах. Відповідно, останнє приміщення одного етапу повинно мати пряме горизонтальне або вертикальне (наприклад, ліфтові платформи) з'єднання з початковими зонами наступного етапу, що також мінімізує залежність від коридорів і, як наслідок, підвищує ефективність використання площ. Зокрема, повноцінна схема таких зв'язків з переліком основних приміщень у вертикальних агро-підприємствах наведена на рис. 4.2.3.

Проте, згідно з принципом збереження часу та зусиль [61, 182], об'ємно-планувальний розподіл цих блоків залежить від структури будівлі, а саме її поверховості. Наслідуючи дані засади, в малоповерхових фермах планувальна послідовність зонування може відповідати або лінійній структурі (рис. 4.2.2, 1а-в, 2а-г) з використанням витягнутої прямокутної форми (рис. 4.2.2, №1), або радіальній (рис. 4.2.2, 1г-д) – з використанням квадратної форми плану, наприклад, куба або квадратного тора (рис. 4.2.2, №1-3).

При такій поверховості будівлі, блокування функціональних зон та приміщень здійснюється напряму відносно послідовності технологічного процесу (рис. 4.2.2, 1а-д, 2а-г), що починається із логістичної зони, яка має безпосередній доступ до санітарно-побутової території ділянки.

Дана зона забезпечує приймання первинних матеріалів і ресурсів та має функціональний зв'язок із відповідними складськими приміщеннями для зберігання сировини, насіння, обладнання, продовольчих продуктів для персоналу і т.д (рис. 4.2.3).

Подальший рух виробничого потоку здійснюється до зони пророщування, звідки згодом рослинна продукція напряму транспортується до основного приміщення вирощування.

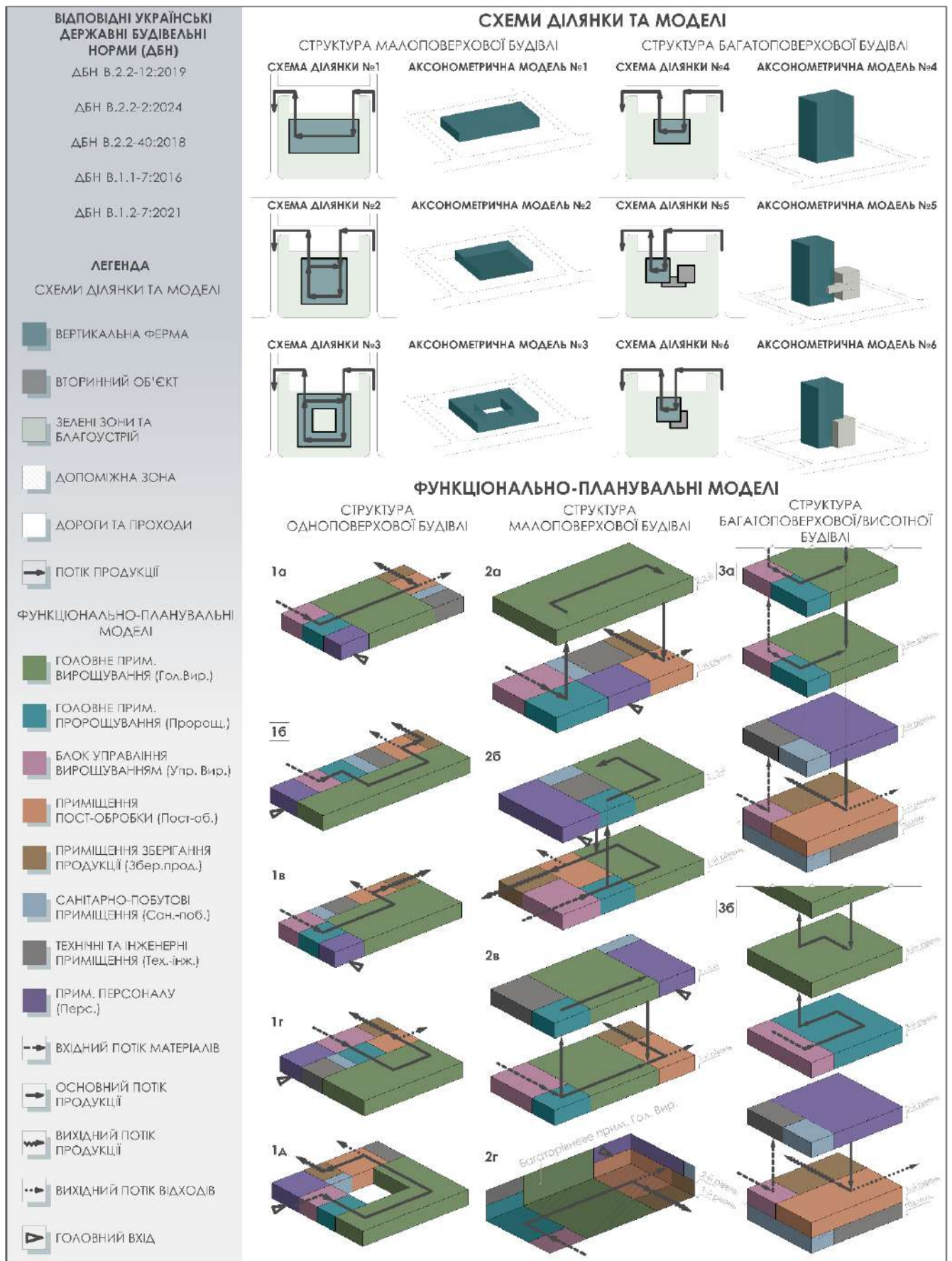


Рис. 4.2.2 Функціонально-планувальні схеми організації вертикальної ферми в залежності від її поверховості

В свою чергу, дану першу зону рекомендовано блокувати із розсадником, приміщенням зберігання і кімнатою підготовки насіння, а другу – із приміщенням зберігання візків для транспортування рослин, буферною зоною зібраного врожаю та, за можливості, із складами виробничих матеріалів та зоною управління ресурсами (деталізація функціональних зв'язків між даними приміщеннями наведена на рис. 4.2.3).

Після завершення етапу культивації, зібраний врожай спрямовується до приміщень сортування та пакування, де відбувається його подальша обробка. Архітектурно-планувальна організація цієї зони передбачає поділ на окремі функціональні простори, розташовані у логічній послідовності: приміщення первинного сортування, зона миття, пакувальний цех, холодильна камера та зона відвантаження готової продукції, що, в свою чергу, сполучається із відповідною санітарно-побутовою територією ділянки. Дані приміщення також доцільно блокувати із диспетчерським пунктом (за його наявності), а також із складами зберігання пакувальних матеріалів та іншого допоміжного обладнання (рис. 4.2.3).

Таким чином, у приміщенні первинного сортування відбувається диференціація врожаю на два потоки: "чистий" – придатна для подальшої обробки і продажу продукція, та "брудний" – органічні відходи виробництва, включаючи неїстівні частини рослин, пошкоджені екземпляри та інші залишки.

Для транспортування продукції у горизонтальному вимірі можуть використовуватися механічні конвеєри, що є ефективним для лінійної схеми, або спеціалізовані вантажні візки. Такий підхід дозволяє раціоналізувати логістику всередині ферми, мінімізувати витрати часу і підвищити автоматичність виробничих процесів [265].

В свою чергу, "брудний" потік спрямовується або до внутрішньої зони переробки відходів, або через окремий вихід до спеціально обладнаних зовнішніх зон для зберігання біо-відходів із сміттєвими контейнерами на території ділянки. Такий підхід забезпечує оптимальне розмежування потоків системи, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам виробництва харчової продукції та сприяє ефективній організації технологічного процесу.

Малоповерхова структура будівлі також передбачає блокування різновисотних функціональних зон (рис. 4.2.2, 2г), де центральне багаторівневе приміщення вирощування оточується периметрально розташованими допоміжними зонами стандартної висоти. Останні вертикально групуються у відповідності до висоти основного об'єму та розділення вхідних й вихідних потоків: з одного боку –зони пророщування та управління ресурсами, а з протилежного – пост-обробки, зберігання врожаю та переробки біо-відходів.

Для багаторівневих об'єктів архітектурно-планувальне наслідування технологічного процесу здійснюється у вертикальному вимірі, а послідовність операційних етапів та руху продукції забезпечується через переміщення між зонами згідно з логікою "петлі осі Z" (рис. 4.2.2, 3а-б). Відповідно, на перших рівнях будівлі, доцільно розміщувати:

- зону розвантаження та приймання вхідних потоків, звідки за допомогою ліфтів чи горизонтальних зав'язків матеріали та ресурси спрямовуються у виробничі, складські й інженерні приміщення (рис. 4.2.3);
- зону сортування, підготовки та пакування продукції, яка отримує зібраний врожай із виробничих приміщень ліфтовими системами, а після необхідних обробок, продукція переміщується на складські площі (рис. 4.2.3);
- зону тимчасового зберігання готової продукції, в яку після завершення пакувальних операцій врожай доставляється спеціальними візками або конвеєрними системами, звідки в згодом передається на зону завантаження (рис. 4.2.3 та подальшу доставку).

В свою чергу, у підземних рівнях, розміщення технічного блоку та приміщень для переробки відходів є обґрунтованим з точки зору дотримання санітарно-гігієнічних норм та правил безпеки (див. розділ 3.3). Крім того, використання підземного простору сприяє раціоналізації архітектурного планування будівлі, звільняючи верхні поверхи для розташування приміщень, де необхідно використовувати природне освітлення.

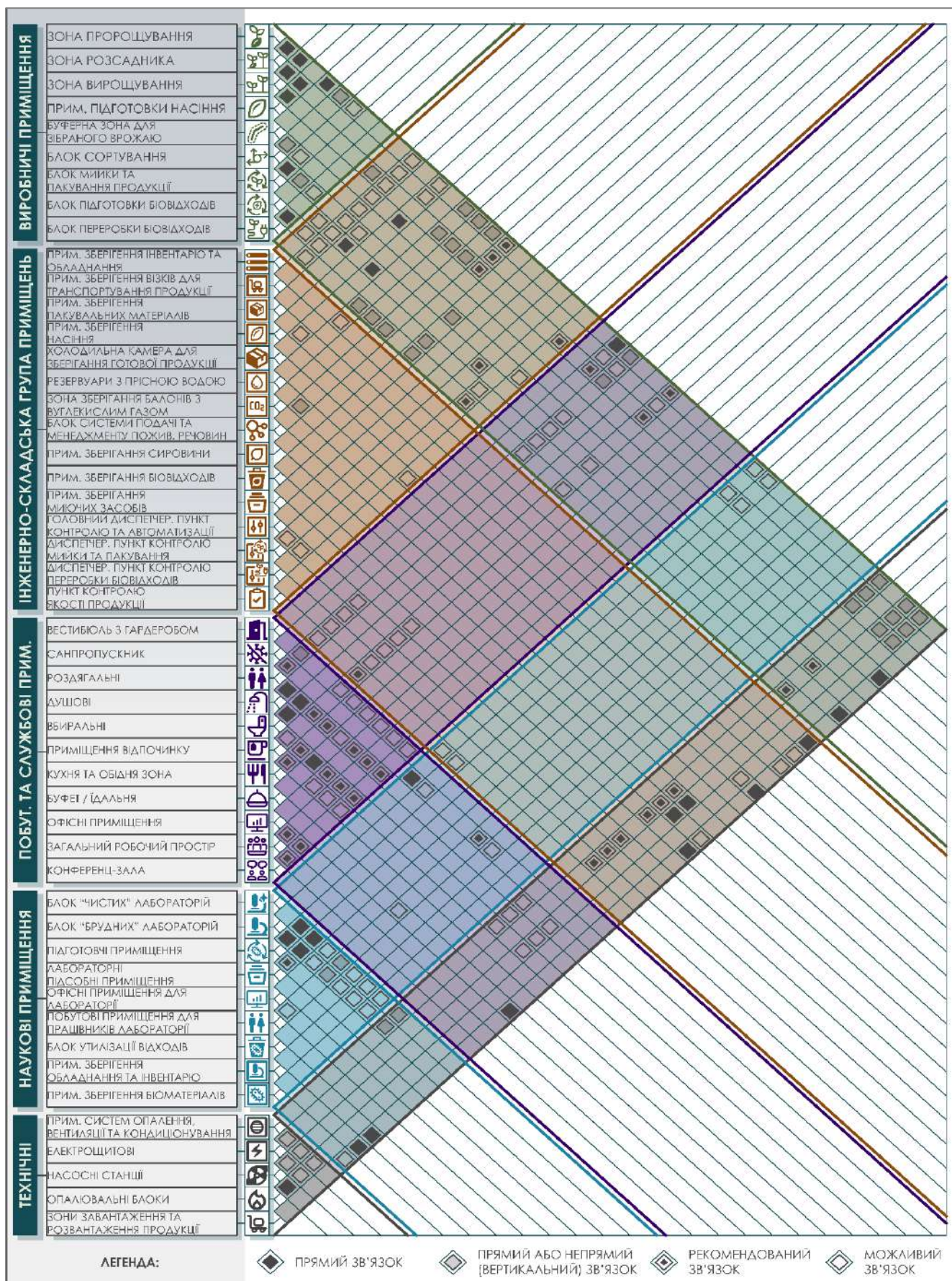


Рис. 4.2.3 Схема функціональних взаємозв'язків між приміщеннями у будівлі вертикального рослинницького господарств

Таким чином, зони пророщування та вирощування рекомендовано розташовувати на верхніх рівнях будівлі, забезпечуючи оптимальне використання доступного простору та освітлення. Їх взаємне розташування може бути організоване за децентралізованою або централізованою схемою.

При децентралізованій схемі (рис. 4.2.2, 3а) ці зони розташовуються на одному рівні, а переміщення рослин здійснюється за допомогою мобільних транспортних засобів, таких як візки. У разі централізованого підходу (рис. 4.2.2, 3б), приміщення для вирощування розміщуються на вищих рівнях, тоді як приміщення для пророщення – під цими поверхами, що дозволяє транспортувати продукцію між рівнями за допомогою спеціалізованих вантажних підйомників.

Вибір відповідної системи залежить від спеціалізації на вирощуваннях культурах, функціональних вимог технологічного процесу та санітарно-гігієнічних обмежень, зумовлених умовами експлуатації. Наприклад, децентралізована схема є більш доцільною при полі-спеціалізації ферми, що відокремлює приміщення для вирощування і супутні зони відповідно до типу рослини. В свою чергу, це необхідно, адже забезпечення оптимальних параметрів середовища, зокрема, інтенсивності освітлення, температурних режимів, вологості, рівня концентрації вуглекислого газу та ін., варіюються в залежності від типу культури, що потребує фізичного розділення простору для оптимального та ресурсоефективного менеджменту процесів виробництва [39].

Кількість таких блоків та їх розташування можуть варіюватися залежно від конкретних умов проекту. Визначення їх поверховості та загальної висоти будівлі має враховувати містобудівні обмеження, особливості навколишньої забудови, розмір ділянки, виробничі потужності, а також технічні й інженерні можливості.

Окрім цього, оптимальне розміщення цих блоків біля скляних світлових фасадів, орієнтованих на схід-південь-захід, дозволяє максимально ефективно використовувати природне освітлення [46] для часткової чи повної заміни штучного. У свою чергу, таке рішення сприяє зменшенню витрат на штучні системи освітлення, які становлять основну частину затрат у вертикальному господарстві [118-120, 158]. Відповідно, внутрішнє розташування та конфігурація

модулів для вирощування рослин має бути організована з урахуванням забезпечення максимального доступу сонячного світла.

Забезпечення ефективних вертикальних транспортних комунікацій досягається завдяки влаштуванню сходових клітин, ліфтів та вантажних підйомників. Всі ліфти та вантажопідйомники в структурі ферм повинні бути окремо адаптовані для транспортування вхідних матеріалів, продукції, відходів та персоналу. Такий функціональний розподіл є критично важливим для забезпечення санітарно-гігієнічних норм [50, 52, 266], уникнення перехресних потоків, в тому числі «чистих» та «брудних», і підтримання безперебійної роботи системи. Кількість та розміри ліфтів визначаються технічними умовами проєкту та специфічними особливостями виробничого процесу, включаючи обсяги транспортування, частоту використання та габарити обладнання.

Проте, відповідність виробничим потокам – це не єдиний фактор, який слід враховувати при ефективному плануванні таких будівель. Безпека працівників і продукції повинна бути пріоритетом, що включає планування території, внутрішніх приміщень, зон для обробки відходів (див. розділ 3.3) і всіх існуючих лабораторних блоків відповідно до державних норм та інших регуляторних документів [165, 267–269]. Зокрема, задля безпеки персоналу, необхідно передбачати щонайменше два евакуаційні виходи. У випадках, коли є лише один вихід, допустима кількість людей у приміщенні не повинна перевищувати 50, а самі коридори для евакуації повинні мати мінімальну висоту 2,1 м, а ширину 1,0 м [165].

Запропонована структура для функціонально-планувального прототипування вертикальних ферм забезпечує гнучкий підхід, що враховує складні кореляції між просторовим розподілом, виробничими потоками та питаннями безпеки. Визначені типи приміщень, їх взаємозв'язки та інтеграція з відповідними нормативами створюють базу для ефективного проєктування сталих вертикальних ферм. Ця система сприяє вирішенню продовольчих та екологічних викликів у містах, забезпечуючи узгодження між теоретичною базою міської інтеграції та практичними архітектурними рішеннями.

4.3 Просторові параметри будівель вертикальних рослинницьких ферм

Попередньо встановленні функціонально-планувальні рішення вертикальних ферм окреслюють фундаментальні засади та прийоми формування загальної об'ємно-планувальної структури будівлі. Проте, для їх практичного впровадження, необхідно встановити методики розрахунку відповідних параметрів будівлі. В свою чергу, це забезпечить повноцінну модель проєктування, що починається від загальної інтеграції вертикальних господарств у містобудівну систему та завершується конкретними рекомендаціями щодо їх архітектурного планування.

Таким чином, на рівні «простір» головною метою є визначення кількісних параметрів проєктування, пристосованих до будівель рослинницьких господарств. Відповідно, пропонується запровадити дану модель на встановлених принципах економічної ефективності та цілісності й гармонізації. Таким чином, архітектурні показники вертикальних рослинницьких комплексів, в першу чергу, мають бути співвідносним із технологічними та операційними особливостями даних підприємств.

Відповідно, архітектурний аналіз зосереджений на дев'яти діючих вертикальних фермах, що спеціалізуються на вирощуванні зелені, основні параметри яких наведено у додатку В, таблиця В.7. Окрім цього, вісім з цих об'єктів надали дані щодо спеціалізації на культурах, врожайності та площі вирощування, що, в свою чергу, було використано для встановлення необхідного взаємозв'язку просторових параметрів із цими виробничими показниками.

Не зважаючи на відносно обмежену вибірку, це яскраво підкреслює поточний стан галузі, де відкриті дані залишаються лімітованими через новизну та конкуренцію в секторі. Проте, можливо стверджувати, що отримані результати все ж дозволяють визначити первинні архітектурно-просторові закономірності, а також створюють базу для подальших досліджень.

Отже, в рамках першого етапу дані зібрані із загальнодоступних мереж було категоризовано за уніфікованою системою класифікації, що, в свою чергу,

забезпечило можливість порівняння різних характеристик будівель вертикальних господарств в межах різних масштабів і конфігурацій.

Відповідно, запропоновано розділення просторів ферм на дев'ять функціональних зон: основне приміщення для вирощування (Гол.Вир.), зона для пророщування (Пророщ.), зона для управління ресурсами та системами (Упр.Вир.), зона для пост-обробки та пакування врожаю (Пост-об.), зона для зберігання продукції (Збер.прод.), техніко-інженерні приміщення (Тех.-інж.), санітарно-побутові та приміщення для загального обслуговування будівлі (Сан.-поб.), адміністративні та приміщення персоналу (Перс.), а також вертикальні та горизонтальні зв'язки (Звз.). Деталізація зон представлена у додатку В, табл. В.8.

Таки чином, аналіз пропорційного розподілу площ між категоріями (рис. 4.3.1, табл. 4.3.1, додатку В, табл. В.9) виявив стабільні закономірності, незважаючи на суттєві відмінності в розмірах об'єктів і масштабах виробництва. Зокрема, таблиця 4.3.1 представляє результати порівняльного аналізу функціонально-просторового розподілу у вертикальних рослинницьких господарствах. Дані систематизовано за трьома ключовими показниками: відсотковим співвідношенням від загальної площі будівлі, квадратними метрами відповідної функціональної зони на одиницю площі загальної площі вирощування з обладнаннями та на одиницю тони місячного врожаю ферми.

Відповідно, встановлено, що основні приміщення для вирощування (Гол.Вир.) займають найбільшу частку загальної площі будівлі — у середньому 51%, з варіативністю від 44% до 65%. В свою чергу, ці коливання пояснюються специфікою вибору культур, технічними особливостями та архітектурними обмеженнями, пов'язаними з тим, що частина об'єктів є інтегрованими в приміщення існуючої будівлі.

Дослідження просторових параметрів у взаємозв'язку із площею вирощування, виявили закономірності, що дозволяють робити розрахунки на основі технологічних характеристик ферми. Зокрема, для кожного квадратного метра сумарної площі вирощування (сукупна площа поверхонь усіх модулів) необхідно близько $0,27 \text{ м}^2$ основної площі.

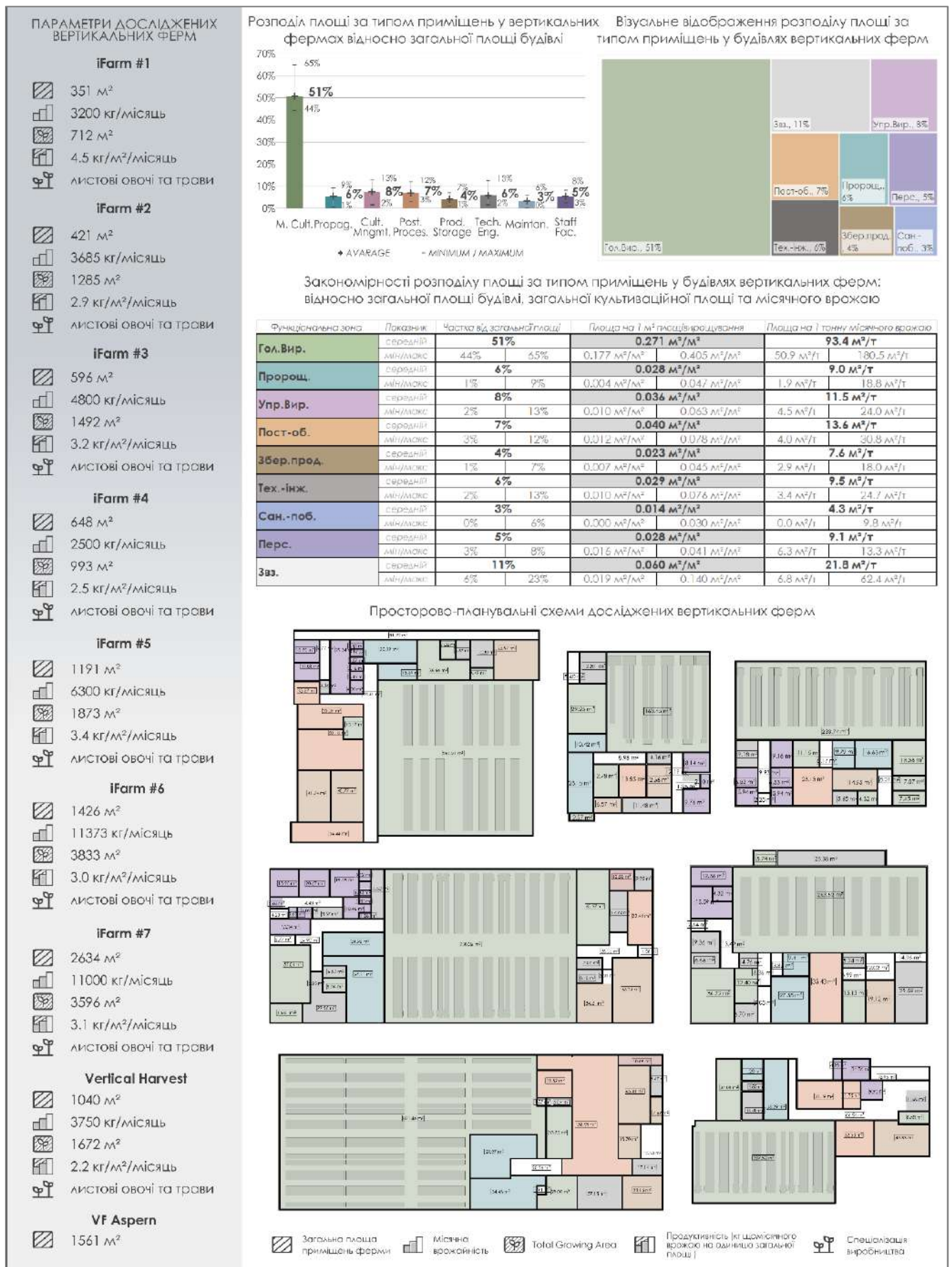


Рис. 4.3.1 Типові закономірності просторового розподілу у вертикальних рослинницьких господарствах на досліджених прикладах комерційних ферм

В свою чергу, сукупність усіх допоміжних приміщень (за винятком площі Гол.Вир.) вимагає в середньому 0,26 м² на 1 м² площі вирощування – співвідношення, що буде інтегровано як коефіцієнт площі додаткових приміщень (k_S). В даному випадку, це співвідношення, обрано як основний реферальний параметр через його вищу релевантність порівняно з відсотковим співвідношенням до загальної площі будівлі. Хоча цей коефіцієнт не враховує безпосередньо вертикальну складову простору, в ньому вже закладено комплексність багатоярусних систем вирощування, посиляючись на загальну площу вирощування на відміну від одновимірного показника площі підлоги, забезпечуючи таким чином більш комплексну основу для розрахунків просторового планування.

Таблиця 4.3.1

Результати порівняльного аналізу закономірностей просторового розподілу у вертикальних рослинницьких господарствах

Функціональна зона	Значення	Відсоток від заг. площі, %	Площа на 1 м ² площі вирощування, м ² /м ²	Площа на 1 тонну місячного врожаю, м ² /т
Гол.Вир.	<i>середнє</i>	51	0,27	93,4
Пророщ.	<i>середнє</i>	6	0,03	9,0
Упр.Вир.	<i>середнє</i>	8	0,04	11,5
Пост-об.	<i>середнє</i>	7	0,04	13,6
Збер.прод.	<i>середнє</i>	4	0,02	7,6
Тех.-інж.	<i>середнє</i>	6	0,03	9,5
Сан.-поб.	<i>середнє</i>	3	0,01	4,3
Перс.	<i>середнє</i>	5	0,03	9,1
Звз.	<i>середнє</i>	11	0,06	21,8

Аналіз закономірностей розподілу простору на основі місячної врожайності виявив значну варіабельність, де для основної зони Гол.Вир. середній показник становив 93,4 м²/т із коливанням від 50,9 до 180,5 м²/т. Таку різницю можливо пояснити відмінностями в ефективності технологій вирощування, культивацийними особливостями та операційними умовами. Як наслідок, це обмежує надійність застосування цього показника в якості розрахункового коефіцієнту, адже, в даному випадку, потрібні додаткові дані для забезпечення точності та співвідносності результатів.

Отже, дослідження підтвердило, що встановлені просторово-функціональні параметри вертикальних ферм забезпечують кількісні дані для архітектурного планування. Використання площі вирощування як базового модуля є найоптимальнішим через комплексну складову даного показника. Водночас відсоткове співвідношення площ приміщень до загальної площі будівлі доцільне при інтеграції ферм у вже існуючі споруди. Вони дозволяють визначати укрупнені параметри на ранніх стадіях проектування.

Однак дослідження має обмеження: лімітована вибірка та двовимірний підхід, що напряду не інтегрує складову вертикального простору. Тож, подальші напрацювання можуть охопити різні системи вирощування та культури, а також враховувати висоту приміщень.

В свою чергу, показник площі вирощування напряду залежить від особливостей гідропонних чи аеропонних модулів – їх конфігурації, розміру, кількості ярусів і т.д. Загалом, гідропонні системи зазвичай передбачають використання багатоярусних стелажів, а аеропонні — вертикальних веж (специфікація із різними типами модулів наведена в додаток В, рис. В.1). Відповідно, потрібно враховувати, що типологія устаткування визначає специфічні планувальні та експлуатаційні вимоги, які також впливають на просторове проектування.

Проте в межах даної роботи розглядається лише найпоширеніша конфігурація, яка також була використана в усіх попередньо проаналізованих фермах, а, зокрема, багатоярусний поличний модуль для гідропонної культивуації.

Таким чином, для визначення закономірностей просторового планування у зв'язку із основним обладнанням, було проведено додаткову архітектурну оцінку попередньо встановлених восьми вертикальних ферм (додаток В, табл. В.7, №1-8).

Зокрема, таблиця 4.3.2 відображає результати та систематизацію даного аналізу за такими параметрами: загальна площа приміщення (приміщень) вирощування Гол.Вир.; загальна площа сліду всіх культивуаційних модулів; відсоток площі, яку займають модулі від загальної площі.

Відповідно, встановлено, що культивацийні модулі займають в середньому 45% від загальної площі, з коливаннями від 36% до 63% на різних об'єктах (табл. 4.3.2, рис. 4.3.2). Дане значення, зокрема, як коефіцієнт площі модулів у культивацийних приміщеннях (k_M), імплементовано у подальшій математичній моделі, адже воно необхідне для розрахунку площі співвідносного приміщення відносно характеристики обладнання.

Таблиця 4.3.2

Результати просторового аналізу щодо закономірностей влаштування модулів вирощування у приміщенні Гол.Вир.

№ з/п	Назва ВФ	Площа Гол.Вир., м ²	Загальна площа сліду модулів, м ²		Частка площі зайнята модулями, %		
1.	iFarm 1	163	73		45		
2.	iFarm 2	234	99		42		
3.	iFarm 3	264	105		40		
5.	iFarm 4	288	124		43		
6.	iFarm 5	595	213		36		
7.	iFarm 6	730	338		46		
8.	iFarm 7	1272	551		43		
9.	Vertical Harvest	677	427		63		
	<i>середнє</i>	528	241		45		
	<i>мін/макс</i>	163	1272	73	551	36	63

Дане дослідження також виявило, що відстань між обладнанням становить в середньому 0,9 метра. Перш за все, даний розмір відповідає вимогам безпеки, зокрема ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва». В контексті виробничого процесу ВФ, такі проходи між устаткуванням можуть розглядатись як одиночні робочі місця, оскільки технологічний процес передбачає індивідуальну роботу операторів з культивацийними модулями при посадці, догляді та зборі врожаю [270, 271]. Відповідно, даний показник у 0,9 м відповідає мінімальній нормативній ширині проходів до одиночних робочих місць у межах одного приміщення, нормативно встановленій на рівні 0,7 м [165].

Окрім цього, для стелажної конфігурації, даний розмір також представляє оптимальний показник для функціональної ефективності виробничих процесів, що

забезпечує вільне оперування допоміжним обладнанням (рис. 4.3.3). Наприклад, габаритна ширина типових транспортних візків становить від 565 до 760 мм [272–275] залежно від кількості та розміру лотків для продукції. В свою чергу, механічні драбини, які необхідні для догляду за рослинами та для збору врожаю, мають ширину в діапазоні 700-960 мм [276–281], тоді як електричні підйомні платформи варіюються за шириною від 760-810 мм, в разі обслуговування обладнання з висотою до 6,3 м, до 1160-1410 мм для роботи з багатоярусним устаткуванням на висоті до 16 м [282–286].

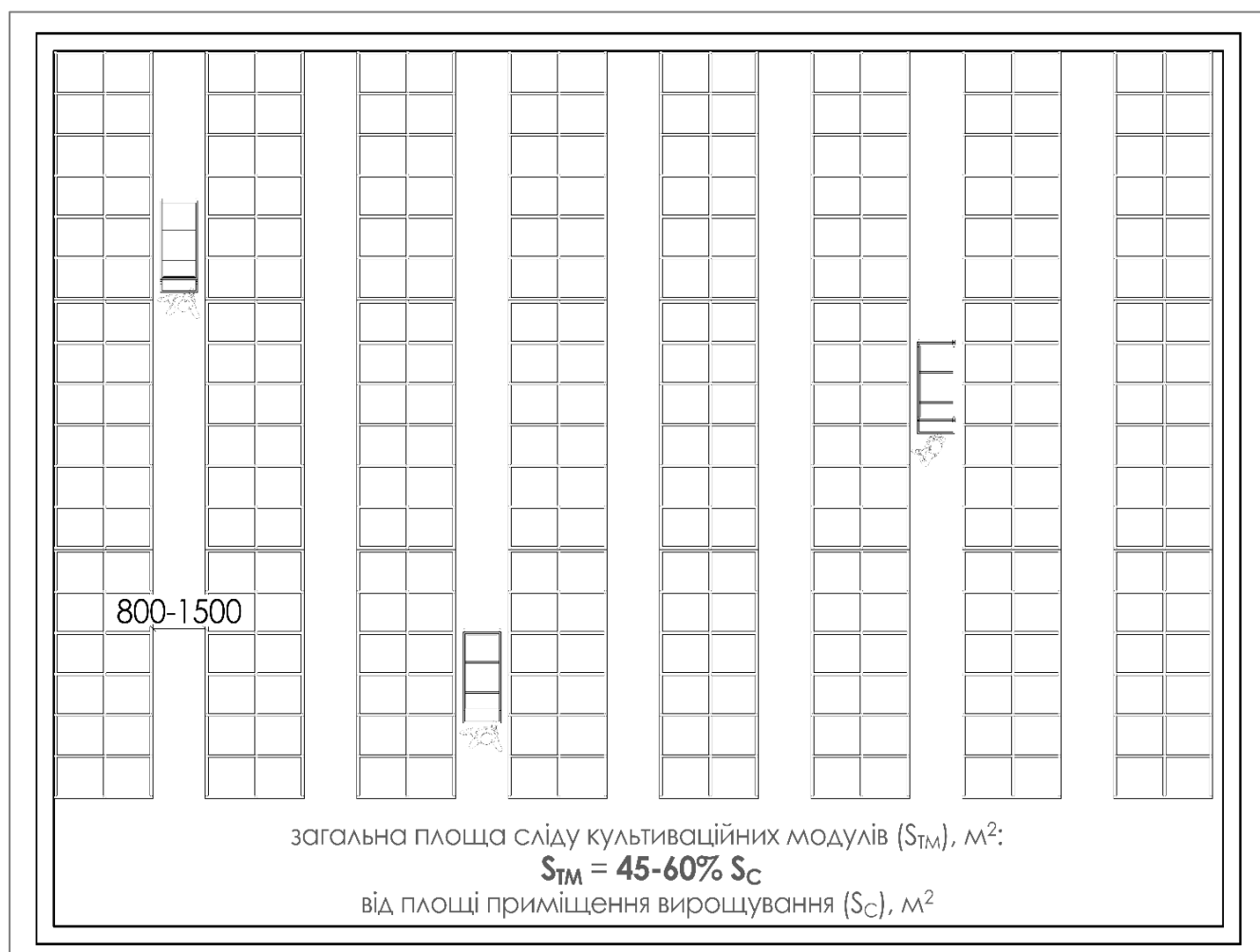


Рис. 4.3.2 Типовий план розстановки обладнання для приміщення вирощування при використанні стелажних гідропонних модулів

Таким чином, прохід 0,9 м забезпечує достатній простір для безпечного маневрування стандартних візків, драбин та компактних електро-підйомників з урахуванням технологічних зазорів. Однак, при використанні великогабаритних

підйомних платформ для обслуговування високих багатоярусних систем (рис. 4.3.4) ширина проходів повинна бути збільшена до 1,2-1,5 м.

Отже, одержані результати аналізу планувальних особливостей вертикальних ферм є подальшою основою для розрахункової моделі площі будівлі ферми, що використовує дві групи даних: специфічні проєктні показники та емпірично встановлені коефіцієнти, трансформуючи виробничо-технологічні параметри ферми у просторові характеристики.



Рис. 4.3.3 Приклади та геометричні параметри допоміжного обладнання необхідного для приміщення вирощування у вертикальних фермах [272–288]

Відповідно, первинні дані для проєкту вертикальної ферми отримуються у завданні на проєктування, який визначає бажану виробничу потужність (річний або місячний врожай, Y) на основі маркетингових досліджень і матеріально-технічного забезпечення, а також від виробника обладнання, який надає технічні характеристики модулів, зокрема, площу сліду (або розміри в плані) та врожайність одного модуля (S_M , Y_M) і площу вирощування з одиниці обладнання (S_G).

В свою чергу, емпірично отримані константи (k_M , k_S) в рівняннях представляють просторові співвідношення, що отримано в ході аналізу конкретних

прикладів. Таким чином, разом із додатковими вхідними даними щодо виробничої потужності ферми (Y) та параметрів обраного культивацийного модуля (Y_M та S_G), формула розрахунку площі будівлі, та її спрощена форма із застосування середніх значень коефіцієнтів, є наступними (поетапний розрахунок наведено в додатку Г):

(4.1)

$$S = \left(\frac{S_M}{k_M} \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \right) + \left(S_G \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \times k_s \right),$$

(4.2)

$$S = \left(\frac{S_M}{0,45} \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \right) + \left(S_G \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \times 0,26 \right),$$

де: S загальна площа приміщень будівлі вертикальної ферми, м²;

S_M – площа сліду одного модуля для вирощування культури, м²;

Y – цільова виробнича потужність, кг/рік;

Y_M – річна врожайність на один модуль, кг/рік;

S_G – площа вирощування (з усіх ярусів та поверхонь) одного модуля, м²;

k_M – коефіцієнт площі модулів у приміщеннях M.Cult, в середньому становить 0,45 (45%) з відхиленнями від 0,36 до 0,76 (36-76%);

k_s – коефіцієнт додаткових площ у співвідношенні до загальної площі вирощування (сумарна S_G усіх модулів), середнє значення 0,26 м²/м² з мінімумом-максимумом 0,08-0,52.

Дана математична модель, попри її спрощеність, забезпечує фундаментальну інформацію для попередніх проєктних рішень, встановлюючи взаємозв'язки між технологічними характеристиками та просторовими вимогами. Незважаючи на обмеження, такі як виключення вертикальних зав'язків, припущення про однорідність модулів та використання усереднених коефіцієнтів, отримані рівняння підкреслюють значний вплив операційних параметрів на архітектурне проєктування.

Крім того, ці дані формують основу для оцінки просторової ефективності та розробки рекомендацій для нової типології будівель вертикального фермерства, сприяючи оптимізації взаємозв'язків між виробничими специфікаціями таких промислових будівель, як вертикальні господарства, та їх об'ємно-просторовими параметрами.

Для доказовості твердження щодо впливу технологічних специфікацій об'єкту ВФ на ефективність архітектурних рішень, запропоновано подальше експериментальне моделювання, яке наочно відображає подібні комплексні взаємозв'язки. Спираючись на концептуальні засади параметричного моделювання та системного мислення, дослідження має на меті продемонструвати, як конфігурація обладнання фундаментально змінює просторову морфологію та операційну ефективність ферми.



Рис. 4.3.4 Приклади висотних багатоярусних стелажних модулів для вертикального фермерства

Розрахунок даного дослідження запропоновано на основі гіпотетичному великомасштабному вертикальному господарстві, призначеному для щорічного виробництва 500 тон салату у стелажних гідропонних модулях. Відповідно, основною змінною в цьому аналізі є кількість ярусів на один культивацийний модуль, що варіюється від 7 до 26 ярусів із сумарною площею вирощування на модуль 7,4-27,3 м² відповідно [289]. Незмінні параметри включають площу сліду одиниці обладнання, врожайності з одного ярусу модуля та деякі інших константи, детальна специфікація яких наведена в додатку Г.

Отже, встановлено, що зі збільшенням кількості ярусів у модулях, кілька ключових архітектурних параметрів зазнали значних змін разом з із продуктивністю модуля на квадратний метр площі підлоги. Зокрема, необхідна висота основного приміщення для вирощування (Гол.Вир.) і продуктивність одиниці обладнання є напрямку залежними від кількості ярусів культивацийної системи, як показано на рис. 4.3.5.

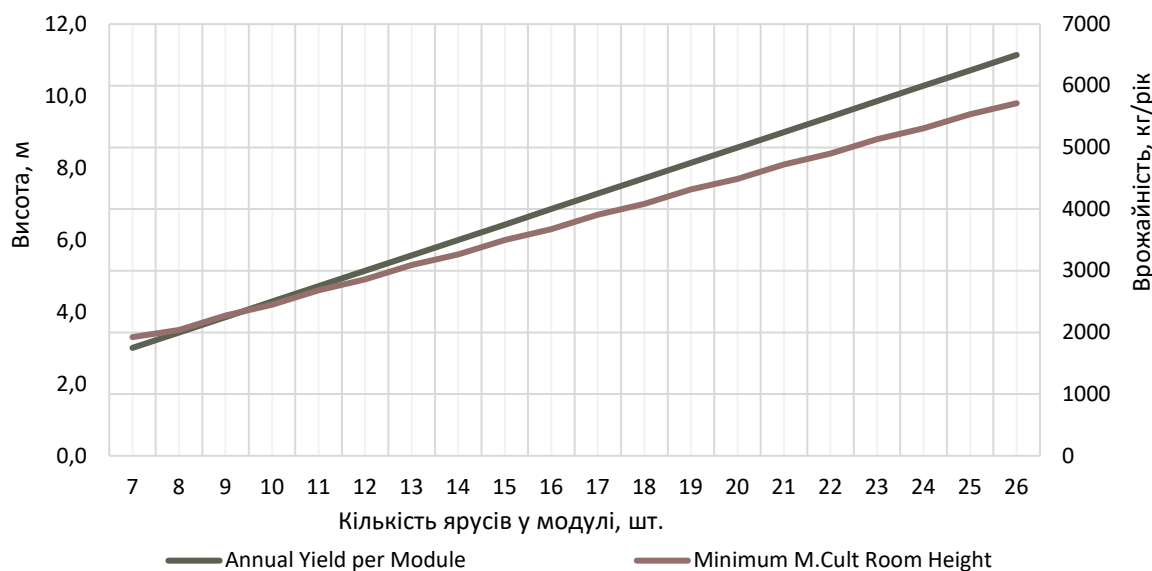
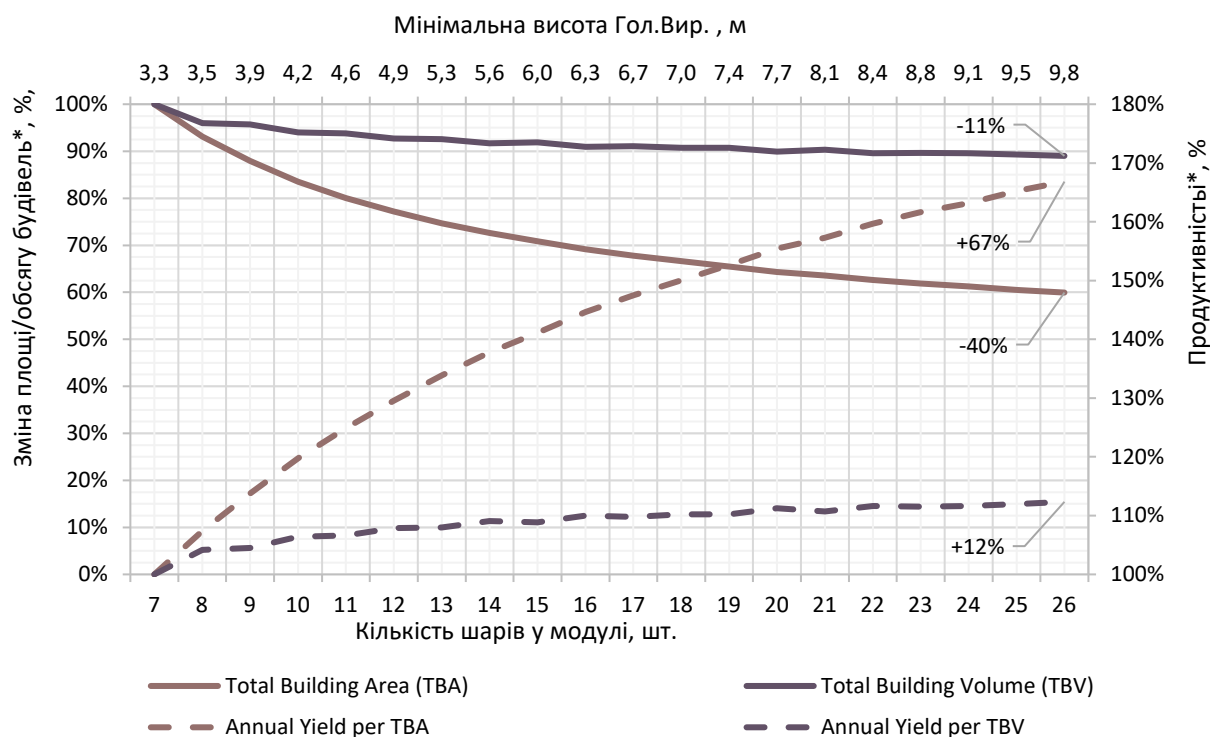


Рис. 4.3.5 Взаємозв'язок між кількістю ярусів у модулі з річною продуктивністю обладнання та вимогами до мінімальної висоти приміщення основного вирощування (Гол.Вир.)

Хоча такий прямий лінійний зв'язок є цілком передбачуваним, параметри площі та об'єму, натомість, демонструють нелінійну залежність від кількості рівнів стелажу (рис. 4.3.6). Зокрема, у порівнянні з 7-ярусним модулем (3,3 метри приміщення Гол.Вир. замість 3,2 було прийнято, щоб відповідати стандартній висоті допоміжних приміщень), загальна площа та об'єм будівлі зменшуються приблизно на 40% та 11%, відповідно, при збереженні річної виробничої потужності. Більше того, коефіцієнти продуктивності площі та об'єму (див. розділ 2.2) також демонструють стрімке покращення, зростаючи на 67% і 12% відповідно, що свідчить про суттєве підвищення ефективності використання простору будівлі.

Дане експериментальне моделювання виявило три ключові аспекти для архітектурного проектування: багаторівні системи значно покращують використання вертикальних та горизонтальних вимірів; вони сприяють створенню компактніших тривимірних конфігурацій завдяки підвищенню продуктивності ферми на одиницю виміру простору; та висувають нові вимоги до функціонально-планувальних рішень через різну висоту приміщень вирощування і супутніх зон.



* - у порівнянні з 7-ярусним модулем (висота приміщення Гол.Вир. прийнята рівною 3,3 метри)

Рис. 4.3.6 Вплив кількості ярусів у модулі та відповідної мінімальної висоти приміщення на площу, об'єм та показники продуктивності порівняно з 7-рівневим модулем

Хоча моделі є спрощеними та слугують інструментом попереднього проектування, вони підтверджують, що технологічні параметри обладнання фундаментально впливають на архітектурно-просторові рішення. В свою чергу, цей підхід влаштовує основу щодо покращення економічної ефективності вертикальних агро-комплексів. Відповідно, встановлений прийом має потенціал скорочення витрат завдяки впровадженню багаторівневих систем вирощування, і

як наслідок, зменшення будівельної площі та об'єму – економії земельних ділянок і ресурсів, необхідних для спорудження об'єкту.

Окрім виробничих приміщень, важливим є розрахунок санітарно-побутових зон для працівників підприємства, є невід'ємною частиною будівлі ферми, а також забезпечує необхідну інфраструктуру для ефективного робочого процесу. Перш за все, визначення необхідної кількості співробітників зайнятих ручною працею залежить від рівня автоматизації ферми та кількості операцій які потребують механічного втручання [270]. Відповідно, середньо-автоматизованого вертикального господарства, кожні 1000 квадратних метрів площі потребують 1220 робочих годин працівників щомісяця [270]. Зокрема, ці процеси передбачають такі завдання, як посів насіння, пророщування, догляд за посівами, збирання врожаю, післязбиральна обробка та загальне обслуговування об'єкта [270].

Таблиця 4.3.3

Розрахунок площі санітарно-побутових приміщень та одиниць обладнання

<i>Назва приміщення/обладнання</i>	<i>Індикатор</i>
Площа на одну особу, м ² , не менше	
Гардеробні	0.13
Комори для зберігання спеціального одягу:	0.04
Респіраторні кімнати	0.07
Кімнати для чергового персоналу з місцем для прибирального інвентарю	0.02
Вбиральня	0.02
Площа на одиницю обладнання, м ² , не менше	
Переддушеві кімнати з відкритими або наскрізними душовими кабінами	0.7
Замки (тамбури) біля туалетів з кабінами	0.4
Кількість осіб, що обслуговуються на одиницю обладнання	
Унітази та пісуари в туалетах	18/12
Умивальники та електричні сушарки для рук у тамбурах туалетів:	72/48
Напівдуші	15

В свою чергу, розрахунок санітарно-побутових приміщень базується на кількості співробітників за найчисельнішу зміну, що встановлюється в завданні на проектування відповідно до матеріально-технічних особливостей проєкту [250, 290]. На основі даного показника, відповідно до ДБН В.2.2-28:2010 визначаються мінімальні вимоги до площі приміщень гардеробних, комор, вбиральнь, душових

та кількості одиниць санітарно-гігієнічного обладнання на одного працівника (табл. 4.3.3).

Підсумовуючи, дослідження особливостей просторового планування ВФ встановило важливість врахування операційно-технічних характеристик для забезпечення ефективності архітектурних рішень. Запропоновані методи розрахунку та інші напрацювання роботи можуть також стати основою для розробки нормативно-методичної бази для проектування подібних агро-об'єктів. Водночас результати дисертації закладають фундамент для подальших наукових розробок, які мають охоплювати більший спектр типології обладнання і будівлі, різні рівні автоматизації ферми та дослідити вплив спеціалізації виробництва.

Висновки по четвертому розділу

1. На об'єктному рівні «місто» запропоновано багаторівневу модель вертикальних господарств, яка визначає різні розміри та розташування об'єктів, а також експлуатаційні та архітектурні характеристики. Модель складається з 4-х рівнів обслуговування населення міста вертикальними фермами: 4 – міський, 3 – міжрайонний, 2 – районний і 1 – локальний, кожен з яких спрямований на обслуговування однієї або декількох груп споживачів з низьким, середнім, високим або значним попитом на продовольче забезпечення.

2. Розроблено структурно-графічну модель мережі міських вертикальних рослинницьких господарств на основі шестикутних решіток Кристаллера, що передбачає диференціацію мережі залежно від величини населеного пункту та забезпечує оптимальне розміщення агрокомплексів у містобудівній структурі і їх адаптацію до локальних умов.

3. Встановлено, що для найзначніших та значних міст структурно-графічна модель передбачає повну ієрархічну систему диференціації усіх рівнів обслуговування, функцій та архітектурно-операційних параметрів ферм, тоді як для великих та середніх міст характерне скорочення периферійного рівня, а для малих міст – мінімізована структура з одним-двома рівнями обслуговування.

4. На рівні «об'єкт» розроблено загальну архітектурно-планувальну типологію вертикальних агро-комплексів: функціональну структуру для 4-х рівнів обслуговування та відповідні специфікації приміщень. Також визначено функціонально-просторові прототипи для кожного з рівнів системи.

5. Запропоновано склад приміщень для кожного з рівнів містобудівної системи (розширений, базовий та мінімальний), їх необхідні взаємозв'язки та функціонально-планувальні рішення для різної структури будівлі.

6. Визначено, що основні приміщення для вирощування займають в середньому 51% загальної площі будівлі, або 0,27 м² на 1 м² сумарної площі вирощування з культивацийного обладнання, а допоміжні приміщення ферми – 0,26 м² на 1 м² сумарної площі вирощування. Площа сліду безпосередньо самого культивацийного обладнання займає в середньому 45% від площі приміщення для вирощування.

7. Надано формулу розрахунку площ вертикальних ферм в залежності від емпірично-отриманих просторових коефіцієнтів, цільової виробничої потужності господарства, а також площі сліду та врожайності одиниці культивацийного обладнання.

8. Наведено параметри допоміжного обладнання (візків, драбин, підйомних платформ) та параметри проходів між культивацийним обладнанням у вертикальних фермах – 0,9 м для стандартного устаткування та 1,2-1,5 м для високих багатоярусних систем, що забезпечує відповідність вимогам пожежної безпеки, ергономіки робочих місць та вільне маневрування допоміжного обладнання з урахуванням їх габаритних розмірів.

9. Доведено, що використання багатоярусного обладнання сприяє оптимізації просторового планування будівель вертикальних господарств завдяки покращенню коефіцієнтів раціональності та технологічності архітектурної структури, зокрема, через зменшення площі та будівельного об'єму будівлі при збереженні врожайності ферми.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані науково-академічні дослідження та нормативно-методичне забезпечення щодо вертикальних рослинницьких господарств виявили недостатньо розвинену матеріальну базу, яка необхідна для комплексної просторово-планувальної організації даних об'єктів. Доведено, що цілісне архітектурне проектування економічно та екологічно стійких вертикальних ферм, які заощаджують земельні, водні та мінеральні ресурси та забезпечують високу продуктивність в умовах міської забудови, сприятиме сталому розвитку агропромисловості та підвищенню продовольчої безпеки міст.

2. Вдосконалено теоретичні напрацювання, зокрема: визначення терміну "вертикальне рослинницьке господарство"; доповнення природо-кліматичних, техногенних та антропогенних факторів, що впливають на формування вертикальних ферм, чинниками змін клімату, наслідків військової діяльності в Україні та сучасними демографічними тенденціями; подальша розробка класифікації за архітектурними й операційними ознаками вертикальних агро-підприємств та за критеріями функціонального розширення чи доповнення будівлі.

3. Запропоновано міждисциплінарний підхід до формування архітектурної структури вертикальних ферм, що поєднує розробку принципів цілісного проектування, систему імплементації прийомів еко-сталих циркулярних стратегій та ієрархічну модель організації, що розглядає об'єкт дослідження на трьох рівнях: містобудівному, об'єктному та просторовому.

4. Сформульовано принципи зовнішнього доповнення, економії та збереження ресурсів й економії часу та простору, які орієнтовані на забезпечення економічної ефективності вертикальних господарств та сприятимуть раціоналізації проектних рішень, еко-сталості, довговічності і функціональної гнучкості системи.

5. Досліджено принципи контекстуалізму, симбіозу функції та форми, ототожнення конструкції та форми, гармонізації об'ємно-просторових і фасадних рішень та імплементації новітніх технологій, що забезпечують цілісність художнього образу, високу естетичність і функціональну якість архітектурних рішень, а також злагожену інтеграцію вертикальних ферм у міське середовище.

6. Запропоновано архітектурні прийоми імплементації циркулярних стратегій для раціоналізації енергоспоживання та використання виробничих потоків у вертикальних господарствах, що передбачають місцезташування будівлі в оптимальній транспортній доступності поблизу джерел вторинної сировини, влаштування відокремлених функціональних зон для обробки та зберігання відходів, застосування фотоелектричних фасадних систем та інтеграцію спеціалізованого інженерного устаткування для відновлення залишкових ресурсів.

7. Розроблено універсальну структурно-графічну модель для організації містобудівної мережі вертикальних рослинницьких господарств засновану на економічних засадах створення системи закладів продовольчого постачання через пріоритетне розташування ферм чотирьох рівнів обслуговування міста – міського, міжрайонного, районного та локального.

8. Встановлено перелік базових функцій вертикальних ферм з врахуванням багаторівневої системи міського обслуговування та проведена диференціація об'єктів за розширеним, базовим та мінімальним набором приміщень. Надано рекомендації щодо функціонально-планувальної організації різних за структурою будівель агропідприємств, що узгоджені із особливостями технологічного процесу.

9. Запропоновано методи розрахунку просторових параметрів вертикальних господарств на основі технологічних характеристик культиваційного обладнання та виробничої потужності об'єкта. Встановлено, що основні приміщення вирощування займають близько половини загальної площі будівлі, а використання багаторівневого обладнання дозволяє підвищити ефективність архітектурних рішень завдяки зменшенню площі та будівельного об'єму будівлі при збереженні операційної продуктивності ферми.

10. Удосконалена теоретична база та розроблені містобудівні, функціонально-планувальні, просторові й технологічні рішення підвищують ефективність організації вертикальних рослинницьких господарств, забезпечують мінімізацію екологічного впливу будівель ферм та високу естетичну якість архітектурного середовища. В подальшому на основі даного дослідження можливо розробити методологічне та нормативно-правове забезпечення для проєктування та будівництва вертикальних агропідприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aeroponics, n. In: Oxford English Dictionary. Oxford University Press (2023)
2. Капштик, М.: Аеропоніка, <http://vue.gov.ua/%D0%90%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0>
3. Самойчук, К., Верхоланцева, В., Лівик, Н.: Використання енергії вітру та біопалива в машинобудівній галузі промисловості, https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_4/page15.html
4. Ngan, N.V.C., Chan, F.M.S., Nam, T.S., Van Thao, H., Maguyon-Detras, M.C., Hung, D.V., Cuong, D.M., Van Hung, N.: Anaerobic Digestion of Rice Straw for Biogas Production. In: Gummert, M., Hung, N.V., Chivenge, P., and Douthwaite, B. (eds.) Sustainable Rice Straw Management. pp. 65–92. Springer International Publishing, Cham (2020)
5. Nzihou, A.: Waste and Biomass Valorization. Waste Biomass Valorization. 1, 1–2 (2010). <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9013-y>
6. Vertical Farming. In: Cambridge Advanced Learner’s Dictionary & Thesaurus. Cambridge University Press (2025)
7. Наказ Національного агентства екологічних інвестицій України від 25 червня 2008 року № 32 “Про затвердження Вимог до документів, у яких обґрунтовуються обсяги антропогенних викидів та абсорбції парникових газів, для отримання листа-підтримки власником джерела викидів, на якому планується реалізація проекту спільного впровадження”, зареєстрований у Міністерстві юстиції України 17 липня 2008 року за №664/15355, <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0925-06>, (2006)
8. Wiedmann, T., Minx, J.: A Definition of “Carbon Footprint.” In: Ecological Economics Research Trends: Chapter 1. pp. 1–11. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA (2008)

9. Hydroponics | National Agricultural Library, <https://www.nal.usda.gov/farms-and-agricultural-production-systems/hydroponics>
10. Unpaprom, Y., Pimpimol, T., Whangchai, K., Ramaraj, R.: Sustainability assessment of water hyacinth with swine dung for biogas production, methane enhancement, and biofertilizer. *Biomass Convers. Biorefinery*. 11, 849–860 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00850-7>
11. Boake, T.M. ed: *Diagrid structures: systems, connections, details*. Birkhäuser, Basel (2014)
12. What is Environmental Sustainability? Goals With Examples, <https://www.snhu.edu/about-us/newsroom/stem/what-is-environmental-sustainability>
13. Harindra Syam, F., Wisdianti, D., Sajar, S.: Study of Sustainable Architecture Concepts. *Int. J. Res. Rev.* 10, 419–424 (2023). <https://doi.org/10.52403/ijrr.20230450>
14. Наказ Державного агентства України з управління зоною відчуження від 19.01.2018 № 4 “Про затвердження Стратегії з енергоефективності та енергозбереження на підприємствах, установах та організаціях, що належать до сфери управління ДАЗВ, на 2018-2020 роки.”
15. Бахтін, Д.: Принципи формування об’ємно-просторової організації енергоефективних громадських будівель, (2023)
16. Awouda, A.M.M., Fasciolo, B., Bruno, G., Razza, V.: *Cyber-Physical System Framework for Efficient Management of Indoor Farming Production*: In: Karthick, G.S. (ed.) *Advances in Environmental Engineering and Green Technologies*. pp. 66–86. IGI Global (2023)
17. Hernandez, T., Chocano, C., Coll, M.D., Garcia, C.: Composts as alternative to inorganic fertilization for cereal crops. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 35340–35352 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3898-6>
18. Rufi-Salís, M., Calvo, M.J., Petit-Boix, A., Villalba, G., Gabarrell, X.: Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* 155, 104683 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104683>

19. European Environment Agency: Life Cycle Assessment, <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/life-cycle-assessment>
20. Complete guide about Hydroponic Nutrient Solution Ratios, <https://envirevoagritech.com/mastering-hydroponic-nutrient-solution-ratios/>
21. Cooper, A.: The ABC of NFT: nutrient film technique ; the world's first method of crop production without a solid rooting medium. Grower Books, London (1984)
22. Engelhaupt, E.: Do food miles matter? *Environ. Sci. Technol.* 42, 3482–3482 (2008). <https://doi.org/10.1021/es087190e>
23. Rufi-Salís, M., Petit-Boix, A., Villalba, G., Sanjuan-Delmás, D., Parada, F., Ercilla-Montserrat, M., Arcas-Pilz, V., Muñoz-Liesa, J., Rieradevall, J., Gabarrell, X.: Recirculating water and nutrients in urban agriculture: An opportunity towards environmental sustainability and water use efficiency? *J. Clean. Prod.* 261, 121213 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121213>
24. Ahmed, N., Shim, S., Won, S., Ra, C.: Struvite recovered from various types of wastewaters: Characteristics, soil leaching behaviour, and plant growth. *Land Degrad. Dev.* 29, 2864–2879 (2018). <https://doi.org/10.1002/ldr.3010>
25. Understanding Hydroponic Leachate | Cropking, <https://cropking.com/blog/understanding-hydroponic-leachate>
26. Гурочкіна, В.В., Будзинська, М.С.: ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА: УКРАЇНСЬКІ РЕАЛІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ. *Економічний Вісник Серія Фінанси Облік Оподаткування.* 52–64 (2020). <https://doi.org/10.33244/2617-5932.5.2020.52-64>
27. Lviv Polytechnic National University, Ruda, M., Yaremchuk, T., Lviv Polytechnic National University, Bortnikova, M., Lviv Polytechnic National University: Circular economy is Ukraine: adaptation of European experience. *Manag. Entrep. Ukr. Stages Form. Probl. Dev.* 2021, 212–222 (2021). <https://doi.org/10.23939/smeu2021.01.212>
28. World Urbanization Prospects The 2018 Revision.

29. UN DESA: United Nations Department of Economic and Social Affairs, World population projected to reach 9.6 billion by 2050. UN Dep. Econ. Soc. Aff. (2013)
30. Понад 5 мільйонів гектарів земель в Україні не можна обробляти через війну, <https://www.epravda.com.ua/news/2023/03/3/697637/>
31. Арестов, Т.: Про відновлення агросектору України в післявоєнний час, <https://egritech.org/uk/agrobiznes-uk/pro-vidnovlennya-agrosektoru-ukrayiny-v-pislyavoyennyj-chas/>, (2023)
32. Стойкова, О.В., Яна: Як українські фермери попри війну тримають економічний фронт, <https://suspilne.media/527665-vikopali-rosijski-snaradi-posialisonasnik-ak-ukrainski-fermeri-popri-vijnu-trimaut-ekonomichnij-front/>
33. Kozai, T., Niu, G., Takagaki, M.: Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production: Second edition. (2019)
34. Despommier, D.D.: The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century. Macmillan (2010)
35. Despommier, D.: Vertical farms, building a viable indoor farming model for cities. Field Actions Sci. Rep. 2019, 68–73 (2019)
36. Despommier, D., Ellingsen, E.: The Vertical farm: The sky-scraper as vehicle for a sustainable urban agriculture. In: CTBUH, World Congr. - Tall Green: Typology Sustainable Urban Future, Congr. Proc. pp. 311–318. Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2008)
37. Despommier, D.: Farming up the city: The rise of urban vertical farms. Trends Biotechnol. 31, 388–389 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008>
38. Kozai, T.: Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms. Springer Singapore Pte. Limited, Singapore (2018)
39. Kozai, T., Niu, G., Takagaki, M.: Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier, Amsterdam Boston (2016)
40. Kozai, T.: Plant production process, floor plan, and layout of PFAL. Plant Fact. (2020). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00016-0>

41. Бордун, М.: Конструкції енергоефективних споруд закритого ґрунту, <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/7815>, (2020)
42. Pavlenko, T., Ivasenko, V.: BASIC MEANS OF BARRIER FREE SPACE IN URBAN AGRORECREATIONAL ECO-COMPLEXES. *Munic. Econ. Cities*. 4, 54–60 (2020). <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-4-157-54-60>
43. Praslova, V., Ryabets, Y., Shchurova, V., Zinovieva, O., Harbar, M.: Functional Organization of extraterrestrial underground base on Mars. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 9, 303–312 (2020). <https://doi.org/10.35940/ijitee.E2161.039520>
44. Муха, Т.О., Дем'янчук, А.А., Савченко, О.О.: Аналіз досвіду проектування вертикальних аграрно-рекреаційних комплексів. *Archit. Bull. KNUCA*. 312–315 (2016)
45. Добровенко, Д.В.: Доцільність формування структури вертикальних агропромислових комплексів в Україні. (2014)
46. Добровенко, Д.В.: Вплив основних чинників на формотворення вертикальних агропромислових комплексів. *Сучасні Проблеми Архітектури Та Містобудування*. 257–267 (2016)
47. Заверталюк, Р.М., Кравченко, І.Л.: Об'ємно-просторові прийоми поєднання вертикальних ферм з житловим середовищем. (2019)
48. Мельник, Т.Д., Самойлович, В.В., Юнаков, С.Ф.: Особливості архітектурного формоутворення вертикальних агро–ферм. *Urban Dev. Spat. Plan.* 235–242 (2019)
49. Герасимяк, В.С., Кравченко, І.Л.: Прийоми архітектурно-планувальних рішень вертикальних ферм у структурі громадських комплексів. *Archit. Bull. KNUCA*. 543–547 (2017)
50. Гетун, Г.: Основи проектування промислових будівель. Кондор, Київ (2009)
51. Куліков, П.М., Плоский, В.О., Гетун, Г.В.: Архітектура будівель та споруд. Книга 5. Промислові будівлі. Рута, Кам'янець-Подільський (2020)
52. Житкова, Н.Ю.: Архітектурна типологія промислових будівель. КНУБА, Київ (2006)

53. Ackermann, K., Lambot, I.: Building for industry. Watermark, Godalming (1991)
54. Southorn, N.: Farm buildings: planning and construction. Inkata, Port Melbourne (1996)
55. Adam, J.A., Hausmann, K., Jüttner, F., Daniels, K.: Industrial buildings: a design manual. Birkhäuser-Publishers for Architecture, Basel ; Boston (2004)
56. Pickard, Q. ed: The architects' handbook. Blackwell Science, Malden, MA (2002)
57. Lechner, A.: Thinking design: blueprint for an architecture of typology. Park Books, Zurich (2021)
58. Терзян, І.: Архітектурна організація серидовища у виробничих та допоміжних приміщень. Вища школа, Харків (1983)
59. Беломєсяцев, А.: Економічні основи архітектури / Інститут проблем сучасного мистецтва Академії мистецтв України. Фенікс, Київ (2008)
60. Яблонська, Г.Д.: Економіка архітектурного проектування і кваліметрія: конспект лекцій, (2009)
61. Дорохіна, Г.: Архітектурно-планувальна організація фізкультурно-оздоровчих закладів для людей з обмеженими фізичними можливостями, (2013)
62. Christaller, W.: Die zentralen Orte in Süddeutschland [Central places in southern Germany]. (1933)
63. Adey, S.W., Beer, S.: Cybernetics and Management. OR. 11, (1960). <https://doi.org/10.2307/3007077>
64. Christopher, M.: Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service. Financial Times/Pitman (1998)
65. Harris, C.D., Ullman, E.L.: The Nature of Cities. Ann. Am. Acad. Pol. Soc. Sci. 242, 7–17 (1945). <https://doi.org/10.1177/000271624524200103>
66. ДБН В.2.2-2:2024 “Будівлі та споруди. Теплиці та парники,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3489449319356958123?doc_type=2, (2024)
67. Дорохіна, Г., Жданова, Я.: Принципи економічної ефективності архітектурно-просторової організації вертикальних ферм. Сучасні Проблеми

Архітектури Та Містобудування. 135–149 (2023). <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.66.135-149>

68. Жданова, Я., Дорохіна, Г.: ПРИНЦИПИ ЦІЛІСНОСТІ ТА ГАРМОНІЗАЦІЇ АРХІТЕКТУРНО-ПРОСТОРОВИХ РІШЕНЬ ВЕРТИКАЛЬНИХ ФЕРМ. Сучасні Проблеми Архітектури Та Містобудування. 215–227 (2024). <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.215-227>

69. Population, <https://ourworldindata.org/grapher/population-with-un-projections>

70. Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M.L., Saghai, Y.: A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat. Food.* 2, 494–501 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>

71. Fuglie, K.: Climate change upsets agriculture. *Nat. Clim. Change.* 11, 294–295 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01017-6>

72. Yohannes, H.: A Review on Relationship between Climate Change and Agriculture. *J. Earth Sci. Clim. Change.* 07, (2015). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000335>

73. Vertical Farming Infographics - Association for Vertical Farming, <https://vertical-farming.net/blog/2017/11/22/vertical-farming-infographics/>

74. Share of land area used for arable agriculture, <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-land-area-used-for-arable-agriculture>

75. Share of land that is degraded, <https://ourworldindata.org/grapher/share-degraded-land>

76. Folnović, T.: Soil Degradation, <https://www.agrivi.com/blog/soil-degradation/>, (2015)

77. Zalidis, G., Stamatiadis, S., Takavakoglou, V., Eskridge, K., Misopolinos, N.: Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 137–146 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00249-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00249-3)

78. Gleick, P.H.: *The world's water: the biennial report on freshwater resources.* Island Press, Washington, DC (2012)

79. Exposure to Pesticides, Herbicides, & Insecticides: Human Health Effects, <https://www.ifm.org/news-insights/pesticides-and-human-health-effects/>
80. Zhang, D., Lu, S.: Human exposure to neonicotinoids and the associated health risks: A review. *Environ. Int.* 163, 107201 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107201>
81. Contribution to global mean surface temperature rise from agriculture and land use, <https://ourworldindata.org/grapher/global-warming-land>
82. Is vertical farming really sustainable? - EIT Food, <https://www.eitfood.eu/blog/is-vertical-farming-really-sustainable>
83. Urban Crop Solutions, <https://urbancropsolutions.com/>
84. Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R.M., Van Den Dobbelsteen, A.A.J.F.: The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *J. Clean. Prod.* 377, 134443 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443>
85. Barbosa, G., Gadelha, F., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G., Halden, R.: Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 12, 6879–6891 (2015). <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
86. Kilgore, G.: Truck CO2 Emissions Per Km Calculator: Find Semi Truck Carbon Footprint, <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-co2-emissions-per-km-calculator/>, (2022)
87. Silverman, K.: The Sustainability and Scalability of Controlled Environment Agriculture, <https://weekly.regeneration.works/p/-the-sustainability-and-scalability>
88. Zhang, Y., Kacira, M.: Comparison of energy use efficiency of greenhouse and indoor plant factory system. *Eur. J. Hortic. Sci.* 85, 310–320 (2020). <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.2>
89. Zeidler, C., Schubert, D., Vrakking, V.: Vertical Farm 2.0: Designing an Economically Feasible Vertical Farm - A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture. *Vert. Farming.* (2017)

90. How Much Electricity Does a Vertical Farm Use with iFarm Technologies?, <https://ifarm.fi/blog/2020/12/how-much-electricity-does-a-vertical-farm-consume>
91. Global CEA Census Report WayBeyond. (2021)
92. Research Centre on Urban Environment for Agriculture and Biodiversity, Agricultural Sciences Department, Alma Mater Studiorum – University of Bologna, Bologna, Italy, Orsini, F., Pennisi, G., Research Centre on Urban Environment for Agriculture and Biodiversity, Agricultural Sciences Department, Alma Mater Studiorum – University of Bologna, Bologna, Italy, Zulfiqar, F., Institute of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Agriculture Faisalabad, Pakistan, Gianquinto, G., Research Centre on Urban Environment for Agriculture and Biodiversity, Agricultural Sciences Department, Alma Mater Studiorum – University of Bologna, Bologna, Italy: Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *Eur. J. Hortic. Sci.* 85, 297–309 (2020). <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1>
93. History | Greenhouse Gurus, <https://u.osu.edu/greenhousegurus/background-research/history/>
94. History of Hydroponics, <https://www.reiziger.com/history-of-hydroponics/>, (2019)
95. Song, S., Hou, Y., Lim, R.B.H., Gaw, L.Y.F., Richards, D.R., Tan, H.T.W.: Comparison of vegetable production, resource-use efficiency and environmental performance of high-technology and conventional farming systems for urban agriculture in the tropical city of Singapore. *Sci. Total Environ.* 807, 150621 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150621>
96. Van Delden, S.H., SharathKumar, M., Butturini, M., Graamans, L.J.A., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klamer, R.S., Klerkx, L., Kootstra, G., Loeber, A., Schouten, R.E., Stanghellini, C., Van Ieperen, W., Verdonk, J.C., Vialet-Chabrand, S., Woltering, E.J., Van De Zedde, R., Zhang, Y., Marcelis, L.F.M.: Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nat. Food.* 2, 944–956 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w>

97. Benke, K., Tomkins, B.: Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustain. Sci. Pract. Policy.* 13, 13–26 (2017). <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
98. Kalantari, F., Tahir, O.M., Joni, R.A., Fatemi, E.: Opportunities and Challenges in Sustainability of Vertical Farming: A Review. *J. Landsc. Ecol.* 11, 35–60 (2018). <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>
99. Al-Chalabi, M.: Vertical farming: Skyscraper sustainability? *Sustain. Cities Soc.* 18, 74–77 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003>
100. Besthorn, F.H.: Vertical Farming: Social Work and Sustainable Urban Agriculture in an Age of Global Food Crises. *Aust. Soc. Work.* 66, 187–203 (2013). <https://doi.org/10.1080/0312407X.2012.716448>
101. Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P., Spillane, C., Bezrukov, A., Zaworotko, M., Styles, D.: Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *J. Clean. Prod.* 369, 133214 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214>
102. Sari, M.A., Bertha Maya Sopha: Environmental Assessment of Vegetable Production with Urban Vertical Farming System. *J. Ind. Eng. Educ.* 1, 131–142 (2023)
103. Martin, M.: Life cycle management in vertical farming: insights from vertical farming sustainability assessments. *Acta Hort.* 235–242 (2023). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1369.29>
104. Martin, M., Elnour, M., Siñol, A.C.: Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm. *Sustain. Prod. Consum.* 40, 182–193 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.020>
105. Wildeman, R.: Vertical farming : a future perspective or a mere conceptual idea? A Comprehensive Life Cycle Analysis on the environmental impact of a vertical farm compared to rural agriculture in the US. (2020)
106. Chowdhury, H., Asiabanpour, B.: A circular economy integration approach into vertical farming with computer-based simulation model for resource optimization

and waste reduction. *J. Clean. Prod.* 470, 143256 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143256>

107. Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H., Wang, X.: A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems. *J. Clean. Prod.* 268, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121928>

108. Coon, D., Lindow, L., Boz, Z., Martin-Ryals, A., Zhang, Y., Correll, M.: Reporting and practices of sustainability in controlled environment agriculture: a scoping review. *Environ. Syst. Decis.* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10669-024-09964-z>

109. Kozai, T., Japan Plant Factory Association: Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 12, 28–37 (2019). <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.5177>

110. Martin, M., Poulidikidou, S., Molin, E.: Exploring the Environmental Performance of Urban Symbiosis for Vertical Hydroponic Farming. *Sustainability.* 11, 6724 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11236724>

111. Erekaht, S., Seidlitz, H., Schreiner, M., Dreyer, C.: Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. *Sustain. Cities Soc.* 106, 105357 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105357>

112. Moghimi, F., Asiabanpour, B.: Economics of vertical farming in the competitive market. *Clean Technol. Environ. Policy.* 25, 1837–1855 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02473-8>

113. Avgoustaki, D.D., Xydis, G.: How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security, sustainability, and food safety? Presented at the (2020)

114. Avgoustaki, D.D., Xydis, G.: Energy cost reduction by shifting electricity demand in indoor vertical farms with artificial lighting. *Biosyst. Eng.* 211, 219–229 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.006>

115. Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, A., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J.A., Crepaldi, A., Gianquinto, G., Marcelis, L.F.M.: Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red

and blue LEDs. *Sci. Hortic.* 272, 109508 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>

116. Valle De Souza, S., Shasteen, K.C., Seong, J., Kubota, C., Kacira, M., Peterson, H.C.: Production planning in an indoor farm: Using time and space requirements to define an efficient production schedule and farm size. *Int. Food Agribus. Manag. Rev.* 27, 237–255 (2024). <https://doi.org/10.22434/ifamr2023.0038>

117. Engler, N., Krarti, M.: Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 141, (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110786>

118. Germer, J., Sauerborn, J., Asch, F., De Boer, J., Schreiber, J., Weber, G., Müller, J.: Skyfarming an ecological innovation to enhance global food security. *J. Für Verbraucherschutz Leb.* 6, 237–251 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00003-011-0691-6>

119. Ekici, B., Turkcan, O.F.S.F., Turrin, M., Sariyildiz, I.S., Tasgetiren, M.F.: Optimising High-Rise Buildings for Self-Sufficiency in Energy Consumption and Food Production Using Artificial Intelligence: Case of Europoint Complex in Rotterdam. *Energies.* 15, 660 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15020660>

120. Prades Villanova, M.: Vertical farm façade: first approach to the energetic savings applied to the Seagram Building in New York, <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23367>, (2013)

121. Choubchilangroudi, A., Zarei, A.: Investigation the effectiveness of light reflectors in transmitting sunlight into the vertical farm depth to reduce electricity consumption. *Clean. Eng. Technol.* 7, 100421 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100421>

122. Vatistas, C., Avgoustaki, D.D., Bartzanas, T.: A Systematic Literature Review on Controlled-Environment Agriculture: How Vertical Farms and Greenhouses Can Influence the Sustainability and Footprint of Urban Microclimate with Local Food Production. *Atmosphere.* 13, 1258 (2022). <https://doi.org/10.3390/atmos13081258>

123. Shahda, M.M., Megahed, N.A.: Post-pandemic architecture: a critical review of the expected feasibility of skyscraper-integrated vertical farming (SIVF).

- Archit. Eng. Des. Manag. 19, 283–304 (2023).
<https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2109123>
124. Dal Ri, S., Favargiotti, S., Albatici, R.: The role of vertical farming in re-thinking and re-designing cities within a circular perspective. *Riv. Tema*. Vol.6 (2020), (2020). <https://doi.org/10.30682/tema0601i>
125. Al-Kodmany, K.: The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*. 8, 24 (2018).
<https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
126. Basso, S., Bisiani, T., Martorana, P., Venudo, A.: VERTICAL FARM New architectures and cities from the forms of agriculture. *Agathon*. 13, 141–152 (2023).
<https://doi.org/10.19229/2464-9309/13122023>
127. García-Caro Briceño, D.: Vertical Farming Sustainability and Urban Implications. (2018)
128. Benis, K., Reinhart, C., Ferrão, P.: Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. *J. Clean. Prod.* 147, 589–602 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>
129. Ghazal, I., Mansour, R., Davidová, M.: AGRI|gen: Analysis and Design of a Parametric Modular System for Vertical Urban Agriculture. *Sustain. Switz.* 15, (2023).
<https://doi.org/10.3390/su15065284>
130. Tablada, A., Kosorić, V.: Vertical farming on facades: transforming building skins for urban food security. In: *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*. pp. 285–311 (2021)
131. Zhang, Y., Zhang, Y., Li, Z.: A novel productive double skin façades for residential buildings: Concept, design and daylighting performance investigation. *Build. Environ.* 212, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108817>
132. Aiman, T., Enriqueta, L.-V.: The Agrarian City in the age of Planetary Scale Computation: Dynamic System Model and Parametric Design Model for the introduction of Vertical Farming in High Dense Urban Environments in Singapore. In: *Proceedings of*

the International Conference on GSM4Q: Game Set and Match IV 2019 Qatar connecting people spaces machines. pp. 117–129. Qatar University Press (2019)

133. Ordia, K.L.: Growing interiors—cultivating urban biophilic environments. *Inter. Des. Archit. Cult.* (2024). <https://doi.org/10.1080/20419112.2024.2333143>

134. D'Ostuni, M., Zaffi, L., Appolloni, E., Orsini, F.: Understanding the complexities of Building-Integrated Agriculture. Can food shape the future built environment? *FUTURES*. 144, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103061>

135. Nowysz, A.: Urban vertical farm – introduction to the subject and discussion of selected examples. *ACTA Sci. Pol. - Archit. Bud.* 20, 93–100 (2022). <https://doi.org/10.22630/ASPA.2021.20.4.38>

136. Olabimpe Banke Akintuyi: Vertical farming in urban environments: A review of architectural integration and food security. *Open Access Res. J. Biol. Pharm.* 10, 114–126 (2024). <https://doi.org/10.53022/oarjbp.2024.10.2.0017>

137. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Production / Crops and livestock products, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, (2023)

138. Grow Leafy Greens and Salads with Vertical Farming Technologies by iFarm, <https://ifarm.fi/technologies/ifarm-leafy-greens>

139. Grow Strawberries with Vertical Farming Technologies by iFarm, <https://ifarm.fi/technologies/ifarm-berries>

140. Grow Veggies with Vertical Farming Technologies by iFarm, https://ifarm.fi/technologies/ifarm_veggies

141. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.: The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, <https://hess.copernicus.org/preprints/8/763/2011/hessd-8-763-2011.pdf>, (2011)

142. Singh, M.C., Singh, G.K., Singh, J.P.: Nutrient and Water Use Efficiency of Cucumbers Grown in Soilless Media under a Naturally Ventilated Greenhouse. *J. Agric. Sci. Technol.* 21, 193–207 (2019)

143. Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., Cesco, S.: Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a Smart

- Agriculture Perspective. Front. Plant Sci. 10, (2019).
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>
144. Vertical farming, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vertical_farming&oldid=1243758066, (2024)
145. Green honeycomb - a project for growing plants anywhere, <https://gw-ecosystem.com/en/unique-business/>
146. Вертикальні ферми в Україні: скільки це коштує та як організувати tech-господарство вдома, <https://www.epravda.com.ua/publications/2020/08/27/664413/>
147. Павленко, В.: Вертикальна ферма, або Як виростити 600 кг салату без землі та пестицидів? Кейс успішного родинного бізнесу з Вінниці, <https://shotam.info/bez-zemli-ta-pestytsydiv-u-vinnytsi-pratsiuie-unikalna-vertykalna-ferma-shcho-daie-600-kh-vrozhaiu-shchomisiatsia-foto/>, (2023)
148. EastFruit: Вертикальна ферма у бомбосховищі: як українська компанія вирощує свіжу зелень • EastFruit, <https://east-fruit.com/uk/plodoovochevyi-biznes/tekhnologii-uk/vertykalna-ferma-u-bomboskhovyshchi-yak-ukrayinska-kompaniya-vyroshchuye-svizhu-zelen/>
149. Ferme Darwin Proposal / SOA + holdUP | ArchDaily, <https://www.archdaily.com/290148/ferme-darwin-proposal-soa-holdup>
150. Architectes, S.O.A.: La Ferme Musicale - SOA Architectes, <https://www.soa-architectes.fr/fr/urbanisme-agricole/article/la-ferme-musical/>
151. The Green House, <https://www.cepezed.nl/en/project/the-green-house/22172/>
152. The Green House / architectenbureau cepezed, <https://www.archdaily.com/915728/the-green-house-architectenbureau-cepezed>
153. Vertical Farm Beijing / van Bergen Kolpa architects | ArchDaily, <https://www.archdaily.com/1014197/vertical-farm-beijing-van-bergen-kolpa-architects>
154. Vertical Farm Beijing, <https://www.vanbergenkolpa.nl/#vertical-farm-beijing>

155. National Centers for Environmental Information (NCEI), <https://www.ncei.noaa.gov/#>
156. Vertical Harvest | METALOCUS, <https://www.metalocus.es/en/news/vertical-harvest>
157. Hudson, D.: Vertical harvest urban farm by e/ye design under construction, <https://www.designboom.com/architecture/eye-design-vertical-harvest-in-jackson-2-28-2015/>
158. Zeitoun, L.: Set in belgium, agrotopia is europe's largest research center for urban horticulture, <https://www.designboom.com/architecture/rooftop-greenhouse-agrotopia-urban-horticulture-belgium-02-02-2022/>
159. Pertry, I., Bleyaert, P., Demyttenaere, P., Demeulemeester, M.: Agrotopia, a living lab for high-tech urban horticulture within Europe. In: Orsini F., Gianquinto G.P., Pennisi G., Cremonini L., and Georgiadis T. (eds.) *Acta Hortic.* pp. 153–158. International Society for Horticultural Science (2018)
160. Rooftop Greenhouse Agrotopia, <https://www.vanbergenkolpa.nl/#dakserre-agrotopia-roeselare>
161. Лаврик, Г.І.: Основи системного аналізу в архітектурних дослідженнях і проектуванні. КНУБА, Українська академія архітектури., Київ (2002)
162. Шило, Н.М.: FACTORS IN THE FORMATION OF MOBILE ARCHITECTURE. КНУБА, Київ (2011)
163. Дорохіна, Г., Жданова, Я.: Архітектурна класифікація вертикальних агрокомплексів за способом кооперування. In: *Proceedings of the 10th International scientific and practical conference.* pp. 87–93. Potere della ragione Editore, Rome, Italy (2021)
164. Добровенко, Д.В.: Класифікація основних видів вертикальних агропромислових комплексів. Містобудування Та Територіальне Планування. 52, 105–112 (2024)
165. ДБН В.1.1-7:2016 “Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги”., https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619, (2017)
166. Vertical farming technologies by iFarm, <https://ifarm.fi/technologies>

167. Green.org: Hydroponics vs. Aeroponics vs. Aquaponics, <https://green.org/2024/01/30/hydroponics-vs-aeroponics-vs-aquaponics/>
168. Коваленко, І.: Вступ до системного аналізу. МДГУ ім. Петра Могили, Миколаїв (2004)
169. Cramer, J.: How Network Governance Powers the Circular Economy. Vormgeving Counter Creatives, Amsterdam Economic Board, Amsterdam (2020)
170. Cramer, J.: Building a Circular Future. Vormgeving Counter Creatives, Amsterdam Economic Board; Holland Circular Hotspot, Amsterdam (2022)
171. Hennicke, P., Khosla, A.: Decoupling economic growth from resource consumption. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Berlin (2014)
172. UNEP ed: Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth. (2011)
173. Cramer, J.: The Raw Materials Transition in the Amsterdam Metropolitan Area: Added Value for the Economy, Well-Being, and the Environment. *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* 59, 14–21 (2017). <https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1301167>
174. Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S.: A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.* 114, 11–32 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
175. Mandpe, A., Paliya, S., Gedam, V.V., Patel, S., Tyagi, L., Kumar, S.: Circular economy approach for sustainable solid waste management: A developing economy perspective. *Waste Manag. Res. J. Sustain. Circ. Econ.* 41, 499–511 (2023). <https://doi.org/10.1177/0734242X221126718>
176. Fernando, Y., Tseng, M.-L., Aziz, N., Ikhsan, R.B., Wahyuni-TD, I.S.: Waste-to-energy supply chain management on circular economy capability: An empirical study. *Sustain. Prod. Consum.* 31, 26–38 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.032>
177. Ragin, C.C.: The comparative method: moving beyond qualitative and quantitative strategies. University of California Press, Berkeley (1987)

178. Mattke, J., Maier, C., Weitzel, T., Thatcher, J.B.: Qualitative comparative analysis in the information systems discipline: a literature review and methodological recommendations. *Internet Res.* 31, 1493–1517 (2021). <https://doi.org/10.1108/INTR-09-2020-0529>
179. Bennett, J.O., Briggs, W.L.: *Using and Understanding Mathematics: A Quantitative Reasoning Approach*. Pearson, Boston (2005)
180. Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M.: *A pattern language: towns, buildings, construction*. Oxford University Press, New York (1977)
181. Яблонська, Г.Д.: Аналіз архітектурно-планувальної структури житлових будівель та їх елементів на основі вартісної порівнянної оцінки, (1990)
182. Яблонський, Д.: Кількісні методи вирішення задач типології житла. *Київ Будівельник*. 50–55 (1971)
183. Рижко, І.: *Філософія науки, техніки, архітектури: навчальний посібник*. КНУБА, Київ (2018)
184. Чмиленко, Ф.О., Жук, Л.П.: *Посібник до вивчення дисципліни «Методологія та організація наукових досліджень»*. РВВ ДНУ, Дніпропетровськ (2014)
185. Кашченко, Т.О.: *Підвищення енергоефективності житлових будинків на основі оптимізації форми*, (2001)
186. Казаков, Г.В.: *Архітектура енергоощадних сонячних будинків*. Вид-во Львівської політехніки, Львів (2009)
187. ДБН А.2.2-3:2014 “Склад та зміст проектної документації на будівництво,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3192355188719486804, (2022)
188. Dorokhina, G.: *Architectural-Planning Organization of Sports and Recreation Facilities for Disabled Persons*, (2013)
189. Santos, R., Costa, A.A., Silvestre, J.D., Pyl, L.: Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment. *Autom. Constr.* 103, 127–149 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.011>
190. ISO 14040:2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, <https://www.iso.org/standard/37456.html>, (2006)

191. ISO 14044:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, <https://www.iso.org/standard/38498.html>, (2006)
192. Scott, N.R., Rutzke, C.J., Albright, L.D.: Energy conversion options for energy-efficient controlled environment agriculture. In: HortScience. pp. 287–292. American Society for Horticultural Science (2005)
193. Zeidler, C., Schubert, D., Vrakking, V.: Feasibility Study: Vertical Farm EDEN. German Aerospace Center (DLR), Institut of Space Systems, Bremen (2013)
194. Mofatteh, S., Khanali, M., Akram, A., Afshar, M.: Progressing environmental sustainability in hydroponic greenhouse systems: Embracing circular bioeconomy through compost and biochar pathways. *J. Clean. Prod.* 475, 143600 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143600>
195. Parkes, M.G., Cubillos Tovar, J.P., Dourado, F., Domingos, T., Teixeira, R.F.M.: Life Cycle Assessment of a Prospective Technology for Building-Integrated Production of Broccoli Microgreens. *Atmosphere*. 13, 1317 (2022). <https://doi.org/10.3390/atmos13081317>
196. Martin, M., Weidner, T., Gullström, C.: Estimating the Potential of Building Integration and Regional Synergies to Improve the Environmental Performance of Urban Vertical Farming. *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 849304 (2022). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.849304>
197. Martínez, E., Fernández-Ríos, A., Laso, J., Hoehn, D., San-Román, M.F., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Margallo, M.: Low Energy and Carbon Hydroponic Tomato Cultivation in Northern Spain: Nutritional and Environmental Assessment. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 12, 860–871 (2024). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05763>
198. Wang, C., Zhou, T., Yu, Z., Du, D.: Evaluating the Energy Efficiency and Carbon Footprint of Small-Scale Distributed and Centralized Vertical Farming Systems. In: *Energy. Proc. Scanditale AB* (2023)
199. J. McDonald, L., S.S. Pinto, A., Naveed Arshad, M., L. Rowe, R., Donnison, I., McManus, M.: Synergy between industry and agriculture: Techno-economic and life

cycle assessments of waste recovery for crop growth in glasshouses. *J. Clean. Prod.* 432, 139650 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139650>

200. Rufi-Salís, M., Petit-Boix, A., Villalba, G., Sanjuan-Delmás, D., Parada, F., Ercilla-Montserrat, M., Arcas-Pilz, V., Muñoz-Liesa, J., Rieradevall, J., Gabarrell, X.: Recirculating water and nutrients in urban agriculture: An opportunity towards environmental sustainability and water use efficiency? *J. Clean. Prod.* 261, 121213 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121213>

201. Parada, F., Gabarrell, X., Rufi-Salís, M., Arcas-Pilz, V., Muñoz, P., Villalba, G.: Optimizing irrigation in urban agriculture for tomato crops in rooftop greenhouses. *Sci. Total Environ.* 794, 148689 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148689>

202. Rufi-Salís, M., Calvo, M.J., Petit-Boix, A., Villalba, G., Gabarrell, X.: Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* 155, 104683 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104683>

203. Liu, R., Salem, M., Rungamornrat, J., Al-Bahrani, M.: A comprehensive and updated review on the exergy analysis of ground source heat pumps. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 55, 102906 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102906>

204. Borland, P.L., McDonnell, K., Harty, M.: Assessment of the Potential to Use the Expelled Heat Energy from a Typical Data Centre in Ireland for Alternative Farming Methods. *Energies.* 16, (2023). <https://doi.org/10.3390/en16186704>

205. Rufi Salís, M.: A Circular Economy Approach to Urban Agriculture: an Environmental Assessment, <https://www.tdx.cat/handle/10803/671309>, (2020)

206. Шаповал, Н.Г.: Прикладна теорія архітектурної композиції: навч. посібник. КНУБА, Київ (2000)

207. Ремізова, О.: Художні методи архітектурної композиції. NGO European Scientific Platform (2023)

208. Wind Impact Assessments Terms of Reference | City of Edmonton, https://www.edmonton.ca/city_government/urban_planning_and_design/wind-study-terms-of-reference

209. Paduano, C., Al-Rubayawi, T., Okolo, P.: Wind Microclimate Study. Creamfields Development in Cork. B-Fluid Ltd., Cork (2021)
210. Зіміна, О.С.: Нові технології в дизайні індустріальних фасадів. Архітектурний Вісник КНУБА. 1, 315–322 (2013)
211. Vertical Shelving Storage Solution HI-BAY - Up to 35ft., <https://www.montel.com/en/products/hi-bay-shelving-system>
212. Vertical High Density Mobile Shelving - HI-BAY, <https://www.montel.com/en/products/hi-bay-powered-mobile-shelving-system>
213. AeroFarm Newark Vertical Farm | Inhabitat - Green Design, Innovation, Architecture, Green Building, <https://inhabitat.com/worlds-largest-indoor-vertical-farm-will-produce-2-million-pounds-of-soil-free-food-in-newark/market-893rendered/>
214. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3019966082438924253?doc_type=2, (2019)
215. Precht Designs Timber Skyscrapers with Modular Homes and Vertical Farming, <https://www.archdaily.com/912058/precht-designs-timber-skyscrapers-with-modular-homes-and-vertical-farming>
216. Vincent Callebaut Architectures: DRAGONFLY, https://vincent.callebaut.org/object/090429_dragonfly/dragonfly/projects
217. Attia, S.: Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. QScience Connect. 2017, (2018). <https://doi.org/10.5339/connect.2017.qgbc.6>
218. Sari, D.P., Cho, K.-P.: Performance Comparison of Different Building Shapes Using a Wind Tunnel and a Computational Model. Buildings. 12, 144 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12020144>
219. Besir, A.B., Cuce, E.: Green roofs and facades: A comprehensive review. Renew. Sustain. Energy Rev. 82, 915–939 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
220. Benke, K., Tomkins, B.: Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustain. Sci. Pract. Policy. 13, 13–26 (2017). <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>

221. Zhu, W.: Vertical Farms: A Sustainable Solution to Urban Agriculture Challenges. *Highlights Sci. Eng. Technol.* 75, 80–85 (2023). <https://doi.org/10.54097/4n06rw70>
222. Joensuu, K., Kotilainen, T., Räsänen, K., Rantanen, M., Usva, K., Silvenius, F.: Assessment of climate change impact and resource-use efficiency of lettuce production in vertical farming and greenhouse production in Finland: a case study. *Int. J. Life Cycle Assess.* 29, 1932–1944 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02343-5>
223. Sandison, F., Yeluripati, J., Stewart, D.: Does green vertical farming offer a sustainable alternative to conventional methods of production?: A case study from Scotland. *Food Energy Secur.* 12, e438 (2023). <https://doi.org/10.1002/fes3.438>
224. Gargaro, M., Hastings, A., Murphy, R.J., Harris, Z.M.: A cradle-to-customer life cycle assessment case study of UK vertical farming. *J. Clean. Prod.* 470, 143324 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143324>
225. Romeo, D., Vea, E.B., Thomsen, M.: Environmental Impacts of Urban Hydroponics in Europe: A Case Study in Lyon. In: *Procedia CIRP* (2018)
226. Danevad, D., Carlos-Pinedo, S.: Exploring Interactions Between Fruit and Vegetable Production in a Greenhouse and an Anaerobic Digestion Plant—Environmental Implications. *Front. Sustain.* 2, 770296 (2021). <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.770296>
227. Teo, Y.L., Go, Y.I.: Techno-economic-environmental analysis of solar/hybrid/storage for vertical farming system: A case study, Malaysia. *Renew. Energy Focus.* 37, 50–67 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.02.005>
228. Center for Urban Agriculture, <https://mithun.com/project/center-for-urban-agriculture/>
229. Admin: Future of Building-integrated photovoltaics (BIPV), <https://wfmmedia.com/future-of-bipv/>, (2017)
230. Business Norway, <https://businessnorway.com/solutions/over-easy-solar-innovates-vertical-rooftop-biosolar>

231. 20 third-party plants to supply biomethane to new €30m facility, <https://www.independent.ie/farming/news/20-third-party-plants-to-supply-biomethane-to-new-30m-facility/41813001.html>
232. Yards Brewing Company: A Journey to Success, <https://www.ziemann-holvrieka.com/en/case-studies/yards-brewing-company-a-journey-to-success/>
233. <https://www.brilo.cz>, B.-: Úvod, <https://www.atmos.eu/en/>
234. Concept WRRF Yixing Water Resource Recovery Facility / THAD SUP Atelier, <https://www.archdaily.com/1010818/concept-wrrf-yixing-thad-sup-atelier>
235. MagPrex™: Q&A with Gerhard Forstner, <https://www.centrisys-cnp.com/magprex-struvite-removal-guide>
236. New Belgium Brewing East Coast Brewery / Perkins+Will | ArchDaily, https://www.archdaily.com/899697/new-belgium-brewing-east-coast-brewery-perkins-plus-will?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
237. Powerbarn Bioenergy Production Plant / Giovanni Vaccarini Architetti, <https://www.archdaily.com/933025/powerbarn-bioenergy-production-plant-giovanni-vaccarini-architetti>
238. Nikam, K.N., Nikam, N.V.: Hydroponic design horizons: transforming urban landscapes for sustainable agriculture in the Indian context. *Cities Health*. 0, 1–14. <https://doi.org/10.1080/23748834.2024.2393476>
239. Arcas-Pilz, V., Ruffi-Salis, M., Parada, F., Petit-Boix, A., Gabarrell, X., Villalba, G.: Recovered phosphorus for a more resilient urban agriculture: Assessment of the fertilizer potential of struvite in hydroponics. *Sci. Total Environ.* 799, 149424 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149424>
240. Graber, A., Antenen, N., Junge, R.: The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. Presented at the Conference VIVUS: Transmission of Innovations, Knowledge and Practical Experience into Everyday Practice, Slovenia November 14 (2014)
241. Carreras-Sempere, M., Caceres, R., Viñas, M., Biel, C.: Use of Recovered Struvite and Ammonium Nitrate in Fertigation in Tomato (*Lycopersicon esculentum*)

Production for boosting Circular and Sustainable Horticulture. *Agriculture*. 11, 1063 (2021). <https://doi.org/10.3390/agriculture11111063>

242. Martin, M., Poulidikou, S., Molin, E.: Exploring the Environmental Performance of Urban Symbiosis for Vertical Hydroponic Farming. *Sustainability*. 11, 6724 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11236724>

243. Arosemena Polo, J.D., Toboso-Chavero, S., Adhikari, B., Villalba, G.: Closing the nutrient cycle in urban areas: The use of municipal solid waste in peri-urban and urban agriculture. *Waste Manag.* 183, 220–231 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.009>

244. Lee, A., Enthoven, N., Kaarsemaker, R.: Best Practice Guidelines for Greenhouse Water Management. ROCKWOOL B.V., GRODAN, Priva Holding B.V., Priva (2016)

245. Thomson, A., Price, G.W., Arnold, P., Dixon, M., Graham, T.: Review of the potential for recycling CO₂ from organic waste composting into plant production under controlled environment agriculture. *J. Clean. Prod.* 333, 130051 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130051>

246. Hidaka, K., Nakahara, S., Yasutake, D., Zhang, Y., Okayasu, T., Dan, K., Kitano, M., Sone, K.: Crop-local CO₂ enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations. *Sci. Hortic.* 301, 111104 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111104>

247. Benti, N.E., Alemu, Y.B., Balta, M.M., Gunta, S., Chaka, M.D., Semie, A.G., Mekonnen, Y.S., Yohannes, H.: Site suitability assessment for the development of wind power plant in Wolaita area, Southern Ethiopia: an AHP-GIS model. *Sci. Rep.* 13, 19811 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47149-x>

248. Archi_com: LOADING BAYS ★ Archi-Monarch, <https://archi-monarch.com/loading-bays/>, (2022)

249. Loading Dock | WBDG - Whole Building Design Guide, <https://www.wbdg.org/space-types/loading-dock>

250. ДБН Б.2.2-12:2019 “Планування і забудова територій,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3260441209981634046, (2019)

251. Chart Inc.: Product Manual - Perma-Max I TM MicroBulk CO2 Systems, https://files.chartindustries.com/20892356_Perma-Max_CO2_Manual.pdf, (2024)
252. RainHarvest Systems: System Design, <https://support.rainharvest.com/support/solutions/63000156438>
253. Ridder Growing Solutions B.V.: RIDDER. Installation and User Manual. VitaLite-E and C, <https://www.manualslib.com/manual/2852442/Ridder-Vitalite-E.html>, (2020)
254. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою, https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759, (2016)
255. Radwan, A., Katsura, T., Memon, S., Serageldin, A.A., Nakamura, M., Nagano, K.: Thermal and electrical performances of semi-transparent photovoltaic glazing integrated with translucent vacuum insulation panel and vacuum glazing. *Energy Convers. Manag.* 215, 112920 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112920>
256. Sun, Y., Shanks, K., Baig, H., Zhang, W., Hao, X., Li, Y., He, B., Wilson, R., Liu, H., Sundaram, S., Zhang, J., Xie, L., Mallick, T., Wu, Y.: Integrated semi-transparent cadmium telluride photovoltaic glazing into windows: Energy and daylight performance for different architecture designs. *Appl. Energy.* 231, 972–984 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.133>
257. Resource Innovation Institute: Best Practices Guide Water Circularity for Controlled Environment Agriculture (CEA) Operations. Resource Innovation Institute (2023)
258. MoE/UNDP: National guidelines for greenhouse rainwater harvesting systems in the agriculture sector. Ministry of Environment, Beirut, Lebanon (2016)
259. Water, <https://ridder.com/solution-areas/water/>
260. Bustanica | We farm differently. We care passionately, <https://www.bustanica.ae/about>
261. Emirates Crop One Vertical Farm, <https://www.groupamana.com/project/emirates-crop-one-vertical-farm/>

262. Ilmelgo Reimagines Future of Urban Agriculture in Romainville, <https://www.archdaily.com/874922/ilmelgo-reimagines-future-of-urban-agriculture-in-romainville>
263. Andrews, K.: Pasona Urban Farm by Kono Designs. Dezeen. (2013)
264. INFARM: About us, <https://www.infarm.com/about-us/>
265. Gu, S., Ji, H., Yang, Y., Chu, Q., Yang, Y., Liu, H., Jiang, X.: Analysis on Transporting Methods of Cultivation Unit for Vertical Cultivation in Plant Factory. *Agriculture*. 11, 989 (2021). <https://doi.org/10.3390/agriculture11100989>
266. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99, <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>
267. ДБН В.2.5-56:2014 “Системи протипожежного захисту,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200383488549193714, (2019)
268. ДБН А.3.2-2-2009 “Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074220455066862610, (2012)
269. Про затвердження Правил охорони праці під час роботи в хімічних лабораторіях. (2012)
270. Automation vs. Human Labor at Vertical Farming Business, <https://ifarm.fi/blog/how-many-working-hours-does-it-take-to-run-a-vertical-farm>
271. Vertical farming equipment list, <https://ifarm.fi/blog/vertical-farming-equipment-list>
272. 4 wheels steel plywood shelves danish nursery plant flower shipping carts for sale, <https://www.bestsuppliers.com/products/flgupib6qvkw/4-wheels-steel-plywood-shelves-danish-nursery-plant-flower-shipping-carts-for-sale>
273. Metal Plant Trolley – Durable & Customizable Trolley for Agriculture | direct from Growers House, <https://growershouse.com/metal-plant-trolley>
274. Seed Cart “Tube” 5 floors x 4 Trays, <https://www.carretillasamate.com/gb/manual-products/81-seed-cart-tube-5-floors-x-4-trays.html>

275. VF5213 Transport/Hardening Off Trolley, <https://v-farm.co.uk/products/vf-5213-transport-hardening-off-trolley>
276. VF5226 - Harvest ladder, <https://v-farm.co.uk/products/vf5226-harvest-ladder>
277. Escalera con tarima – KRAUSE: acceso por un lado | kaiserkraft, <https://www.kaiserkraft.es/medios-auxiliares-de-subida/escaleras-de-plataforma-escaleras-con-tarima/escalera-con-tarima/acceso-por-un-lado/p/M4987297/>
278. Escalera móvil con plataforma y 6 peldaños - Manupack, <https://manupacksl.com/escalera-movil-con-plataforma-y-6-peldanos/>
279. Escalera de plataforma móvil PL200/8, 2.000 mm altura de la plataforma, 8 peldaños, TOPREGAL | TOPREGAL, <https://www.topregal.es/es/escaleras/escalera-de-plataforma-movil-pl200-8-2000-mm-altura-de-la-plataforma-8-peldanos-topregal.html>
280. Tracker Mobile Platform Ladder, <https://www.backsafeaustralia.com.au/product-page/tracker-mobile-platform-ladder>
281. Mobile platform ladder PL200/8, platform height 2.000 mm, 8 steps, TOPREGAL, <https://www.topregal.com/en/ladders/mobile-platform-ladder-pl200-8-platform-height-2000-mm-8-steps-topregal.html>
282. Agricultural Farming Equipment Greenhouse Indoor Electric Harvest Trolley Lift Tomato Harvester Pipe Rail Cart Trolley Lifting - Picking Trolley and Forklift for Picking, <https://sunshine-greenhouse.en.made-in-china.com/product/DEHYgCyMHAUq/China-Agricultural-Farming-Equipment-Greenhouse-Indoor-Electric-Harvest-Trolley-Lift-Tomato-Harvester-Pipe-Rail-Cart-Trolley-Lifting.html>
283. Electric Scissor Lifts | Slab Scissor Lifts | Genie - Quality By Design, <https://www.genielift.com/en-gb/aerial-lifts/electric-slab-scissor-lifts>
284. Farming Equipment Greenhouse Indoor Electric Harvest Trolley Lift Tomato Harvester Picking Cart For 550mm Rail Support - Buy Agricultural Greenhouse Electric Pipe Rail Cart Trolley Lifting agricultural Indoor Farming Electric Harvest Trolley Lift Picking Cart agricultural Farming Equipment Greenhouse Tomato Harvester Trolley Lift For 550mm Rail Support Product on Alibaba.com,

<https://www.alibaba.com/product-detail/Agricultural-farming-equipment-greenhouse-indoor-electric-1600602674467.html>

285. Genie scissors assist ‘Europe’s largest’ vertical farm, <https://www.accessbriefing.com/news/genie-scissors-assist-europes-largest-vertical-farm/8014093.article>

286. Agricultural Farming Equipment Greenhouse Indoor Electric Harvest Trolley Lift Tomato Harvester Pipe Rail Cart Trolley Lifting, <https://sunshine-greenhouse.en.made-in-china.com/product/DEHYgCyMHAUq/China-Agricultural-Farming-Equipment-Greenhouse-Indoor-Electric-Harvest-Trolley-Lift-Tomato-Harvester-Pipe-Rail-Cart-Trolley-Lifting.html>

287. Genie Scissor Lift - Free CAD Drawings, <https://freecadfloorplans.com/genie-scissor-lift/>

288. Planos De Escalera De Servicio Ilustración del Vector - Ilustración de equipo, existencias: 210711105, <https://es.dreamstime.com/planos-de-escalera-servicio-ilustración-vectorial-estilizada-una-plataforma-para-image210711105>

289. Dayananda, H.: One Square Meter Yield: A Hydroponic System Design, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1568472&dswid=-6516>, (2021)

290. ДБН В.2.2-28:2010 “Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080029223885211423, (2011)

291. Vegetable consumption per capita, <https://ourworldindata.org/grapher/vegetable-consumption-per-capita>

292. Fruit consumption per capita, <https://ourworldindata.org/grapher/fruit-consumption-per-capita>

293. Agricultural water withdrawals, <https://ourworldindata.org/grapher/agricultural-water-withdrawals>

294. Brouwer, C., Prins, K., Heibloem, M., Food and Agriculture Organization: Irrigation Scheduling. F.A.O. (1989)

295. 2030, W.R.G., Group], [Colin Chartres is a member of the Expert Advisory: Charting our water future: economic frameworks to inform decision-making. International Water Management Institute (2009)
296. Global agricultural land use by major crop type, <https://ourworldindata.org/grapher/global-agricultural-land-use-by-major-crop-type>
297. Carlsson-Kanyama, A., Ekström, M.P., Shanahan, H.: Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency. *Ecol. Econ.* 44, 293–307 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00261-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00261-6)
298. Research, S.: Vertical Farming Market Size, Share | Growth Report 2031, <https://straitresearch.com/report/vertical-farming-market>
299. Europe Vertical Farming Market Opportunities & Industry Growth To 2030, <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/europe-vertical-farming-market>
300. iFarm Vertical Farms Technologies Portfolio, <https://ifarm.fi/projects>
301. Vertical Harvest | METALOCUS, <https://www.metalocus.es/en/news/vertical-harvest>
302. Podmirseg, D.: Vertical Farm Aspern Vienna, <https://verticalfarminstitute.com/vertical-farm-aspern-vienna/>, (2022)

ДОДАТКИ

Додаток А

Поняття вертикального фермерства

У науковій літературі *вертикальне фермерство* (англ. *vertical farming*) описується за допомогою різних термінів, що відображають його багатогранну природу та різноманітність технологічних особливостей. Найпоширеніші включають землеробство у контрольованому середовищі (controlled environment agriculture, СЕА), закрите фермерство (indoor farming), точне фермерство (precision farming), розумне фермерство (smart farming), фермерство всередині будівлі (building-integrated farming), та гідропонне або аеропонне фермерство (hydroponic/аeroponic farming). Ці терміни зосереджені навколо єдиної концепції, яка об'єднує всі ці різноманітні характеристики.

Проте, найповніший опис міститься у формулюванні "*землеробство у контрольованому середовищі*" – практика вирощування сільськогосподарських культур при регулюванні умов навколишнього середовища, таких як освітлення, температура, вміст CO₂, вологість, системи поливу і удобрення та інших елементів, що впливають на фізіологічний розвиток рослин.

Отже, вертикальні господарства (ферми) можна узагальнено визначити як об'єкти, що застосовують землеробство у контрольованому середовищі, вирощуючи рослини у вертикальних багатоярусних системах. Зокрема, Кембриджський словник визначає вертикальну ферму (*vertical farm*) як "будівлю або ділянку під землею, де сільськогосподарські культури вирощуються в багатьох рівнях, один над одним, часто в спеціально контрольованому середовищі". У науковій літературі ці об'єкти також називають "рослинницьким підприємствами" (plant factories) або "рослинницьким підприємствами зі штучним освітленням" (plant factories with artificial lighting, PFAL), на додаток до вищезгаданих термінів (з модифікацією до "ферма" замість "фермерство").

Проте, для більшої точності та відповідності направленню цієї наукової праці, запропоновано удосконалене визначення, а саме: *вертикальне рослинницьке господарство або вертикальна ферма (ВФ)* – це інтегроване в будівлю рослинницьке підприємство, яке використовує технології контрольованого середовища та безґрунтові методи для вирощування рослин у вертикальних багатоярусних системах.

Актуальність цього визначення полягає в його багатогранності:

- "*інтегроване в будівлю*" визначає структурну основу таких об'єктів, відрізняючи їх від простих теплиць або парників, навіть якщо такі використовують точні методи вирощування рослин;
- "*рослинницьке підприємство*" підкреслює, що вертикальні ферми є комплексними промисловими підприємствами, що включають не тільки приміщення для вирощування, а й супутні зони (наприклад, для обробки та зберігання продукції, складські, побутові та службові кімнати, і т.п.);
- "*яке використовує технології контрольованого середовища та безґрунтові методи*" охоплює комбінацію технологій, характерних для вертикального фермерства, виключаючи ґрунтове вирощування в об'єктах, які можуть використовувати штучне освітлення або інші часткові коригування навколишнього середовища;
- "*у вертикальних багатоярусних системах*" визначає технологічні вимоги до обладнання для вирощування.

Додаток Б

Статистичні дані щодо вертикального фермерства в контексті глобального розвитку та порівняльного аналізу технологій рослинництва

Стрімкі демографічні зміни в сучасному світі зумовлюють зростання актуальності забезпечення продовольчої безпеки. За прогнозами Організації Об'єднаних Націй, чисельність населення планети досягне 8,5 мільярдів у 2030 році, 9,7 мільярдів у 2050 році і 10,4 мільярдів до 2100 року [29, 69]. Це демографічне зростання створює значний тиск на аграрні системи, які повинні не лише задовольняти зростаючий попит, але й функціонувати у сталий спосіб. Відповідно, сучасне землеробство стикається з низкою викликів, таких як зміна клімату, значні викиди парникових газів, деградація ґрунтів і виснаження викопних ресурсів, що ускладнює його стійкий розвиток.

Однак традиційні методи землеробства не здатні повною мірою задовольнити зростаючий попит через їхню залежність від зовнішніх факторів, низьку продуктивність та обмежену ефективність використання ресурсів [71–73]. Наприклад, кліматичні умови, природні катастрофи та біологічні шкідники можуть не лише обмежувати різноманітність сільськогосподарських культур, але й суттєво впливати на якість та кількість врожаю. Ці проблеми стають ще гострішими у контексті зміни клімату, що ускладнює адаптацію господарств відкритого ґрунту до нових умов.

Крім того, традиційні методи вирощування передбачають використання синтетичних добрив та пестицидів, які сприяють деградації ґрунтів, забрудненню води, зменшенню біорізноманіття та створюють загрозу для здоров'я людини. Ґрунтоорієнтоване землеробство також вимагає значних площ землі та водних ресурсів, які є дефіцитними та можуть виснажуватися через зростання попиту.

Неспроможність традиційного сільського господарства відповідати глобальним викликам зумовлює зростання актуальності альтернативних підходів, зокрема тих, що поєднують високу ефективність та зменшують негативний вплив на довкілля. Одним із таких рішень є землеробство в умовах контрольованого

середовища (англ. *controlled environment agriculture*), яке також називають вертикальним або «розумним» фермерством.

Перш за все, зі зростанням чисельності населення необхідність збільшення продовольчого виробництва стає нагальною, що створює додаткове навантаження на сільськогосподарські системи. Прогнози свідчать, що глобальний попит на виробництво продуктів харчування до 2050 року зросте на 30–62% залежно від впливу зміни клімату [70]. Наприклад, середньорічна норма споживання овочів на одну особу, яка становить 147,04 кг [291], може призвести до загального попиту на рівні 1,4 мільярда тонн на рік. Подібно, прогнозується, що річне споживання фруктів, яке нині становить 86,4 кг на особу, зросте до понад 0,8 мільярда тонн [292]. Такі тенденції значно ускладнюють можливість традиційних аграрних систем забезпечити потреби зростаючого населення.

Як наслідок, задоволення такого значного попиту вимагатиме інтенсифікації сільськогосподарських практик, що призведе до численних негативних наслідків. Серед них – високі викиди парникових газів, що сприяють підвищенню глобальної температури, деградація сільськогосподарських земель, надмірне споживання води та виснаження інших природних ресурсів.

Проте, можливість розширення площ для виробництва продовольства залишається обмеженою через високу ступінь освоєння придатних земель. Наразі людство використовує 44% (48 млн км²) територій, придатних для сільськогосподарського використання. У Європі площі під ріллею становлять 24,74%, в Україні — 56,82%, а в Іспанії — 23,11% [74]. Водночас зростаючий попит на продовольство може перевищити доступні ресурси орних угідь. Ця ситуація ускладнюється прогресуючими кліматичними змінами та деградацією ґрунтів, які знижують ефективність традиційних методів землеробства.

Окрім цього, зміна клімату є одним із ключових факторів, що визначають особливості ведення сільського господарства у глобальному масштабі. Водночас аграрні практики суттєво впливають на кліматичні зміни через викиди парникових газів і шкідливі виробничі процеси [71, 72]. Підвищення глобальних температур, зміни режиму опадів і частіші екстремальні погодні явища негативно впливають на

врожайність, скорочують тривалість продуктивних сезонів і змінюють географічний розподіл родючих земель. Ці явища свідчать про глибокий взаємозв'язок між кліматом і сільським господарством, що формує замкнений цикл взаємного впливу.

Відповідно, рослинництво суттєво впливає на зміну клімату через такі практики, як вирубка лісів, використання синтетичних добрив і важкої сільськогосподарської техніки. Ці дії сприяють викидам вуглекислого газу, метану та закису азоту, що, у свою чергу, підвищують середню глобальну температуру поверхні Землі. Зокрема, у 2022 році загальний внесок аграрного сектору в глобальне потепління оцінювався на рівні $0,576^{\circ}\text{C}$, включно із $0,021^{\circ}\text{C}$ від Європи, $0,006^{\circ}\text{C}$ від України та $0,002^{\circ}\text{C}$ від Іспанії [81].

Ця взаємозалежність формує циклічний процес: сільське господарство посилює зміну клімату, а зміна клімату ускладнює екологічну стабільність, надійність і ефективність аграрних систем.

Відповідно, підвищення температури може спричинити зростання випаровування води, що веде до виникнення глибших посух. Водночас екстремальні опади спричиняють ерозію ґрунту та значні втрати врожаю. Такий взаємозв'язок вказує на необхідність пошуку підходів до сільського господарства, які могли б одночасно зменшити вплив землеробства на природні зміни та підвищити його адаптивність до мінливих та екстремальних умов навколишнього середовища.

Поряд із глобальними кліматичними змінами, інтенсивні аграрні практики значно погіршують якість угідь, знижуючи їхню продуктивність і ставлячи під загрозу продовольчу безпеку. Ключовим показником такого занепаду є рівень органічної речовини в ґрунті: її вміст нижче $0,8\%$ робить землю малопродуктивною, що часто призводить до її занедбання [76]. Щороку близько 12 мільйонів гектарів аграрних угідь втрачається через подібні регресивні процеси. Наразі 40% світових сільськогосподарських ґрунтів класифікуються як деградовані або сильно деградовані, а 70% верхнього шару землі, критично важливого для

росту рослин, уже втрачено. Наприклад, у 2019 році в Україні частка деградованих територій становила 30,36%, а в Іспанії — 11,06% [75].

Значна частина цієї деградації (28%) обумовлена сільськогосподарською діяльністю, зокрема застосуванням пестицидів і хімічних добрив, надмірним зрошенням, використанням важкої техніки та інтенсивним обробітком земель. Такі практики посилюють ерозію, засолення, ущільнення ґрунту, зменшення рівня органічної речовини та утворення дифузних джерел забруднення. Як наслідок, темпи ерозії прискорюються до 10-40 разів швидше, ніж природне відновлення, що призводить до швидкого виснаження поживних речовин і вмісту вуглецю в ґрунті, а це, в свою чергу, знижує стійкість і родючість угідь. Якщо нинішні тенденції збережуться, то, за оцінками, людству залишилося близько 60 років продуктивного верхнього шару. Внаслідок це призведе до 30% падіння виробництва продуктів харчування протягом наступних 20-50 років, що напряду суперечить прогнозованому зростаючому попиту на продукти харчування [77].

Інтенсивне використання пестицидів та гербіцидів у традиційних методах сільськогосподарського виробництва не обмежується спричиненням деградації аграрних земель. Надмірне застосування цих хімічних засобів також створює суттєву загрозу для здоров'я людини та екологічної стабільності. Зокрема, пестициди можуть спричиняти широкий спектр токсичних ефектів, серед яких нейротоксичність, мутагенність, канцерогенність, тератогенність та порушення ендокринної системи [79]. Значну стурбованість викликають неонікотиніди, що активно використовуються як інсектициди. Ці речовини було виявлено у ґрунті, водних ресурсах, пилу, різноманітних культурах, а також в організмах тварин і людей.

Безпосередній вплив на людину можливий через вдихання контамінованого пилу або вживання забруднених води і харчових продуктів. Як наслідок, за даними сучасних досліджень, неонікотиніди та їх метаболіти можуть провокувати оксидативний стрес, неврологічні розлади, остеопороз, а також бути фактором підвищення ризику розвитку онкологічних захворювань [80].

Пестициди також слід розглядати як один із головних чинників забруднення ґрунтів, водних ресурсів, а також рослинного покриву. Окрім цілеспрямованого знищення шкідливих комах і бур'янів, ці хімічні речовини виявляють токсичний вплив на інші біологічні види, включаючи птахів, риб, корисних комах та нецільові рослини. Такий широкий спектр впливів спричиняє суттєві зміни в екосистемах, що проявляється у зниженні рівня біорізноманіття, порушенні природного балансу та посиленні забруднення довкілля.

Ще однією з ключових екологічних загроз у сучасній сільськогосподарській діяльності є нераціональне використання водних ресурсів що постають. Незважаючи на те, що вода займає близько 71% поверхні Землі, лише 3% цих запасів є придатними для використання у господарській діяльності або споживання людиною. Таким чином, неефективні методи зрошення та інші недосконалі практики призводять до значних втрат прісної води, що зменшує її доступність для таких критично важливих сфер, як питне водопостачання. Унаслідок цього виникає додатковий екологічний тиск, який виявляється у деградації водних екосистем, зокрема через зменшення біорізноманіття та забруднення водних шляхів [78].

Наприклад, у 2015 році щорічний обсяг води, залученої з власних природних джерел для потреб сільського господарства, становив 71,6% (1,575 млрд м³) на глобальному рівні, 31,1% (4,45 млрд м³) в Україні та 65,7% (4,45 млрд м³) в Іспанії [293]. Однак до 50% цієї води було втрачено через неефективність зрошувальних систем, що спричиняло непродуктивне випаровування та просочування [294]. Відповідно, велика залежність землеробства від іригаційних технологій суттєво виснажує запаси прісної води, викликаючи вторинне засолення ґрунтів та зниження врожайності. За оцінками, темпи зростання використання води у світі перевищують темпи зростання населення більш ніж удвічі, і якщо існуючі тенденції залишатимуться незмінними, попит на водні ресурси може зрости на 40–50% до 2030 року [295].

Враховуючи окреслені виклики, основним завданням сучасного сільського господарства є забезпечення збалансованого виробництва продуктів харчування із застосуванням сталих практик, які мінімізують виснаження природних ресурсів і

сприяють збереженню здоров'я людини та екологічного балансу планети. У цьому контексті розвиток вертикального фермерства стає ключовим напрямом пошуку як оперативних, так і стратегічних рішень.

Даний метод рослинництва може забезпечити відповідність визначеному завданню сучасних агро-систем завдяки його основним перевагам: захищеність і закритість процесу вирощування, відсутність необхідності у використанні ґрунту чи пестицидів, ефективне використання води та добрив, а також можливість точного контролю умов культивування. Такі технології забезпечують суттєве підвищення врожайності та стабільності виробництва, одночасно знижуючи витрати необхідних ресурсів та усуваючи потребу у застосуванні агрохімікатів. З огляду на це, вертикальні ферми здатні задовольняти сучасні потреби, а в довгостроковій перспективі можуть слугувати повноцінною альтернативою або значним доповненням до традиційного ґрунтового сільського господарства.

Перш за все, висока продуктивність сільськогосподарських систем у контрольованому середовищі демонструє значний потенціал вертикального рослинництва для трансформації глобального виробництва продуктів харчування та вирішення проблем продовольчої безпеки. Зокрема, вертикальні ферми здатні виробляти до 100 кг/м²/рік [82], що в 25 разів перевищує середній показник для відкритого ґрунту (4 кг/м²/рік) та у 2,5 рази перевершує продуктивність теплиць (40 кг/м²/рік) [85]. Така ефективність дозволяє мінімізувати потребу в орних землях, забезпечуючи водночас задоволення зростаючого попиту на продовольство.

З точки зору раціонального землекористування, вертикальні господарства можуть стати ефективним засобом захисту якості ґрунтів і запобігання їх подальшій деградації. Ця перевага зумовлена високою щільністю посіву у таких системах: 250–300 культур/м² порівняно з 25 культурами/м² у теплицях та 18 культурами/м² у відкритому ґрунті [83]. Як наслідок, така значна ефективність використання площі дозволяє зберігати природні території та підтримувати біорізноманіття, уникаючи необхідності масштабного розширення угідь за рахунок вирубки лісів.

Безперечно, захищеність і стабільність вертикального рослинництва є однією з ключових переваг у контексті глобальних кліматичних змін. На відміну від традиційного землеробства, яке залежить від погодних умов, такі інноваційні ферми функціонують у закритих безґрунтових системах, що дозволяють підтримувати оптимальні параметри температури, вологості та освітлення незалежно від зовнішніх кліматичних коливань. Завдяки цьому досягається стабільна та передбачувана врожайність протягом усього року, що особливо важливо в умовах змін клімату.

Забезпечення сталості умов вирощування у вертикальних фермах досягається завдяки інтеграції фермерських систем у спеціально розроблене архітектурне середовище, яке гарантує належний рівень зовнішнього захисту від кліматичних факторів. Таким чином, особливу увагу слід приділити створенню кліматично адаптованих проєктів, здатних не лише відповідати сучасним умовам, але й враховувати довгострокові зміни клімату. Враховуючи невизначеність щодо можливостей повного контролю за глобальними кліматичними змінами, роль архітектури у формуванні стійких і надійних вертикальних фермерських систем набуває ключового значення для забезпечення сталого сільськогосподарського виробництва.

Окрім цього, однією з ключових переваг ВФ є відсутність необхідності у використанні пестицидів і гербіцидів, що мінімізує їхній негативний вплив на довкілля та здоров'я населення. Наприклад, у той час як традиційні угіддя відкритого ґрунту застосовують 0,2–0,4 кг пестицидів на одну тонну продукції (салат), а теплиці — 0,06–0,14 кг/тонну, вертикальні господарства повністю виключають ці хімікати [84]. Як наслідок, це знижує ризики токсичних впливів для працівників і споживачів. З екологічної точки зору, усунення пестицидів запобігає забрудненню ґрунтів, води та екосистем, що сприяє збереженню біорізноманіття. Такий підхід підтримує екологічну рівновагу та запобігає деградації ґрунтів, відповідаючи сучасним пріоритетам у сфері охорони здоров'я та довкілля.

Вертикальне рослинництво також пропонує раціональне вирішення проблеми дефіциту водних ресурсів. Традиційне господарство потребує значних

обсягів прісної води, зокрема, для вирощування 1 кг салату у відкритому ґрунті необхідно близько 250 л води [85], у теплицях — від 10 до 250 л/кг [122], тоді як у вертикальних підприємствах — лише 1–20 л/кг [85], що дозволяє зменшити витрати води до 99%. Це досягається завдяки застосуванню точних систем зрошення, таких як гідропоніка та аеропоніка, впровадженню технологій рециркуляції води та створенню контрольованого середовища, яке мінімізує втрати через випаровування. Завдяки цим технологіям такі інноваційні агро-об'єкти не лише знижують навантаження на прісноводні ресурси, але й запобігають засоленню ґрунтів і підтримують високу якість врожаю. Таким чином, вони забезпечують сталий підхід до вирішення глобальних викликів, пов'язаних із забезпеченням продуктів харчування, без додаткового загострення проблеми водного дефіциту.

На додаток, вертикальне землеробство пропонує не лише значні екологічні й економічні переваги, але й формується як перспективний підхід до вирішення проблем прогресуючої урбанізації. Інтеграція рослинництва в міський простір сприяє створенню симбіотичних взаємодій між агровиробництвом і міськими екосистемами, що забезпечує багатофункціональні вигоди для місцевих громад.

Зокрема, локалізація таких господарств різко скорочує транспортну відстань, яку продукти харчування долають від місця вирощування до споживача. Цей показник, відомий як «продовольчі милі» (англ. *food miles*), значно нижчий для вертикальних ферм: у середньому лише 50 км, порівняно з 1200 км для тепличної продукції та 3000 км для конвенційного підходу [82]. Відповідно, скорочення транспортних відстаней має комплексний позитивний вплив як на економічну ефективність, так і на екологічну стійкість аграрних систем.

Таким чином, зменшення продовольчих миль у вертикальному землеробстві безпосередньо знижує обсяги викидів парникових газів, пов'язаних із перевезенням продуктів харчування. Наприклад, при транспортуванні продукції з традиційних угідь утворюється в середньому 315 кг CO₂-екв на одну вантажівку, а з теплиць — 126 кг CO₂-екв. У випадку вертикальних підприємств цей показник становить лише 5 кг CO₂-екв [86]. В свою чергу, зниження вуглецевого сліду відповідає сучасним

міжнародним ініціативам зі зменшення негативного впливу на довкілля та сприяє зміцненню екологічної стійкості міських продовольчих систем.

Більше того, локалізація виробництва продуктів харчування через вертикальні ферми створює низку економічних та соціальних переваг для міських соціо-економічних систем. Завдяки скороченню витрат на транспортування та доставку, а також стабільності врожаїв, такі господарства сприяють зниженню й стабілізації цін на продукцію, забезпечуючи ширший доступ до свіжих харчів. Близькість виробництва до споживачів дозволяє постачати якісні сільськогосподарські товари, зберігаючи їхню високу поживну цінність та мінімізуючи втрати – проблеми, які зазвичай виникають під час транспортування на далекі відстані або під час тривалого зберігання. Окрім цього, розташування ферм у межах міських ландшафтів також сприяє створенню нових робочих місць, що диверсифікує структуру міської економіки.

Проте, перехід до вертикального фермерства є комплексним і довготривалим процесом, що потребує теоретичного та практичного доопрацювання. Цей підхід, хоча й має значний потенціал, стикається з низкою обмежень. Зокрема, комерційне застосування лімітується різноманітністю культур, які можуть вирощуватися в таких умовах. Основними причинами є дефіцит фізичного простору, що ускладнює вирощування великих рослин, специфічні вимоги до освітлення, адаптація культур до контрольованого середовища, а також економічні виклики, які зумовлюють зосередження на високоцінних, невибагливих і швидкорослих культурах. До переліку таких культур належать листові та мікро-зелень, огірки, помідори, перець, горох, полуниця та інші ягоди. Ці рослини становлять лише 2,1% (32,8 мільйона гектарів) від світової земельної площі, відведеної для споживчого аграрного виробництва [296]. Тож, перспективи подальшого розширення цього списку залежать від розвитку технологій, генетичної адаптації рослин та оптимізації економічних моделей.

Хоча дана частка у контексті глобального агровиробництва залишається відносно невеликою, слід підкреслити, що цей підхід є порівняно новим у рослинництві. Так, успішні комерційні гідропонні системи з'явилися лише у 1930-

х роках, тоді як сучасні теплиці розвиваються з 1800-х років, а традиційне сільське господарство існує протягом тисячоліть [93, 94]. Водночас теоретичні основи вертикального фермерства почали активно розроблятися лише з 2013 року. За даними наукометричних баз Web of Science® та Scopus®, кількість публікацій із цієї тематики зростає з 5 у 2013 році до 763 протягом наступного десятиліття. Таким чином, це свідчить про поступовий прогрес у вирішенні питань економічної життєздатності, підвищення врожайності та вдосконалення систем вертикального фермерства, що окреслює перспективи його подальшого розвитку.

Попри існуючі обмеження, перехід від традиційного до контрольованого середовища вирощування демонструє значний потенціал для економії ресурсів. Аналіз ефективності використання земельних площ та води, проведений на прикладі України та Іспанії, свідчить про вагомі переваги вертикального рослинництва. Цей аналіз фокусується на одних з найпоширеніших сільськогосподарських культур у Центрально-Східній Європі: салаті, полуниці, помідорах та огірках/корнішонах.

З точки зору землекористування, відзначено суттєве скорочення потреби в таких угіддях. В Україні площі, необхідні для вирощування салату, зменшуються на 99,7% (з 100 га до 0,25 га) із збереженням річного врожаю у 1530 тонн [137, 138]. Подібні тенденції спостерігаються для полуниці, помідорів та огірків/корнішонів, із скороченням земель на 99,3%, 99,7% та 99,7% відповідно [137, 139, 140]. Для Іспанії показники ефективності також значні: угіддя скорочуються від 95,8% для полуниці до 99,6% для салату [108-110].

Окрім цього, вертикальне фермерство також значно підвищує ефективність використання водних ресурсів. Відповідно, у разі переходу до вирощування салату таким методом, споживання води в Україні та Іспанії може зменшитися на 97,9% для виробництва цієї культури [85, 141]. Для огірків і корнішонів цей показник становитиме 93,2% [141, 142], тоді як полуниця та помідори демонструють скорочення на 75% і 55,1% відповідно [141, 143]. Загальний обсяг потенційної економії води для даних сільськогосподарських рослин оцінюється у 348 131 млн літрів для України та 601 598 млн літрів для Іспанії щорічно. Такі результати

підкреслюють ключову роль вертикального рослинництва у вирішенні проблеми раціонального використання прісноводних ресурсів, особливо у регіонах із дефіцитом води.

Ці висновки підкреслюють сучасний трансформаційний потенціал вертикального рослинництва у вирішенні проблем дефіциту землі та збереження прісноводних ресурсів попри існуючі галузеві виклики. Як наслідок, застосування такого підходу окреслює передумови для раціонального використання сільськогосподарських угідь, наприклад, для проєктів лісовідновлення, збереження біорізноманіття або вирощування культур, менш придатних для вертикального фермерства.

Варто зазначити, що даний порівняльний аналіз підтверджує значний потенціал вертикального фермерства. Однак практична реалізація цього підходу потребуватиме врахування таких додаткових факторів, як споживання енергії, капітальні інвестиційні та операційні витрати, а також труднощі пов'язані з вирощуванням окремих культур. Незважаючи на це, результати дослідження свідчать про доцільність подальшого розвитку технологій вертикального фермерства для підвищення стійкості сільського господарства та ефективності використання ресурсів.

Окрім цього, вертикальне рослинництво набуває особливої значущості для України у контексті триваючої повномасштабної війни та її руйнівного впливу на традиційні методи землеробства. Озброєний конфлікт спричинив серйозні проблеми для сільського господарства, зокрема хімічне та механічне знищення земель, включно через встановлення протипіхотних та протитанкових мін російськими військами. Як наслідок, станом на 2020 рік в Україні було понад 5 мільйонів гектарів земель, непридатних для сільськогосподарського використання [30]. За оцінками, розмінування цих територій та відновлення аграрного виробництва, ймовірно, триватиме щонайменше десятиліття.

Водночас російська агресія призвела до втрати понад 100 життів і численних поранень серед фермерів, а також до знищення мільйонів сільськогосподарських товарів [32]. Традиційне землеробство залишається вразливим перед загрозами,

такими як ракетні обстріли та наземні міни. На відміну від цього, вертикальні ферми пропонують більш безпечні умови, зокрема можливість їх розміщення в захищеному середовищі, наприклад, в підземних приміщеннях. Таким чином, даний підхід не лише надає забезпечення продовольства, але й сприяє збереженню людських життів.

З огляду на масштабні втрати, яких зазнав аграрний сектор України через збройний конфлікт, впровадження технологій вертикального фермерства може суттєво сприяти його відродженню. Цей метод культивування дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з конвенційним землеробством, зокрема залежність від погодних умов і загрозу пошкодження інфраструктури. Відповідно, використання вертикальних систем вирощування може забезпечити довгострокову стійкість та ефективність відновлення агроєкономіки України.

Хоча переваги даного методу є значними, цей підхід має і свої обмеження. Для повного розуміння його життєздатності як практичного сільськогосподарського рішення необхідно ретельно оцінити потенційні недоліки. Зокрема, таке рослинництво пов'язане з високими витратами та значним вуглецевим слідом. Першочерговими викликами є значні інвестиції на етапі будівництва та високі витрати на експлуатацію, що включають складні вимоги до технічного обслуговування. Усе це створює суттєві економічні бар'єри для масштабного впровадження. Крім того, безпосередньо саме спорудження та високе споживання електроенергії під час виробництва призводять до значних викидів парникових газів, що також є серйозною екологічною проблемою.

Відповідно, економічна доцільність вертикального господарства значною мірою визначається високими капітальними витратами (CapEx). Наприклад, будівництво вертикальних ферм коштує від 1000 до 4000 євро/м², що суттєво перевищує CapEx на спорудження теплиць (100–300 євро/м²) та угідь відкритого ґрунту (0,5–50 євро/м²) [87]. Ця різниця пояснюється складними технологіями та інфраструктурою, необхідними для контрольованого безґрунтового вирощування, зокрема обладнанням для штучного освітлення, клімат-контролю, гідропонними або аеропонними системами, а також будівництвом приміщень і проєктними

роботами. Такі затрати потребують ретельного фінансового планування для забезпечення економічної життєздатності підприємств.

На етапі експлуатації вертикальні ферми стикаються з додатковими економічними викликами, особливо у сфері енергоспоживання. Через постійне використання штучного освітлення, клімат-контролю та вдосконалених систем вирощування такі господарства споживають значно більше електроенергії, ніж інші методи землеробства. Наприклад, виробництво 1 кг салату у вертикальній фермі потребує від 8 до 40 кВт-год електроенергії [88]. Для порівняння, вирощування в теплицях вимагає лише 0,7–20 кВт-год/кг [88] завдяки застосуванню сонячного світла та природних умов, в той час як найбільш енергоефективним підходом залишається вирощування у відкритому ґрунті, яке споживає від 0,02 до 4 кВт-год/кг [297]. Відповідно, освітлення та клімат-контроль можуть становити значну частину операційних витрат на електроенергію вертикальної ферми, часто являючи собою одні з найсуттєвіших витрат – в середньому 40% та 38% відповідно [85, 89–91]. Таким чином, хоча вертикальне рослинництво може запропонувати кілька раніше досліджених переваг, на довгострокову економічну доцільність значною мірою впливає здатність оптимізувати використання енергії та впроваджувати відновлювані джерела або інші енергозберігаючі практики.

Подібні високі потреби в електроенергії не тільки підвищують операційні розходи, але й спричиняють значні викиди парникових газів. Так, виробництво 1 кг салату на вертикальній фермі може створювати від 10 до 25 кг CO₂-екв [92], що переважно обумовлено використанням енергоємного штучного освітлення та систем клімат-контролю. Натомість теплиці генерують значно менше викидів — від 0,2 до 3,2 кг CO₂-екв на кілограм продукції [92], а найнижчий вуглецевий слід спостерігається при вирощуванні у відкритому ґрунті — 0,01- 0,4 кг CO₂-екв [92].

Різниця у викидах парникових газів чітко демонструє екологічні виклики, пов'язані з вертикальним фермерством. Хоча цей підхід має потенціал зменшити негативний вплив на довкілля завдяки раціональному землекористуванню, економії води та нівелювання потреби в пестицидах, висока залежність від

електроенергії значно ускладнює реалізацію цих переваг. Відповідно, для того, щоб вертикальне рослинництво стало сталою сільськогосподарською практикою, необхідно розробляти й впроваджувати еко-стійкі методи, зокрема технології зниження енергоспоживання, використання відновлюваних джерел енергії, та оптимізації самого виробництва.

Підсумовуючи, вертикальні рослинницькі підприємства є перспективним рішенням для подолання багатограних викликів сучасного сільського господарства, зокрема пом'якшення наслідків зміни клімату, зменшення споживання ресурсів, підвищення продовольчої безпеки та сталого розвитку міст. Зокрема, скорочення використання землі та води, підвищення врожайності й зменшення негативного впливу на довкілля демонструють потенціал вертикальних ферм для трансформації виробництва продовольства.

Водночас цей підхід супроводжується певними проблемами, такими як високі капітальні витрати, значне енергоспоживання та великий вуглецевий слід. Відповідно, ефективність вирішення даних питань значною мірою залежить від ретельного проектування та технологічних імплементацій. Саме тому аналіз досвіду архітектурного проектування та будівництва вертикальних ферм є ключовим для напрацювання оптимальних рішень, що враховують економічні, екологічні та соціальні аспекти. Відповідно, такий аналіз дозволить виділити найбільш дійові практики та унікальні інновації, які можуть бути адаптовані до різноманітних умов. Попри відносно коротку історію, галузь вертикального фермерства демонструє експоненціальне зростання, що підтверджене економічними показниками. Згідно з останніми даними, світовий ринок даної галузі у 2022 році оцінювався у 8,47 млрд доларів США, і очікується, що до 2031 року він досягне 59,13 млрд доларів США із середньорічним темпом зростання (CAGR) у 24,1% [298]. Подібна тенденція спостерігається і в Європі, де прогнозується зростання ринку з 913,56 млн доларів США у 2022 році до 5 877,77 млн доларів США до 2030 року (CAGR 26,20%) [299]. Відповідно, такі дані вказують на значний потенціал вертикального фермерства у вирішенні глобальних продовольчих викликів.

Додаток В

Специфікації і таблиці

Пошукові запити використані для пошуку наукових джерел у базі Scopus у дослідженні Розділу 3:

Терміни вертикального фермерства:

OR ("vertical farm*", "vertical agriculture", "indoor farm*", "indoor agriculture", "controlled*environment farm*", "controlled environment agriculture", "controlled farm*", "controlled agriculture", "plant factory with artificial lighting", "plant factory", "plant factories", "precision farm*", "precision agriculture", "smart farm*", "smart agriculture", "urban farm*", "urban agriculture", "hydroponic*", "aeroponic*")

Терміни екологічних метричних показників:

OR ("environmental impact*", "environmental assess*", "environmental indicator*", "environmental analys*", "environmental metric*", "life*cycle*assess*", "life*cycle inventory", lca, lci, "life*cycle assessment (LCA)", "global warming potential", CO₂-екв*)

Терміни еко-сталості для конкретних потоків – енергія:

OR ("solar energy", "wind energy", "geothermal", "biomass energy", "energy recover*", renewable, "heat recover*", "energy*efficien*", "energy saving*", "energy optimi?ation", "waste valor*", "waste recover*", "energy valor*", "green energy", "self*sufficien*", "biogas", "biofuel*", "bioenergy", "anaerobic", "waste heat", circular*, "circular economy", "urban waste*", "municipal waste*", "food waste*", "industrial waste*", "waste manag*", "urban symbios*", "industrial symbios*")

Терміни еко-сталості для конкретних потоків – поживні речовини:

OR ("waste valori?ation", "waste manag*", "food waste", "municipal waste", "urban waste", "industrial waste", "nutrient* substitut*", "fertili?er substitut*", circular, "circular economy", "nutrient* recover*", "fertili?er recover*", biofert*, "alternative fert*", closed*loop, "leachate recirculation", "nutrient* recirculation",

"industrial ecology", "industrial symbios* ", "urban symbios*", "nutrient recycl*", "fertilizer recycl*", slurry, struvite, "sewage sludge", sludge)

Терміни еко-сталості для конкретних потоків – CO₂:

OR ("carbon dioxide utilization", "CO₂ utilization", "carbon dioxide recover*", "CO₂ recover*", "carbon dioxide recycl*", "CO₂ recycl*", "carbon dioxide efficien*", "CO₂ efficien*", "carbon dioxide manag*", "CO₂ manag*", "carbon dioxide valorization", "CO₂ valorization", "carbon valorization", "renewable carbon dioxide", "renewable CO₂", "carbon dioxide reuse", "CO₂ reuse", "carbon capture", "carbon sequestration", "carbon dioxide circular economy", "CO₂ circular economy", "closed-loop carbon", "industrial ecology", "industrial symbios*", "urban symbios*")

Таблиця В.1.

Основні характеристики енергетично-орієнтованих циркулярних стратегій

<i>Циркулярна стратегія</i>	<i>Розташування</i>	<i>Культура</i>	<i>Структура</i>	<i>Площа</i>	<i>Річний врожай</i>	<i>Дж.</i>
1. Місцевий завод анаеробного бродіння	Швеція	помідори	скляна теплиця	20000 м ²	1688 т/рік	[226]
2. Національне постачання електроенергії з відновлюваних джерел	Фінляндія	салат	будівля ВФ	<i>не вказано</i>	<i>не вказано</i>	[222]
3. Національне постачання електроенергії з вітрової енергії	Франція	листова зелень	полікарбонатна теплиця	325 м ²	14.5 т/рік	[225]
4. Національне постачання електроенергії з відновлюваних джерел	Велика Британія	салат	будівля ВФ	<i>не актуально</i>	<i>не актуально</i>	[223]
5. Національне постачання електроенергії з відновлюваних джерел	Велика Британія	салат	ВФ інтегрована в існуючу будівлю	238 м ²	14.6 т/рік	[224]
6. Постачання енергії від фотоелектричних панелей	Сінгапур	листова зелень	ВФ в утепленому контейнері	500 м ²	32.3 т/рік	[107]
7. Фотоелектричні панелі на даху	Малайзія	<i>не вказано</i>	ВФ інтегрована в існуючу будівлю	142 м ²	<i>не вказано</i>	[227]
8. Фотоелектричні панелі на даху	Малайзія	<i>не вказано</i>	ВФ інтегрована в існуючу будівлю	256 м ²	<i>не вказано</i>	[227]
9. Фотоелектричні панелі на фасаді	Португалія	мікро-зелень брокколи	ВФ інтегрована в існуючу будівлю	22 м ²	2.7 т/рік	[195]
10. Фотоелектричні панелі на даху, 15 kW	Швеція	листова зелень	ВФ інтегрована в існуючу будівлю	100 м ²	5.6 т/рік	[196]
11. Фотоелектричні панелі на даху, 30 kW	Швеція	листова зелень	ВФ інтегрована в існуючу будівлю	100 м ²	5.6 т/рік	[196]
12. Біомасова тепла установка на оливкових кісточках та фотоелектричні панелі	Іспанія	помідори	полікарбонатна теплиця	100000 м ²	680.0 т/рік	[197]
13. Фотоелектричні панелі на даху та на фасаді	Нідерланди	листова зелень	будівля ВФ	90 м ²	6.6 т/рік	[84]
14. Фотоелектричні панелі та вітряки	Китай	салат	скляна теплиця	4640 м ²	<i>не вказано</i>	[198]
15. Промислові викиди	Велика Британія	конопля	скляна теплиця	12000 м ²	80.7 т/рік	[199]
16. Промислові викиди	Велика Британія	помідори	скляна теплиця	12000 м ²	356.4 т/рік	[199]

Таблиця В.2.

Результати аналізу енергетично-орієнтованих циркулярних стратегій

Циркулярна стратегія	Заміщення електроенергії ¹	Заміщення тепла ¹	Пот. скор. GHG ³	Енергетичні потреби ⁴
1. Місцевий завод анаеробного бродіння	90%	100%	-41%	6,2 кВт·год/кг
1. Національне постачання електроенергії з відновлюваних джерел	100%	75%	-60%	20,0 кВт·год/м ²
2. Національне постачання електроенергії з вітрової енергії	100%	не актуально	-60%	2,4 кВт·год/кг
3. Національне постачання електроенергії з відновлюваних джерел	100%	не актуально	-22%	20,12 кВт·год/кг
4. Національне постачання електроенергії з відновлюваних джерел	100%	не актуально	-83%	17,3 кВт·год/кг
5. Постачання енергії від фотоелектричних панелей	100%	не актуально	-85%	не вказано
6. Фотоелектричні панелі на даху	12%	не актуально	-11%	1103,8 кВт·год/м ²
7. Фотоелектричні панелі на даху	8%	не актуально	-9%	1427,5 кВт·год/м ²
8. Фотоелектричні панелі на фасаді	70%	не актуально	-16%	20,3 кВт·год/кг
9. Фотоелектричні панелі на даху, потужність 15 kW	7%	не актуально	+3%	31,7 кВт·год/кг
10. Фотоелектричні панелі на даху, потужність 30 kW	15%	не актуально	+5%	31,7 кВт·год/кг
11. Біомасова теплова установка на оливкових кісточках та фотоелектричні панелі	70%	100%	-37%-87% ⁴	5,5 кВт·год/кг
12. Фотоелектричні панелі на даху та на фасаді	100%	не актуально	-71%	14,7 кВт·год/кг
13. Фотоелектричні панелі та вітряки	100%	не актуально	+10%	5,0 кВт·год/м ²
14. Промислові викиди	не актуально	100%	-93%	1,6 кВт·год/кг
15. Промислові викиди	не актуально	100%	-22%	0,4 кВт·год/кг

¹ Відносний потенціал заміщення ресурсу порівняно з початковими потребами

² Відносний потенціал зменшення викидів парникових газів (GHG, CO₂-екв) порівняно з базовим лінійним сценарієм

³ Загальне споживання енергії (електрика та тепло) системою на кг продукту або на м² на рік

⁴ Порівняно з іншими подібними дослідженнями з лінійною організацією системи

Таблиця В.3.

Основні характеристики циркулярних стратегій орієнтованих на потік поживних речовин

<i>Підхід</i>	<i>Циркулярна стратегія</i>	<i>Культура</i>	<i>Метод вирощування</i>	<i>Дж.</i>
<i>Зовнішній</i>	1. Струвіт із заводу очищення стічних вод	бобові	гідропоніка	[239]
	2. Суспензія з біогазового дигестату	базилік	гідропоніка	[110]
	3. Біодобрива від регіонального виробника біогазу	листова зелень	гідропоніка	[196]
	4. Добрива з відходів пивоваріння	листова зелень	гідропоніка	[196]
	5. Компостування твердих органічних муніципальних відходів	усі культури, що вирощуються в районі Барселони (бобові, фрукти, овочі, злаки)	гідропоніка	[243]
<i>Внутрішній</i>	6. Замкнута система відновлення поживних речовин + перероблені матеріал	бобові	гідропоніка	[200]
	7. Рециркуляція фільтрату	помідори	гідропоніка	[201]
	8. Рециркуляція фільтрату зі зменшеною подачею води	помідори	гідропоніка	[201]
	9. Рециркуляція фільтрату	помідори	гідропоніка	[202]
	10. Хімічне осадження	помідори	гідропоніка	[202]
	11. Мембранна фільтрація	помідори	гідропоніка	[202]
	12. Компостування органічних відходів	помідори	гідропоніка	[194]

Таблиця В.4.

Результати аналізу циркулярних стратегій орієнтованих на потік поживних речовин

<i>Циркулярна стратегія</i>	<i>N¹</i>	<i>P¹</i>	<i>K¹</i>	<i>Mg¹</i>	<i>Ca¹</i>	<i>S¹</i>	<i>GHG²</i>
1. Струвіт із заводу очищення стічних вод	NA	100%	NA	NA	NA	NA	<i>не вказано</i>
2. Суспензія з біогазового дигестату	100%	42%	29%	NA	NA	NA	-1,7%
3. Біодобрива від регіонального виробника біогазу	100%	55%	100%	36%	41%	53%	-2%
4. Добрива з відходів пивоваріння	100%	100%	100%	NA	NA	NA	-0,7%
5. Компостування твердих органічних муніципальних відходів	4%	38%	6%	NA	NA	NA	-130%
6. Замкнута система відновлення поживних речовин + перероблені матеріал	5%	20%	20%	15%	14%	28%	-19%
7. Рециркуляція фільтрату	39%	54%	34%	NA	NA	NA	-11%
8. Рециркуляція фільтрату зі зменшеною подачею води	33%	45%	28%	NA	NA	NA	-10%
9. Рециркуляція фільтрату	NA	25%	60%	54%	58%	NA	-52%
10. Хімічне осадження	NA	25%	3%	47%	9%	NA	+2%
11. Мембранна фільтрація	NA	25%	60%	54%	58%	NA	-49%
12. Компостування органічних відходів	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%	0,4%	NA	-12%

¹ Відносний потенціал заміщення ресурсу порівняно з початковими потребами:

N – азот (nitrogen)

P – фосфор (phosphorus)

K – калій (potassium)

Mg – магній (magnesium)

Ca – кальцій (calcium)

S – сульфур (sulfur)

² Відносний потенціал зменшення викидів парникових газів (GHG, CO₂-екв) порівняно з базовим лінійним сценарієм

NA (not applicable) – не актуально

Таблиця В.5.

Основні характеристики циркулярних стратегій орієнтованих на потік вуглекислого газу

<i>Циркулярна стратегія</i>	<i>Джерело CO₂</i>	<i>Культура</i>	<i>Дж.</i>
1. Компостування органічних відходів	компостування гною; харчові відходи з ресторанів; осад стічних вод	салат	[245]
2. Тепло та CO₂, отримані з промислових викидів	промислові об'єкти (наприклад, процес виробництва сталі)	конопля помідори	[199]
3. Органічні відходи рослин	анаеробне бродіння неїстівних твердих біо-відходів	салат, капуста, шпинат, морква, редис, помідори, перець, картопля, горох, полуниця	[193]

Таблиця В.6.

Результати аналізу циркулярних стратегій орієнтованих на потік вуглекислого газу

<i>Циркулярна стратегія</i>	<i>Заміщення CO₂¹</i>	<i>Еколог./економ. вигоди</i>	<i>Розрахункове значення</i>
1. Компостування органічних відходів	100%	від -74% до -52% зниження вартості ²	0,32-429,27 г CO ₂ /кг/день
2. Тепло та CO₂, отримані з промислових викидів	100%	-20% GHG помідори ³ -90% GHG конопля ³	<i>не вказано</i>
3. Органічні відходи рослин	75%	<i>не вказано</i>	0,1 м ³ CO ₂ /кг біо-відходів

¹ Відносний потенціал заміщення ресурсу порівняно з початковими потребам

² Відносний потенціал зниження вартості CO₂ порівняно з традиційним постачанням рідкого CO₂

³ Відносний потенціал зменшення викидів парникових газів (GHG, CO₂-екв) порівняно з базовим лінійним сценарієм

Таблиця В.7.

Основні параметри вертикальних ферм використаних в дослідженні

№ з/п	Назва ВФ	Заг. площа ¹	Врожайність	Площа вирощув. ²	Продуктивність ³	Спеціалізація	Літ.
1.	iFarm #1	351 м ²	3200 кг/місяць	712 м ²	4,5 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
2.	iFarm #2	421 м ²	3685 кг/місяць	1285 м ²	2,9 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
3.	iFarm #3	596 м ²	4800 кг/місяць	1492 м ²	3,2 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
4.	iFarm #4	648 м ²	2500 кг/місяць	993 м ²	2,5 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
5.	iFarm #5	1191 м ²	6300 кг/місяць	1873 м ²	3,4 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
6.	iFarm #6	1426 м ²	11373 кг/місяць	3833 м ²	3,0 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
7.	iFarm #7	2634 м ²	11000 кг/місяць	3596 м ²	3,1 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[300]
8.	Vertical Harvest	1040 м ²	3750 кг/місяць	1672 м ²	2,2 кг/м ² /місяць	листяна зелень трави	[301]
9.	VF Aspern	1561 м ²	<i>не вказано</i>	<i>не вказано</i>	<i>не вказано</i>	<i>не вказано</i>	[302]

¹ Загальна площа будівлі/усіх приміщень² Сумарна площа вирощування всіх поверхонь усіх модулів для вирощування³ Щомісячна врожайність на один квадратний метр площі вирощування

Таблиця В.8.

Перелік приміщень відповідно до встановлених функціональних зон
вертикальних ферм використаних в дослідженні

<i>Функц. зона</i>	<i>Специфікація приміщення</i>
Гол.Вир.	Приміщення вирощування
	Приміщення посіву
Пророщ.	Приміщення пророщування
	Склад насіння та матеріалів
Упр.Вир.	Кімната автоматизації систем
	Кімната змішування та підготовки поживного розчину
	Кімната управління іригацією
	Кімната управління системами вирощування
	Приміщення зберігання CO ₂
	Склад добрив
	Склад матеріалів
	Склад сировини
	Кімната попереднього охолодження продукції
	Приміщення відправки та розвантаження продукції
Пост-об.	Приміщення мийки
	Приміщення пакування продукції
	Приміщення пост-обробки продукції
	Приміщення сортування врожаю
	Приміщення сортування та попередньої підготовки
	Склад біо-відходів
	Склад матеріалів
	Приміщення тимчасового зберігання продукції
Збер.прод.	Склад готової продукції
	Склад матеріалів
	Холодильна камера
Тех.-інж.	Електрощитова кімната
	Зона розвантаження
	Кімната систем ОВК (HVAC)
	Приміщення зарядки акумуляторів
Сан.-поб.	Технічне приміщення
	Мийна контейнерів та допоміжного обладнання
	Підсобна кімната
	Санітарний пропускник
	Склад контейнерів та допоміжного обладнання
Перс.	Вбиральня
	Гардероб
	Душова кімната
	Кімната переговорів
	Кухня

	Офісне приміщення
	Приміщення для працівників
	Роздягальня
Звз.	Коридор
	Ліфтовий хол
	Сходова клітина
	Тамбур
	Хол
	Чистий коридор

Таблиця В.9.

Результати порівняльного аналізу закономірностей просторового розподілу у
вертикальних рослинницьких господарствах

Функц. зона	значення	% від заг. площі		m^2 на m^2 площі виращування		m^2 на тонну місячного врожаю	
Гол.Вир.	<i>середнє</i>	51%		0,27 m^2 / m^2		93,4 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	44%	65%	0,18 m^2 / m^2	0,40 m^2 / m^2	93,4 $m^2/т$	93,4 $m^2/т$
Пророщ.	<i>середнє</i>	6%		0,03 m^2 / m^2		9,0 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	1%	9%	0,00 m^2 / m^2	0,05 m^2 / m^2	1,9 $m^2/т$	18,8 $m^2/т$
Упр.Вир.	<i>середнє</i>	8%		0,04 m^2 / m^2		11,5 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	2%	13%	0,01 m^2 / m^2	0,06 m^2 / m^2	4,5 $m^2/т$	24,0 $m^2/т$
Пост-об.	<i>середнє</i>	7%		0,04 m^2 / m^2		13,6 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	3%	12%	0,01 m^2 / m^2	0,08 m^2 / m^2	4,0 $m^2/т$	30,8 $m^2/т$
Збер.прод.	<i>середнє</i>	4%		0,02 m^2 / m^2		7,6 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	1%	7%	0,01 m^2 / m^2	0,05 m^2 / m^2	2,9 $m^2/т$	18,0 $m^2/т$
Тех.-інж.	<i>середнє</i>	6%		0,03 m^2 / m^2		9,5 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	2%	13%	0,01 m^2 / m^2	0,08 m^2 / m^2	3,4 $m^2/т$	24,7 $m^2/т$
Сан.-поб.	<i>середнє</i>	3%		0,01 m^2 / m^2		4,3 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	0%	6%	0,00 m^2 / m^2	0,03 m^2 / m^2	0,0 $m^2/т$	9,8 $m^2/т$
Перс.	<i>середнє</i>	5%		0,03 m^2 / m^2		9,1 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	3%	8%	0,02 m^2 / m^2	0,04 m^2 / m^2	6,3 $m^2/т$	13,3 $m^2/т$
Звз.	<i>середнє</i>	11%		0,06 m^2 / m^2		21,8 $m^2/т$	
	<i>мін/макс</i>	6%	23%	0,02 m^2 / m^2	0,14 m^2 / m^2	6,8 $m^2/т$	62,4 $m^2/т$

Таблиця В.10.

Специфікація основного обладнання у вертикальних фермах

<i>Функц. зона</i>	<i>Специфікація основного обладнання</i>		
	<i>Основне вирощування</i>	<i>Допоміжні процеси</i>	
Гол.Вир.	<ul style="list-style-type: none"> - Багатоярусні модулі для вирощування - Світлодіодні системи освітлення - Системи зрошення та фертигації - Системи клімат-контролю (вентиляція, опалення, регуляція вологості) - Системи насичення вуглекислим газом - Датчики для моніторингу умов 	<ul style="list-style-type: none"> - Мобільні платформи та драбини - Візки для транспортування - Підйомно-транспортне обладнання - Датчики моніторингу та інтерфейси керування 	
Пророщ.	<i>Посів та підготовка</i>	<i>Пророщення та трансплантація</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> - Автоматизовані посівні машини - Насіннесховища (контейнери, стелажі та шафи) - Візки та контейнери для переміщення рослин 	<ul style="list-style-type: none"> - Камери для пророщування із системами контролю штучного середовища - Робочі станції для трансплантації - Візки та контейнери для переміщення рослин 	
Упр.Вир.	<i>Управління ресурсами</i>	<i>Автоматизація та контроль</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> - Резервуари та системи для змішування поживних речовин - Резервуари для зберігання поживних розчинів і води - Резервуар для зберігання CO₂ - Обладнання для моніторингу електрокондуктивності та рН розчину - Системи очищення та фільтрації води 	<ul style="list-style-type: none"> - Електронні та механічні системи керування штучним середовищем - Електронні та механічні системи керування та автоматизації розподілу ресурсів 	
Пост-об.	<i>Очищення та обробка</i>	<i>Пакування</i>	<i>Переміщення продукції</i>
	<ul style="list-style-type: none"> - Мийні машини та санітарно-гігієнічне обладнання - Стелажі для тимчасового зберігання продукції - Вагові станції 	<ul style="list-style-type: none"> - Пакувальне обладнання - Інфраструктура для зберігання пакувальних матеріалів - Станції контролю якості 	<ul style="list-style-type: none"> - Конвеєрні системи - Машинне обладнання та підйомники
Збер.прод.	<i>Зберігання продукції</i>	<i>Допоміжні процеси</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> - Промислові холодильні установки із системою клімат контролю - Стелажні системи 	<ul style="list-style-type: none"> - Інфраструктура для зберігання стелажів та піддонів - Машинне обладнання та підйомники для переміщення та завантаження 	

Специфікація основних конфігурації гідропонних систем

Гідропонні системи – системи безґрунтового вирощування рослин за допомогою спеціального поживного субстрату на водній або органічній основі (наприклад, вермикуліт, кокосове волокно або перліт) [142].



Рис. В.1 Приклади основних типів конструктивних конфігурацій гідропонного обладнання

Основні конструктивні конфігурації гідропонного обладнання (рис. В.1):

- 1) Роторна (горизонтально-циліндрична) система
- 2) Багатоярусна стелажна система
- 3) Пересувна (мобільна) багатоярусна стелажна система
- 4) Стовпова система (вертикальна вежа)
- 5) А-подібна система
- 6) Вертикально-трубна система
- 7) Горизонтально-трубна система

Додаток Г

Проміжні розрахунки

Математична модель розрахунку площі будівлі на основі технічних характеристик вертикальної рослинницької ферми

Вхідні дані:

1. Y – цільова виробнича потужність, річний/місячний врожай (наводиться у завданні на проектування);
2. S_M – площа сліду одного модуля для вирощування культури (наводиться у технічних характеристиках обладнання постачальником або виробником продукції);
3. Y_M – річна/місячна врожайність на один модуль (наводиться у технічних характеристиках обладнання постачальником або виробником продукції);
4. S_G – площа вирощування (з усіх ярусів та поверхонь) одного модуля (наводиться у технічних характеристиках обладнання постачальником або виробником продукції).

Константи:

1. k_M – коефіцієнт площі модулів у приміщеннях M.Cult, в середньому становить 0,45 (45%) з відхиленнями від 0,36 до 0,76 (36-76%).
2. k_S – коефіцієнт додаткових площ у співвідношенні до загальної площі вирощування (сумарна S_G усіх модулів), середнє значення 0,26 м²/м² з мінімумом-максимумом 0,08-0,52.

Вихідні дані та змінні:

1. N_M – загальна кількість модулів необхідна для цільової врожайності;
2. S_{TM} – загальна площа підлоги, яку займають усі модулі;
3. S_{MC} – площа приміщення основного вирощування Гол.Вир.;
4. S_{TG} – сумарна площа вирощування з усіх модулів;
5. S_S – загальна площа допоміжних приміщень будівлі (окрім Гол.Вир.);
6. S – загальна площа приміщень будівлі вертикальної ферми.

Відповідно, математичну модель пропонується розпочати з визначення необхідної кількості культиваційних модулів на основі цільової врожайності та відповідної характеристики одиниці обраного обладнання. Ця залежність виражається через рівняння (Д.1), де функція стелі обмежує результат до верхньої цілої частини числа, гарантуючи, що кількість модулів є достатньою для досягнення або перевищення виробничої мети:

$$N_M = \left\lceil \frac{Y}{Y_M} \right\rceil \quad (\Gamma.1)$$

На основі цього, визначається загальна площа підлоги S_{TM} , яку займають усі модулі, в залежності від площі сліду одного обладнання S_M та їх встановленої кількості N_M , що виражено у рівнянні (Г.2):

$$S_{TM} = S_M \times N_M \quad (\Gamma.2)$$

Перехід від площі усіх модулів до потрібної площі для приміщення основного вирощування S_{MC} включає застосування попередньо встановленого коефіцієнту k_M , що відображає практичне розташування устаткування і пов'язаного з ними буферного простору:

$$S_{MC} = \frac{S_{TM}}{k_M} \quad (\Gamma.3)$$

Відповідно, підставляючи попередні значення замість площі модулів S_{TM} , можливо отримати формулу (Г.4) для визначення площі Гол.Вир. (S_{MC}) у відношенні до вихідних даних проєкту:

$$S_{MC} = \frac{S_M}{k_M} \times \left\lceil \frac{Y}{Y_M} \right\rceil \quad (\Gamma.4)$$

Окрім цього, важливо також визначити сумарну площу вирощування з усіх модулів S_{TG} , яка використовується для визначення площі допоміжних приміщень. В свою чергу, вона визначається на основі площі вирощування з одного обладнання S_G та необхідної кількості даних модулів N_M :

$$S_{TG} = S_G \times N_M \quad (\Gamma.5)$$

Отже, виходячи з цього, застосовується співвідносний коефіцієнт k_s , який встановлює необхідну площу допоміжних приміщень S_s на один квадратний метр загальної площі вирощування S_{TG} :

$$S_s = S_{TG} \times k_s \quad (\Gamma.6)$$

Відповідно, рівняння (Г.7) для загальної площі будівлі S є сумою простору приміщень загально вирощування S_{MC} та допоміжних зон S_s :

$$S = S_{MC} + S_s \quad (\Gamma.7)$$

Підсумовуючи, ці взаємозв'язки можна об'єднати в комплексне рівняння, замінюючи показники S_{MC} та S_s на еквіваленти, що безпосередньо пов'язують їх із вихідними параметрами:

$$S = \left(\frac{S_M}{k_M} \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \right) + \left(S_G \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \times k_s \right) \quad (\Gamma.8)$$

Для попередніх розрахунків можливо застосувати середні значення коефіцієнтів, отримані з аналізу тематичних досліджень, тож, це рівняння можна спростити до:

$$S = \left(\frac{S_M}{0.45} \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \right) + \left(S_G \times \left[\frac{Y}{Y_M} \right] \times 0.26 \right) \quad (\Gamma.9)$$

Параметри розрахунків використані для моделювання взаємозв'язку технологічних та архітектурних характеристик вертикальної ферми

поз.	значення	роз'яснення	джерело/формула
Вхідні дані, константи			
Y	500000 кг/рік	цільова виробнича потужність, річний врожай	
Y_L	250 кг/рік	річний врожай на один ярус модуля	[289]
S_M	1,05 м ²	площа сліду одного модуля	[289]
h_L	0,35 м	висота між ярусами модуля (залежить від культури, для салату, зазвичай 30-40 см)	[289]
h_T	0,7 м	висота буферного простору зверху модуля (для систем вентиляції, освітлення і т.д.)	залежить від планувальних та конструктивних особливостей будівлі
h_B	0,35 м	висота буферного простору знизу модуля	залежить від конструкції модуля
h	3,3 м	висота супутніх приміщень ферми (санітарно-побутові, адмін., складські і т.д.), не Гол.Вир.	залежить від планувальних та конструктивних особливостей будівлі
k_S	0,26 м ² /м ²	коефіцієнт додаткових площ у співвідношенні до загальної площі вирощування	Розділ 4.2
k_M	0,45 (45%)	коефіцієнт площі модулів у приміщеннях Гол.Вир.	Розділ 4.2
Вхідні дані, змінні			
N_L	7-26 шт.	кількість ярусів на один модуль	
Вихідні дані			
S_G	7,4-27,3 м	площа вирощування (з усіх ярусів) одного модуля	$S_G = N_L \times S_M$
h_C	3,3-9,8 м	мінімальна необхідна висота основного приміщення вирощування Гол.Вир.	$h_C = [(N_L - 1) \times h_L] + h_T + h_B$
Y_M	1750-6500 кг/рік	річна врожайність на один модуль	$Y_M = N_L \times Y_L$
N_M	286-77 шт.	кількість модулів необхідна для забезпечення річної врожайності	$N_M = \left\lceil \frac{Y}{Y_M} \right\rceil$
S_{TM}	300-81 м ²	загальна площа сліду усіх модулів	$S_{TM} = N_M \times S_M$
S_{TG}	2102 м ²	сумарна площа вирощування з усіх модулів	$S_{TG} = N_M \times S_G$
S_S	550 м ²	загальна площа приміщень ферми (санітарно-побутові, адмін., складські і т.д.), не Гол.Вир.	$S_S = [S_{TG} \times k_S]$
S_{MC}	667-180 м ²	площа основного приміщення вирощування М.Сult	$S_{MC} = \frac{S_{TM}}{k_M}$
S	1217-730 м ²	загальна площа усіх приміщень будівлі	$S = S_{MC} + S_S$
V	4017-3576 м ³	загальний будівельний об'єм будівлі	$V = (S_{MC} \times h_{MC}) + (S_S \times h)$
Y_S	411-685 кг/м ² /рік	виробнича потужність ферми на один квадратний метр площі будівлі	$Y_S = \frac{Y}{S}$
Y_V	124-140 кг/м ³ /рік	виробнича потужність ферми на один кубічний метр об'єму будівлі	$Y_V = \frac{Y}{V}$

S_R	100-60%	відносне зменшення в загальній площі будівлі в порівнянні із 7-ми ярусним модулем	$S_R = \frac{S}{S_{[7]}} \times 100\%$
V_R	100-89%	відносне зменшення в загальному об'ємі будівлі в порівнянні із 7-ми ярусним модулем	$V_R = \frac{V}{V_{[7]}} \times 100\%$
Y_{SR}	100-167%	відносне покращення виробничої потужності ферми на один квадратний метр площі будівлі в порівнянні із 7-ми ярусним модулем	$Y_{SR} = \frac{Y_S}{Y_{S[7]}} \times 100\%$
Y_{VR}	100-112%	відносне покращення виробничої потужності ферми на один кубічний метр об'єму будівлі в порівнянні із 7-ми ярусним модулем	$Y_{VR} = \frac{Y_V}{Y_{V[7]}} \times 100\%$

Вихідні дані, отримані результати

N_L	S_G	h_C	Y_M	N_M	S_{TM}	S_{TG}	S_S	S_{MC}	S	V	Y_S	Y_V	S_R	V_R	Y_{SR}	Y_{VR}
7	7.4	3.3*	1750	286	300	2102	550	667	1217	4017	411	124	100	100.0	100	100
8	8.4	3.5	2000	250	263	2100	550	583	1133	3857	441	130	93	96.0	107	104
9	9.5	3.9	2250	223	234	2107	550	520	1070	3844	467	130	88	95.7	114	104
10	10.5	4.2	2500	200	210	2100	550	467	1017	3775	492	132	84	94.0	120	106
11	11.6	4.6	2750	182	191	2102	550	425	975	3768	513	133	80	93.8	125	107
12	12.6	4.9	3000	167	175	2104	550	390	940	3724	532	134	77	92.7	130	108
13	13.7	5.3	3250	154	162	2102	550	359	909	3719	550	134	75	92.6	134	108
14	14.7	5.6	3500	143	150	2102	550	334	884	3684	566	136	73	91.7	138	109
15	15.8	6.0	3750	134	141	2111	550	313	863	3691	580	135	71	91.9	141	109
16	16.8	6.3	4000	125	131	2100	550	292	842	3653	594	137	69	90.9	145	110
17	17.9	6.7	4250	118	124	2106	550	275	825	3660	606	137	68	91.1	147	110
18	18.9	7.0	4500	112	118	2117	550	261	811	3644	616	137	67	90.7	150	110
19	20.0	7.4	4750	106	111	2115	550	247	797	3645	627	137	65	90.7	153	110
20	21.0	7.7	5000	100	105	2100	550	233	783	3612	638	138	64	89.9	155	111
21	22.1	8.1	5250	96	101	2117	550	224	774	3629	646	138	64	90.3	157	111
22	23.1	8.4	5500	91	96	2102	550	212	762	3599	656	139	63	89.6	160	112
23	24.2	8.8	5750	87	91	2101	550	203	753	3601	664	139	62	89.6	162	112
24	25.2	9.1	6000	84	88	2117	550	196	746	3599	670	139	61	89.6	163	112
25	26.3	9.5	6250	80	84	2100	550	187	737	3588	679	139	61	89.3	165	112
26	27.3	9.8	6500	77	81	2102	550	180	730	3576	685	140	60	89.0	167	112
шт.	м ²	м	кг/рік	шт.	м ²	м ²	м ²	м ²	м ²	м ³	кг/м ³ /рік	кг/м ³ /рік	%	%	%	%

* – оригінальне розрахункове значення 3,2 м, але 3,3 м прийнято відповідно до висоти супутніх приміщень

Додаток Д

Акти впровадження результатів дослідження



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
 просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, тел. (044)241-55-80, факс (044) 248-32-65
 e-mail: knuba@knuba.edu.ua, web: http://www.knuba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070909

№ _____ На № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з навчально-методичної роботи Київського національного університету будівництва і архітектури, доктор економічних наук, професор

Шпаков А.В.

_____ 2024 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес
 Жданової Ярини Ігорівни**

Ми, декан архітектурного факультету, доктор технічних наук, професор Кащенко О.В., завідувач кафедри Теорії архітектури і архітектурного проектування, доктор архітектури, професор Ковальська Г.І., вчений секретар кафедри Теорії архітектури і архітектурного проектування, доцент, кандидат архітектури, Хараторська Ю.О., склали цей акт про те, що окремі наукові висновки та рекомендації дисертаційної роботи аспірантки кафедри Теорії архітектури і архітектурного проектування Жданової Ярини на тему «Архітектурно-планувальна організація вертикальних рослинницьких господарств», на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 191 «Архітектура та містобудування» були впроваджені в освітній процес Київського національного університету будівництва та архітектури на архітектурному факультеті на кафедрі Теорії архітектури і архітектурного проектування. У викладацькій діяльності для студентів 5 року навчання за спеціальністю 191 «Архітектура та містобудування»:

– у структурі лекційного спецкурсу «Методологія наукового дослідження в архітектурі» аспіранткою Ждановою Я. було проведено 19.10.2022 лекцію «Підготовчий етап наукового дослідження. Збір та систематизація інформації» в рамках Змістовного Модулю №1 «Методологія наукових досліджень в архітектурі», де було висвітлено основні положення щодо факторів і їх ролі в архітектурних вченнях, класифікації, як засобу упорядкування знань, прототипування та методу об'єктно-орієнтованого проектування на прикладі наукового дослідження вертикальних рослинницьких господарств;

– у структурі лекційного спецкурсу «Керівництво проектами в архітектурній діяльності» аспіранткою Ждановою Я. було проведено 21.08.2024 лекцію «Основні принципи ефективного керівництва проектами» в рамках Змістовного Модулю №1 «Основні теорії та алгоритми керівництва проектами в архітектурній діяльності», де було висвітлено особливості

збору та обробки інформації, підтримки функціональності проєкту та визначення основних кроків досягнення результату на основі організації проєкту вертикальної ферми; також у структурі цього курсу аспіранткою Ждановою Я. було проведено 11.09.2024 лекцію «Засоби підвищення якості архітектурних проєктних рішень» в рамках Змістовного Модулю №3 «Підвищення якості продукту архітектурної діяльності», де було висвітлено алгоритми аналізу якості проєктних рішень, засоби якості функціонально-планувальних структур та методики оцінки естетичної якості архітектурних об'єктів на прикладі будівель вертикальних господарств.

– у структурі лекційного спецкурсу «Тенденції розвитку архітектури будівель цивільного призначення» аспіранткою Ждановою Я. було проведено 13.09.2024 лекцію «Архітектура вертикальних ферм» в рамках Змістовного Модулю №1 «Зелена архітектура, її напрямки та прояви», де було висвітлено особливості сучасного розвитку вертикальних ферм, класифікацію та фактори, що впливають на їх формування, а також архітектурно-планувальну типологію та досвід проєктування вертикальних рослинницьких господарств;

Також результати дослідження було впроваджено під час керівництва над кваліфікаційними роботами на здобуття ступеня «бакалавр» та «магістр» за наступними темами:

– «Архітектурні принципи та прийоми архітектурно-планувальної організації вертикальних агропромислових комплексів», ст. АРХ-63а, Хоменко. А., 2022 р., керівники доц. Дорохіна Г., асп. Жданова Я., впроваджені принципи формування архітектурно-планувальної структури та основні типологічні параметри приміщень будівель вертикальних рослинницьких господарств;

– «Сміттєпереробний завод в м. Тальне», ст. АБС-20-3а, Красюк Ю., 2024 р.,

– «Гімназія з початковою школою в м. Миколаєві», ст. АБС-20-3а, Труш А., 2024 р., керівник асп. Жданова Я., було впроваджено об'єкти малої вертикальної ферми в архітектурне планування в межах громадського та освітнього простору, відповідно, а також надано параметри та рекомендації стосовно основних функціонально-планувальних вузлів такого типу агро-споруд.

Впроваджені результати дисертаційного дослідження сприяли набуттю теоретичних знань і практичних проєктних навичок студентів під час підготовки фахівців за спеціальністю 191 «Архітектура та містобудування».

Декан архітектурного факультету
доктор технічних наук, професор

 Олександр КАЩЕНКО

Завідувач кафедри Теорії архітектури
і архітектурного проєктування,
доктор архітектури, професор

 Гелена КОВАЛЬСЬКА

Вчений секретар кафедри Теорії архітектури
і архітектурного проєктування,
доцент, кандидат архітектури

 Юлія ХАРАБОРСЬКА

<p>LLC SCIENTIFIC LYCEUM / BOARDING SCHOOL "KLYM CHURYUMOV INTERNATIONAL GREEN SCHOOL"</p> <p>EDRPOU: 43141885 01021, Kyiv, Kniaziv Ostrozkykh Street, 29B, of. 16 Phone: +38 (067) 454-45-16 E-mail: info@cigs.com.ua</p>	 <p>Науковий Ліцей Чурюмова</p>	<p>НАУКОВИЙ ЛІЦЕЙ/ПАНСІОН "МІЖНАРОДНА ЗЕЛЕНА ШКОЛА ІМ. КЛИМА ЧУРЮМОВА"</p> <p>ЄДРПОУ: 43141885 01021, м.Київ, вул. Князів Острозьких, 29Б, оф.16 Тел.: +38 (067) 454-45-16 E-mail: info@cigs.com.ua</p>
--	--	---

№ 69 від 16.12.2024р.

АКТ про впровадження результатів дисертаційної роботи

Наукові та практичні рекомендації дисертаційної роботи Жданової Ярини на тему «Архітектурно-планувальна організація вертикальних рослинницьких господарств» були використані при розробці навчально-експериментального проєкту вертикальної ферми-теплиці у 2023/24 навчальному році в рамках практичної частини навчально-дослідницького курсу «Біотехнологічне стартаперство для школярів».

Основні положення науково-дослідної роботи Жданової Ярини були впроваджені для розробки та коригування архітектурних креслень вертикальної ферми-теплиці в пансіоні "Зелена Школа". Зокрема, під час роботи над цим проєктом запропоновано методи, принципи й прийоми щодо об'ємно-просторової структури, функціонально-планувальних рішень та розташування технологічного обладнання ферми.

Теоретичні положення дисертаційної роботи дозволили створити архітектурно-планувальну структуру об'єкта вертикального рослинницького господарства, який було реалізовано як навчально-практичний проєкт учнів Наукового ліцею/пансіону ім. Кліма Чурюмова.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради за місцем захисту дисертації.

**В.О. Директора Наукового ліцею
ім. Кліма Чурюмова**



**Катерина ЮСЬКОВА,
канд. біол.наук**

Громадська організація
«Фонд «Відкрита політика»
вул. Левандовська, 5а
м. Київ, Україна, 01010
Тел/Факс: +38 044 279 00 96
e-mail: openpolicy.org.ua@gmail.com
website: openpolicy.org.ua



GREEN
STREAM
HUB

NGO
«Open Policy Foundation»
5a, Levandovska St.,
Kyiv, Ukraine, 01010
Tel/Fax: +38 044 279 00 96
e-mail: openpolicy.org.ua@gmail.com
website: openpolicy.org.ua

Вих. № 38 від 13.12.2024р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Жданової Ярини на тему «Архітектурно-планувальна організація вертикальних
рослинницьких господарств»

Цим актом ми засвідчуємо, що результати дисертаційного дослідження Жданової Ярини на тему «Архітектурно-планувальна організація вертикальних рослинницьких господарств» були використані у підготовці та розробці проекту-прототипу «Вертикальна ферма у бомбосховищі» у вересні 2023 р. – травні 2024 р. в рамках гуртків з біології, технології та інженерії для учнів 5–8 класів на базі освітнього хабу «GREEN STREAM» ГО «Фонд “Відкрита політика”».

Впровадження результатів дисертаційного дослідження відбулося наступним чином:

1. Ждановою Яриною було підготовлено та проведено 19.04.2023 відкриту лекцію “Вертикальні ферми. Що це таке та як вони можуть вирішити глобальні проблеми?”, де було висвітлено положення щодо основних етапів формування вертикальних ферм, їх значення у вирішенні глобальних проблем людства, аналізу міжнародного та українського досвіду проектування даних об'єктів, ролі архітектурних та трансдисциплінарних досліджень в розробці вертикальних ферм, а також щодо особливостей їх архітектурно-функціональної структури та технологічного обладнання.
2. На основі цієї лекції та під керівництвом Жданової Ярини учнями та викладачами освітнього хабу «GREEN STREAM» було реалізовано прототипний експериментальний проєкт «Вертикальна ферма у бомбосховищі». Проєкт передбачав розробку та облаштування гідропонної системи для вирощування суніці та декоративного перцю у бомбосховищі — приміщенні освітнього хабу.

Теоретичні положення та напрацювання дисертаційної роботи було впроваджено у навчально-дослідницькі програми освітнього хабу “GREEN STREAM”, а також сприяли успішному практичному впровадженню пілотного проєкту вертикальної ферми у бомбосховищі.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради за місцем захисту дисертації.

Заступниця виконавчого директора
ГО “Фонд “Відкрита політика”



Марія СИДОРЧЕНКО

University of Vic - Central
 University of Catalonia
BETA Technological Center
Futurlab - Can Baumann
Ctra de Roda 70.
08500 Vic
 Tel. +34 93 881 61 68
 info.beta@uvic.cat

ACT on Implementation of Scientific Research Results in the Educational Process

This Act certifies that the results of the doctoral dissertation titled "*Architectural and Space-Planning Design of Vertical Plant Farms*", conducted by **Yaryna Zhdanova**, a doctoral student under the double supervision agreement signed at Vic on 7 June 2022 between the **University of Vic - Central University of Catalonia, BETA Technological Center** (Vic, Spain) and **Kyiv National University of Construction and Architecture, Department of Theories of Architecture and Architectural Planning** (Kyiv, Ukraine), have been formally implemented in the educational process.

The implementation was executed within the framework of the specialized educational course for doctoral-level students and researchers of the BETA Technological Center, entitled "*Seminar Sessions for Predoc Researchers & Additional Training Activities*". On 18 March 2024, during Seminar Session III, doctoral candidate Y. Zhdanova prepared and delivered a lecture titled "*Efficient and Sustainable Vertical Farms: Life Cycle Assessment of Various Vertical Farming Scenarios*".

By presenting conceptual foundations, illustrating methodological approaches, and demonstrating the practical application of Life Cycle Assessment (LCA) in vertical farming context, Y. Zhdanova not only enhanced the academic and professional competencies of the participating doctoral researchers, but also fostered interdisciplinary discussions on the integration of agriculture, architecture, and sustainability within the field of food technologies.

The results of the dissertation research contributed to the acquisition of theoretical knowledge and practical skills by doctoral researchers in the fields of biodiversity, ecology, environmental and food technology, as well as to the development of a well-grounded methodological framework for the educational process in training professionals in these fields.

PONSA SALAS
 SERGIO - 47682037R

Firmado digitalmente por PONSA
 SALAS SERGIO - 47682037R
 Fecha: 2024.12.18 11:40:53
 +01'00'

Sergio Ponsá Salas
 Director of BETA Technological Center
 PhD in Environmental Science and Technology

Vic, 18 December 2024

Додаток Е

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Дорохіна, Г., **Жданова, Я.** Принципи економічної ефективності архітектурно-просторової організації вертикальних ферм. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2023. № 66. С. 135–149. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.66.135-149>. (фахове видання України категорії «Б»)

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації і участь у формулюванні основних висновків щодо принципів і прийомів економічно ефективного архітектурного проєктування вертикальних ферм.

2. **Жданова, Я.**, Дорохіна, Г. Принципи цілісності та гармонізації архітектурно-просторових рішень вертикальних ферм. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2024. № 68. С. 215–227. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.215-227>. (фахове видання України категорії «Б»)

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації, а також участь у формулюванні висновків щодо принципів і прийомів створення цілісної та гармонійної архітектури вертикальних ферм.

3. **Жданова Я.** Архітектурні та функціональні особливості вертикальних ферм в Україні. Просторовий розвиток. 2024. № 10. С. 83–93. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.83-93>. (фахове видання України категорії «Б»)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Дорохіна Г., **Жданова Я.** Архітектурна класифікація вертикальних агрокомплексів за способом кооперування. European scientific discussions. Rome, Italy, 2021. С. 87–93. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-european-scientific-discussions-15-17-avgusta-2021-goda-rim-italiya-arhiv/>.

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації, систематизація основних типів вертикальних агрокомплексів та участь у розробці висновків щодо особливостей їх класифікації за способом кооперування.

5. Дорохіна Г., **Жданова Я.** Фактори, що впливають на формування структури вертикальних агропромислових комплексів. Science, innovations and education: problems and prospects. Tokyo, Japan, 2021. С. 225–230. URL: <https://sci-conf.com.ua/i-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-18-20-avgusta-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>.

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз та обробка інформації, систематизація основних факторів та участь у розробці висновків щодо особливостей впливу факторів на формування структури вертикальних агропромислових комплексів.

6. **Жданова Я.**, Дорохіна Г. Глобальні проблеми сучасності та архітектури. Вплив урбанізації та перенаселення на формування вертикальних ферм. Філософія науки, техніки, архітектури в гуманістичному вимірі. Київ: КНУБА, 2021. С. 138-139. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/692>.

Особистий внесок здобувача: збір, аналіз, обробка інформації та статистичних даних щодо рівня урбанізації і пов'язаних агропромислових питань, участь у розробці висновків щодо визначення впливу глобальних проблем людства на формування вертикальних ферм.

7. **Жданова Я.**, Дорохіна Г. Історичні передумови та особливості розвитку вертикальних ферм в Україні. Сучасна архітектурна освіта. Етнологічні засади української архітектури. Київ: КНУБА, 2021. С. 38-41. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/51>.

8. **Жданова Я.** Особливості використання відновлюваних джерел енергії при проектуванні вертикальних ферм. Енергоощадні машини і технології. Київ: КНУБА, 2022. С. 126-129. URL: <https://library.knuba.edu.ua/node/642>.

9. **Жданова Я.** Архітектурне проектування вертикальних ферм: актуальні питання та виклики. Студентська молодь і науковий прогрес. Львів:

ЛНУП, 2023. С. 527. URL: <https://lnup.edu.ua/en/naukdij/naukove-tovarystvo-studentiv-aspirantiv-doktorantiv-ta-molodykh-vchenykh/5949-newsnauk231012>.

10. **Жданова Я.** Вплив технологічного процесу виробництва у вертикальних фермах на архітектурні особливості об'єкту. Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій. Львів: ЛНУП, 2023. С. 530-532. URL: <https://lnup.edu.ua/en/naukdij/5890-newsnauk231003>.

11. **Жданова Я.** Проблематика розвитку та архітектурного проектування вертикальних ферм в Україні. Інновації в архітектурі, дизайні та мистецтві: до 100-річчя факультету архітектури НАОМА. Київ: НАОМА, 2024. С. 61-63. URL: <https://dub.sh/WPdnwYi>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

12. **Жданова Я.** Вплив забезпечення автономності вертикальних агропромислових комплексів на архітектурно-планувальні рішення. Науково-практична конференція "Прогностичні напрямки розвитку сучасної архітектури". Київ: КНУБА, 2021.

13. **Жданова Я.** Сучасні тенденції розвитку та архітектурні особливості вертикальних ферм. Друга науково-практична конференція "Прогностичні напрямки розвитку сучасної архітектури". Київ: КНУБА, 2023.

14. **Жданова Я.** Типологічні основи та сучасні приклади різноманітної функціональної інтеграції у вертикальних рослинницьких фермах. Третя науково-практична конференція "Прогностичні напрямки розвитку сучасної архітектури". Київ: КНУБА, 2024.

Додаток Ж

Сертифікати участі у конференціях та конкурсах аспірантських робіт





Київський національний університет будівництва і архітектури
Архітектурний факультет
Кафедра Теорії архітектури і архітектурного проектування



СЕРТИФІКАТ

учасника
третьої науково-практичної конференції

«ПРОГНОСТИЧНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СУЧАСНОЇ АРХІТЕКТУРИ»

10 КВІТНЯ 2024

видано: *Ярині ЖДАНОВІЇ*

тема доповіді: «Типологічні основи та сучасні приклади різноманітної функціональної інтеграції у вертикальних рослинницьких фермах».

Зав.каф. ТА і АП

д.арх., проф.

Ковальська Г.Л.

U UNIVERSITAT DE VIC
UNIVERSITAT CENTRAL DE CATALUNYA

U ESCOLA
DE DOCTORAT
UVIC-UCC

Marta Otero Viñas, com a Directora de l'Escola de Doctorat, faig constar que
Marta Otero Viñas, como Directora de la Escuela de Doctorado, hago constar que
Marta Otero Viñas, as a Head of the Doctoral College, notes that

YARYNA ZHDANOVA

ha participat al — ha participado en el — took part in the

7è CONCURS — 7 ° CONCURSO — 7 th CONTEST
LA TEVA TESI EN 4 MINUTS — TU TESIS EN 4 MINUTOS — YOUR THESIS IN 4 MINUTES

que ha tingut lloc el dia 17 de maig de 2024, i organitzat per l'Escola de Doctorat de la UVic – UCC
que tuvo lugar el día 17 de mayo de 2024, y organizado por la Escuela de Doctorado de la UVic – UCC
held on May 17th of 2024, and organized by the Doctoral Office of the UVic – UCC

amb la presentació titulada — con la presentación titulada — with a presentation entitled

Enhancing vertical farms' feasibility: an integrated approach to architecture and environmental technologies

I, perquè consti i tingui els efectes oportuns, signo aquest certificat
Y, para que conste y surta los efectos oportunos, firmo este certificado — In witness whereof, I hereby sign this certificate

Vic, 17 de maig de 2024— Vic, 17 de mayo de 2024— Vic, May 17th, 2024



CERTIFICATE

*І чужому научайтесь,
Й свого не цурайтесь.
Т. Г. Шевченко,*

PhD Thesis Presentation Contest

2nd Prize
was awarded to

Yaryna Zhdanova
as jointly decided by the Jury members.

The President
of the German-Ukrainian
Academic Society

The Head
of the Contest Coordination
Committee

28st of September 2023
Essen, Germany

Додаток И

Джерела ілюстрацій

Джерела ілюстрацій до першого розділу

Рис. 1.1.1

1. World Urbanization Prospects The 2018 Revision.
2. 4 UN DESA: United Nations Department of Economic and Social Affairs, World population projected to reach 9.6 billion by 2050. UN Dep. Econ. Soc. Aff. (2013)
3. Share of land area used for arable agriculture, <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-land-area-used-for-arable-agriculture>
4. Contribution to global mean surface temperature rise from agriculture and land use, <https://ourworldindata.org/grapher/global-warming-land>
5. Agricultural water withdrawals, <https://ourworldindata.org/grapher/agricultural-water-withdrawals>
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Production / Crops and livestock products, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, (2023)
7. Vegetable consumption per capita, <https://ourworldindata.org/grapher/vegetable-consumption-per-capita>
8. Fruit consumption per capita, <https://ourworldindata.org/grapher/fruit-consumption-per-capita>

Рис. 1.1.2

1. Kozai, T., Niu, G., Takagaki, M.: Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production: Second edition. (2019)

Рис. 1.1.3

1. Barbosa, G., Gadelha, F., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G., Halden, R.: Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. Int. J. Environ. Res. Public Health. 12, 6879–6891 (2015). <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>

2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Production / Crops and livestock products, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, (2023)
3. Grow Leafy Greens and Salads with Vertical Farming Technologies by iFarm, <https://ifarm.fi/technologies/ifarm-leafy-greens>
4. Grow Strawberries with Vertical Farming Technologies by iFarm, <https://ifarm.fi/technologies/ifarm-berries>
5. Grow Veggies with Vertical Farming Technologies by iFarm, https://ifarm.fi/technologies/ifarm_veggies
6. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y.: The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, <https://hess.copernicus.org/preprints/8/763/2011/hessd-8-763-2011.pdf>, (2011)
7. Singh, M.C., Singh, G.K., Singh, J.P.: Nutrient and Water Use Efficiency of Cucumbers Grown in Soilless Media under a Naturally Ventilated Greenhouse. *J. Agric. Sci. Technol.* 21, 193–207 (2019)
8. Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., Cesco, S.: Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a Smart Agriculture Perspective. *Front. Plant Sci.* 10, (2019). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>

Рис. 1.2.1

1. Вертикальні ферми в Україні: скільки це коштує та як організувати tech-господарство вдома, <https://www.epravda.com.ua/publications/2020/08/27/664413/>
2. Павленко, В.: Вертикальна ферма, або Як виростити 600 кг салату без землі та пестицидів? Кейс успішного родинного бізнесу з Вінниці, <https://shotam.info/bez-zemli-ta-pestytsydiv-u-vinnytsi-pratsiuie-unikalna-vertykalna-ferma-shcho-daie-600-kh-vrozhaiu-shchomisiatsia-foto/>, (2023)
3. EastFruit: Вертикальна ферма у бомбосховищі: як українська компанія вирощує свіжу зелень • EastFruit, <https://east-fruit.com/uk/plodoovochevyi-biznes/tekhnologii-uk/vertykalna-ferma-u-bomboskhovyshchi-yak-ukrayinska-kompaniya-vyroshchuye-svizhu-zelen/>

4. Green honeycomb - a project for growing plants anywhere, <https://gwecosystem.com/en/unique-business/>

5. Жданова Я. І. Архітектурні та функціональні особливості вертикальних ферм в Україні. Просторовий розвиток. 2024. № 10. С. 83–93. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.83-93>.

Рис. 1.2.2

1. Вертикальні ферми в Україні: скільки це коштує та як організувати tech-господарство вдома, <https://www.epravda.com.ua/publications/2020/08/27/664413/>

2. Павленко, В.: Вертикальна ферма, або Як виростити 600 кг салату без землі та пестицидів? Кейс успішного родинного бізнесу з Вінниці, <https://shotam.info/bez-zemli-ta-pestytsydiv-u-vinnytsi-pratsiuie-unikalna-vertykalna-ferma-shcho-daie-600-kh-vrozhaiu-shchomisiatsia-foto/>, (2023)

3. EastFruit: Вертикальна ферма у бомбосховищі: як українська компанія вирощує свіжу зелень • EastFruit, <https://east-fruit.com/uk/plodoovochevyi-biznes/tekhnologii-uk/vertykalna-ferma-u-bomboskhovyshchi-yak-ukrayinska-kompaniya-vyroshchuye-svizhu-zelen/>

4. Жданова Я. І. Архітектурні та функціональні особливості вертикальних ферм в Україні. Просторовий розвиток. 2024. № 10. С. 83–93. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.83-93>.

Рис. 1.2.3

1. Ferme Darwin Proposal / SOA + holdUP | ArchDaily, <https://www.archdaily.com/290148/ferme-darwin-proposal-soa-holdup>

2. Architectes, S.O.A.: La Ferme Musicale – SOA Architectes, <https://www.soa-architectes.fr/fr/urbanisme-agricole/article/la-ferme-musical/>

Рис. 1.2.4

1. The Green House, <https://www.cepezed.nl/en/project/the-green-house/22172/>

2. The Green House / architectenbureau cepezed, <https://www.archdaily.com/915728/the-green-house-architectenbureau-cepezed>

Рис. 1.2.5

1. Vertical Farm Beijing / van Bergen Kolpa architects | ArchDaily, <https://www.archdaily.com/1014197/vertical-farm-beijing-van-bergen-kolpa-architects>
2. Vertical Farm Beijing, <https://www.vanbergenkolpa.nl/#vertical-farm-beijing>

Рис. 1.2.6

1. Vertical Harvest | METALOCUS, <https://www.metalocus.es/en/news/vertical-harvest>
2. designboom, danny hudson I.: vertical harvest urban farm by e/ye design under construction, <https://www.designboom.com/architecture/eye-design-vertical-harvest-in-jackson-2-28-2015/>

Рис. 1.2.7

1. VBK: set in belgium, agrotopia is europe's largest research center for urban horticulture, <https://www.designboom.com/architecture/rooftop-greenhouse-agrotopia-urban-horticulture-belgium-02-02-2022/>
2. Pertry, I., Bleyaert, P., Demyttenaere, P., Demeulemeester, M.: Agrotopia, a living lab for high-tech urban horticulture within Europe. In: Orsini F., Gianquinto G.P., Pennisi G., Cremonini L., and Georgiadis T. (eds.) Acta Hortic. pp. 153–158. International Society for Horticultural Science (2018)
3. Rooftop Greenhouse Agrotopia, <https://www.vanbergenkolpa.nl/#dakserre-agrotopia-roeselare>

Рис. 1.3.1

1. Добровенко, Д.В.: Доцільність формування структури вертикальних агропромислових комплексів в Україні. (2014)
2. Розораність землі в Україні найвища в Європі: названо шляхи вирішення проблеми, <https://superagronom.com/news/14738-u-naan-nazvali-optimalni-shlyahi-znijennya-pokaznika-rozoranosti-ukrayinskih-zemel>
3. World Urbanization Prospects The 2018 Revision.
4. UN DESA: United Nations Department of Economic and Social Affairs, World population projected to reach 9.6 billion by 2050. UN Dep. Econ. Soc. Aff. (2013)

5. Понад 5 мільйонів гектарів земель в Україні не можна обробляти через війну, <https://www.epravda.com.ua/news/2023/03/3/697637/>

6. nmj-editor: Про відновлення агросектору України в післявоєнний час, <https://egritech.org/uk/agrobiznes-uk/pro-vidnovlennya-agrosektoru-ukrayiny-v-pislyavoyennyj-chas/>, (2023)

7. Yohannes, H.: A Review on Relationship between Climate Change and Agriculture. J. Earth Sci. Clim. Change. 07, (2015). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000335>

8. Zalidis, G., Stamatiadis, S., Takavakoglou, V., Eskridge, K., Misopolinos, N.: Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. Agric. Ecosyst. Environ. 88, 137–146 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00249-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00249-3)

9. Folnović, T.: Soil Degradation, <https://www.agrivi.com/blog/soil-degradation/>, (2015)

Рис. 1.3.2

1. Жданова, Я.: Архітектурно-планувальна організація поліфункціональних вертикальних агрокомплексів, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26188.54408/1>, (2021)

2. Добровенко Д. В. Класифікація основних видів вертикальних агропромислових комплексів. Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. Зб.; відп. ред. М. М. Осетрін. – Київ : КНУБА, 2014. – Вип. 52. – С. 105-112.

Рис. 1.3.3

1. Дорохіна, Г., Жданова, Я.: Архітектурна класифікація вертикальних агрокомплексів за способом кооперування. In: Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. pp. 87–93. Potere della ragione Editore, Rome, Italy (2021)

2. Жданова, Я.: Архітектурно-планувальна організація поліфункціональних вертикальних агрокомплексів, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26188.54408/1>, (2021)

Джерела ілюстрацій до другого розділу

Рис. 2.1.1

1. Лаврик, Г.І.: Основи системного аналізу в архітектурних дослідженнях і проектуванні. КНУБА, Українська академія архітектури., Київ (2002)
2. Чмиленко, Ф.О., Жук, Л.П.: Посібник до вивчення дисципліни «Методологія та організація наукових досліджень». РВВ ДНУ, Дніпропетровськ (2014)

Рис. 2.1.2

1. Лаврик, Г.І.: Основи системного аналізу в архітектурних дослідженнях і проектуванні. КНУБА, Українська академія архітектури., Київ (2002)
2. Дорохіна, Г.: Архітектурно-планувальна організація фізкультурно-оздоровчих закладів для людей з обмеженими фізичними можливостями, (2013)
3. Коваленко, І.: Вступ до системного аналізу. МДГУ ім. Петра Могили, Миколаїв (2004)

Рис. 2.2.1

1. Дорохіна, Г., Жданова, Я. Принципи економічної ефективності архітектурно-просторової організації вертикальних ферм. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2023. № 66. С.135–149. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.66.135-149>.
2. Adey, S.W., Beer, S.: Cybernetics and Management. OR. 11, (1960). <https://doi.org/10.2307/3007077>
3. П.І. Барановська Ю.Н. Казанський А.Ф. Ключев, Л.А.К.І.М.Л.Ю.П.П.: Економіка будівництва. (2003)
4. Santos, R., Costa, A.A., Silvestre, J.D., Pyl, L.: Integration of LCA and LCC analysis within a BIM-based environment. Autom. Constr. 103, 127–149 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.011>
5. Яблонська, Г.Д.: Економіка архітектурного проектування і кваліметрія: конспект лекцій, (2009)

6. Building Engineering – ANA Design Studio Pvt. Ltd. – Intelligent & Smart Building Technology, <https://ana-design.com/building-engineering-service-mechanical-electrical-plumbing-ana-design-studio-pvt-ltd/>

7. ReGen Villages, <https://www.efeekt.dk/regenvillages>

8. Жданова, Я.: Архітектурно-планувальна організація поліфункціональних вертикальних агрокомплексів, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26188.54408/1>, (2021)

Рис. 2.3.1

1. Жданова, Я., Дорохіна, Г. Принципи цілісності та гармонізації архітектурно-просторових рішень вертикальних ферм. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2024. № 68. С. 215–227. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.215-227>.

2. abf -lab: ABF lab guides food farm tower in romainville, france towards the sun, <https://www.designboom.com/architecture/abf-lab-food-farm-tower-france-02-17-2016/>

3. AeroFarm Newark Vertical Farm | Inhabitat – Green Design, Innovation, Architecture, Green Building, <https://inhabitat.com/worlds-largest-indoor-vertical-farm-will-produce-2-million-pounds-of-soil-free-food-in-newark/market-893rendered/>

4. Architecture news and projects | Dezeen, <https://www.dezeen.com/architecture/page/488/?msclkid=ea0eff76bb1811ec8dd0434f7becc3a0>

5. Bedrock to partner with vertical farm to produce food for Detroiters, <https://www.crainsdetroit.com/real-estate/bedrock-vertical-harvest-partner-detroit-farm>

6. Cultivo de tomates en interior Aeroponic Instalación hidropónica para cultivo de plantas Tomates en interior Plántulas con riego automático e iluminación plantación casera | Foto Premium, https://www.freepik.es/fotos-premium/cultivo-tomates-interior-aeroponic-instalacion-hidroponica-cultivo-plantas-tomates-interior-plantulas-riego-automatico-e-iluminacion-plantacion-casera_25838776.htm

7. DRAGONFLY – Vincent Callebaut Architectures, https://vincent.callebaut.org/object/090429_dragonfly/dragonfly/projects

8. green leaf lettuce in the garden, <https://www.istockphoto.com/es/foto/lechuga-de-hojas-sueltas-gm149213880-9521087>
9. Green Pear Leaf Texture Stock Photo 172209860, <https://www.shutterstock.com/image-photo/green-pear-leaf-texture-172209860>
10. Harvest Green Project / Romses Architects, <https://www.archdaily.com/21555/harvest-green-project-romses-architects>
11. Hojas Macro Primer Plano Clorofila Verde Naturaleza Textura Fondo | Foto Premium, https://www.freepik.es/fotos-premium/hojas-macro-primer-plano-clorofila-verde-naturaleza-textura-fondo_27975499.htm
12. Imagen de una planta que crece en suelo fértil on Craiyon, <https://www.craiyon.com/image/DnovAHVaTBm7MNek4GfHWw>
13. Romainville | Tag | ArchDaily, <https://www.archdaily.com/tag/romainville>
14. Stefano Boeri Architetti Combines Architecture, Agriculture, and Aesthetics in Newly Unveiled Project | ArchDaily, <https://www.archdaily.com/968665/stefano-boeri-architetti-combines-architecture-agriculture-and-aesthetics-in-newly-unveiled-project>
15. Vertical Farm Eden, <https://www.raiz.farm/en/vertical-farm-eden>
16. Vertical Harvest to Open Facility at Milkwaukee Junction, Detroit, <https://www.skillhood.com/vertical-harvest-open-facility-milwaukee-junction-detroit/>
17. Wind Impact Assessments Terms of Reference | City of Edmonton, https://www.edmonton.ca/city_government/urban_planning_and_design/wind-study-terms-of-reference

Рис. 2.3.2

1. Attia, S.: Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. QScience Connect. 2017, (2018). <https://doi.org/10.5339/connect.2017.qgbc.6>

Джерела ілюстрацій до третього розділу

Рис. 3.1.1

1. Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H., Wang, X.: A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems. J. Clean. Prod. 268, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.12192>

Рис. 3.2.1

1. Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H., Wang, X.: A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems. *J. Clean. Prod.* 268, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.12192>

Рис. 3.2.2

1. Teo, Y.L., Go, Y.I.: Techno-economic-environmental analysis of solar/hybrid/storage for vertical farming system: A case study, Malaysia. *Renew. Energy Focus.* 37, 50–67 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.02.005>

2. Center for Urban Agriculture, <https://mithun.com/project/center-for-urban-agriculture/>

3. Admin: Future of Building-integrated photovoltaics (BIPV), <https://wfmmedia.com/future-of-bipv/>, (2017)

Рис. 3.2.3

1. Martin, M., Weidner, T., Gullström, C.: Estimating the Potential of Building Integration and Regional Synergies to Improve the Environmental Performance of Urban Vertical Farming. *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 849304 (2022). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.849304>

2. Teo, Y.L., Go, Y.I.: Techno-economic-environmental analysis of solar/hybrid/storage for vertical farming system: A case study, Malaysia. *Renew. Energy Focus.* 37, 50–67 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.02.005>

3. Center for Urban Agriculture, <https://mithun.com/project/center-for-urban-agriculture/>

4. Admin: Future of Building-integrated photovoltaics (BIPV), <https://wfmmedia.com/future-of-bipv/>, (2017)

Рис. 3.2.4

1. Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R.M., Van Den Dobbelen, A.A.J.F.: The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *J. Clean. Prod.* 377, 134443 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443>

Рис. 3.2.5

1. <https://www.brilo.cz>, B.-: Úvod, <https://www.atmos.eu/en/>

Рис. 3.2.6

1. Martin, M., Poulíkidou, S., Molin, E.: Exploring the Environmental Performance of Urban Symbiosis for Vertical Hydroponic Farming. *Sustainability*. 11, 6724 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11236724>

2. Concept WRRF Yixing Water Resource Recovery Facility / THAD SUP Atelier, <https://www.archdaily.com/1010818/concept-wrrf-yixing-thad-sup-atelier>

3. MagPrex™: Q&A with Gerhard Forstner, <https://www.centrisys-cnp.com/magprex-struvite-removal-guide>

4. New Belgium Brewing East Coast Brewery / Perkins+Will | ArchDaily, https://www.archdaily.com/899697/new-belgium-brewing-east-coast-brewery-perkins-plus-will?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

5. Powerbarn Bioenergy Production Plant / Giovanni Vaccarini Architetti, <https://www.archdaily.com/933025/powerbarn-bioenergy-production-plant-giovanni-vaccarini-architetti>

6. Nikam, K.N., Nikam, N.V.: Hydroponic design horizons: transforming urban landscapes for sustainable agriculture in the Indian context. *Cities Health*. 0, 1–14. <https://doi.org/10.1080/23748834.2024.2393476>

Рис. 3.2.7

1. Graber, A., Antenen, N., Junge, R.: The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. Presented at the Conference VIVUS: Transmission of Innovations, Knowledge and Practical Experience into Everyday Practice, Slovenia November 14 (2014)

2. Carreras-Sempere, M., Caceres, R., Viñas, M., Biel, C.: Use of Recovered Struvite and Ammonium Nitrate in Fertigation in Tomato (*Lycopersicon esculentum*) Production for boosting Circular and Sustainable Horticulture. *Agriculture*. 11, 1063 (2021). <https://doi.org/10.3390/agriculture11111063>

Рис. 3.2.8

1. Lee, A., Enthoven, N., Kaarsemaker, R.: Best Practice Guidelines for Greenhouse Water Management. ROCKWOOL B.V., GRODAN, Priva Holding B.V., Priva (2016)

Рис. 3.2.9

1. Hidaka, K., Nakahara, S., Yasutake, D., Zhang, Y., Okayasu, T., Dan, K., Kitano, M., Sone, K.: Crop-local CO₂ enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations. *Sci. Hortic.* 301, 111104 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111104>

Рис. 3.2.10

1. Zeidler, C., Schubert, D., Vrakking, V.: Vertical Farm 2.0: Designing an Economically Feasible Vertical Farm - A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture. *Vert. Farming.* (2017)

Рис. 3.3.1

1. Zeidler, C., Schubert, D., Vrakking, V.: Vertical Farm 2.0: Designing an Economically Feasible Vertical Farm - A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture. *Vert. Farming.* (2017)

2. Жданова, Я.: Особливості використання відновлюваних джерел енергії при проектуванні вертикальних ферм. In: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. КНУБА, Київ (2022)

Рис. 3.3.2

1. Arcas-Pilz, V., Ruffi-Salís, M., Parada, F., Petit-Boix, A., Gabarrell, X., Villalba, G.: Recovered phosphorus for a more resilient urban agriculture: Assessment of the fertilizer potential of struvite in hydroponics. *Sci. Total Environ.* 799, 149424 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149424>

2. Arosemena Polo, J.D., Toboso-Chavero, S., Adhikari, B., Villalba, G.: Closing the nutrient cycle in urban areas: The use of municipal solid waste in peri-urban and urban

- agriculture. *Waste Manag.* 183, 220–231 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.009>
3. Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R.M., Van Den Dobbelsteen, A.A.J.F.: The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *J. Clean. Prod.* 377, 134443 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443>
4. Danevad, D., Carlos-Pinedo, S.: Exploring Interactions Between Fruit and Vegetable Production in a Greenhouse and an Anaerobic Digestion Plant—Environmental Implications. *Front. Sustain.* 2, 770296 (2021).
<https://doi.org/10.3389/frsus.2021.770296>
5. Gargaro, M., Hastings, A., Murphy, R.J., Harris, Z.M.: A cradle-to-customer life cycle assessment case study of UK vertical farming. *J. Clean. Prod.* 470, 143324 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143324>
6. J. McDonald, L., S.S. Pinto, A., Naveed Arshad, M., L. Rowe, R., Donnison, I., McManus, M.: Synergy between industry and agriculture: Techno-economic and life cycle assessments of waste recovery for crop growth in glasshouses. *J. Clean. Prod.* 432, 139650 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139650>
7. Joensuu, K., Kotilainen, T., Räsänen, K., Rantanen, M., Usva, K., Silvenius, F.: Assessment of climate change impact and resource-use efficiency of lettuce production in vertical farming and greenhouse production in Finland: a case study. *Int. J. Life Cycle Assess.* 29, 1932–1944 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02343-5>
8. Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H., Wang, X.: A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems. *J. Clean. Prod.* 268, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121928>
9. Martin, M., Poulíkidou, S., Molin, E.: Exploring the Environmental Performance of Urban Symbiosis for Vertical Hydroponic Farming. *Sustainability.* 11, 6724 (2019).
<https://doi.org/10.3390/su11236724>
10. Martin, M., Weidner, T., Gullström, C.: Estimating the Potential of Building Integration and Regional Synergies to Improve the Environmental Performance of Urban

Vertical Farming. *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 849304 (2022).
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.849304>

11. Martínez, E., Fernández-Ríos, A., Laso, J., Hoehn, D., San-Román, M.F., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Margallo, M.: Low Energy and Carbon Hydroponic Tomato Cultivation in Northern Spain: Nutritional and Environmental Assessment. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 12, 860–871 (2024).
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05763>

12. Mofatteh, S., Khanali, M., Akram, A., Afshar, M.: Progressing environmental sustainability in hydroponic greenhouse systems: Embracing circular bioeconomy through compost and biochar pathways. *J. Clean. Prod.* 475, 143600 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143600>

13. Parada, F., Gabarrell, X., Rufi-Salís, M., Arcas-Pilz, V., Muñoz, P., Villalba, G.: Optimizing irrigation in urban agriculture for tomato crops in rooftop greenhouses. *Sci. Total Environ.* 794, 148689 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148689>

14. Parkes, M.G., Cubillos Tovar, J.P., Dourado, F., Domingos, T., Teixeira, R.F.M.: Life Cycle Assessment of a Prospective Technology for Building-Integrated Production of Broccoli Microgreens. *Atmosphere.* 13, 1317 (2022).
<https://doi.org/10.3390/atmos13081317>

15. Romeo, D., Veá, E.B., Thomsen, M.: Environmental Impacts of Urban Hydroponics in Europe: A Case Study in Lyon. In: *Procedia CIRP* (2018)

16. Rufi-Salís, M., Calvo, M.J., Petit-Boix, A., Villalba, G., Gabarrell, X.: Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* 155, 104683 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104683>

17. Rufi-Salís, M., Petit-Boix, A., Villalba, G., Sanjuan-Delmás, D., Parada, F., Ercilla-Montserrat, M., Arcas-Pilz, V., Muñoz-Liesa, J., Rieradevall, J., Gabarrell, X.: Recirculating water and nutrients in urban agriculture: An opportunity towards environmental sustainability and water use efficiency? *J. Clean. Prod.* 261, 121213 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121213>

18. Sandison, F., Yeluripati, J., Stewart, D.: Does green vertical farming offer a sustainable alternative to conventional methods of production?: A case study from Scotland. *Food Energy Secur.* 12, e438 (2023). <https://doi.org/10.1002/fes3.438>

19. Teo, Y.L., Go, Y.I.: Techno-economic-environmental analysis of solar/hybrid/storage for vertical farming system: A case study, Malaysia. *Renew. Energy Focus.* 37, 50–67 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.02.005>

20. Thomson, A., Price, G.W., Arnold, P., Dixon, M., Graham, T.: Review of the potential for recycling CO₂ from organic waste composting into plant production under controlled environment agriculture. *J. Clean. Prod.* 333, 130051 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130051>

21. Wang, C., Zhou, T., Yu, Z., Du, D.: Evaluating the Energy Efficiency and Carbon Footprint of Small-Scale Distributed and Centralized Vertical Farming Systems. In: *Energy. Proc. Scanditale AB* (2023)

22. Zeidler, C., Schubert, D., Vrakking, V.: Feasibility Study: Vertical Farm EDEN. German Aerospace Center (DLR), Institut of Space Systems, Bremen (2013)

Рис. 3.3.3

1. ДБН В.1.1-7:2016 “Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619

2. ДБН Б.2.2-12:2019 “Планування і забудова територій,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3260441209981634046, (2019)

3. Гетун, Г.: Основи проектування промислових будівель. Кондор, Київ (2009)

4. Житкова, Н.Ю.: Архітектурна типологія промислових будівель. КНУБА, Київ (2006)

5. Archi_com: LOADING BAYS ★ Archi-Monarch, <https://archi-monarch.com/loading-bays/>, (2022)

6. Loading Dock | WBDG - Whole Building Design Guide, <https://www.wbdg.org/space-types/loading-dock>

7. Lee, A., Enthoven, N., Kaarsemaker, R.: Best Practice Guidelines for Greenhouse Water Management. ROCKWOOL B.V., GRODAN, Priva Holding B.V., Priva (2016)

8. Ridder Growing Solutions B.V.: RIDDER. Installation and User Manual. VitaLite-E and C, <https://www.manualslib.com/manual/2852442/Ridder-Vitalite-E.html>, (2020)

9. Chart Inc.: Product Manual - Perma-Max I TM MicroBulk CO2 Systems, https://files.chartindustries.com/20892356_Perma-Max_CO2_Manual.pdf, (2024)

10. ДБН В.2.2-2:2024 “Будівлі та споруди. Теплиці та парники,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3489449319356958123?doc_type=2, (2024)

11. ДБН А.3.2-2-2009 “Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення” №ДБН А.3.2-2-2009, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074220455066862610

12. ДБН В.2.2-28:2010 “Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення” №ДБН В.2.2-28:2010, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080029223885211423

Рис. 3.3.5

1. Archi_com: LOADING BAYS ★ Archi-Monarch, <https://archi-monarch.com/loading-bays/>, (2022)

2. Loading Dock | WBDG - Whole Building Design Guide, <https://www.wbdg.org/space-types/loading-dock>

Рис. 3.3.5

1. Chart Inc.: Product Manual - Perma-Max I TM MicroBulk CO2 Systems, https://files.chartindustries.com/20892356_Perma-Max_CO2_Manual.pdf, (2024)

2. RainHarvest Systems: System Design, <https://support.rainharvest.com/support/solutions/63000156438>

3. Lee, A., Enthoven, N., Kaarsemaker, R.: Best Practice Guidelines for Greenhouse Water Management. ROCKWOOL B.V., GRODAN, Priva Holding B.V., Priva (2016)

4. Ridder Growing Solutions B.V.: RIDDER. Installation and User Manual. VitaLite-E and C, <https://www.manualslib.com/manual/2852442/Ridder-Vitalite-E.html>, (2020)
5. Resource Innovation Institute: Best Practices Guide Water Circularity for Controlled Environment Agriculture (CEA) Operations. Resource Innovation Institute (2023)
6. MoE/UNDP: National guidelines for greenhouse rainwater harvesting systems in the agriculture sector. Ministry of Environment, Beirut, Lebanon (2016)
7. Water, <https://ridder.com/solution-areas/water/>
8. ДБН В.2.2-2:2024 “Будівлі та споруди. Теплиці та парники,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3489449319356958123?doc_type=2, (2024)
9. ДБН А.3.2-2-2009 “Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення” №ДБН А.3.2-2-2009, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074220455066862610
10. ДБН В.2.2-28:2010 “Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення” №ДБН В.2.2-28:2010, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080029223885211423

Рис. 3.3.6

1. Radwan, A., Katsura, T., Memon, S., Serageldin, A.A., Nakamura, M., Nagano, K.: Thermal and electrical performances of semi-transparent photovoltaic glazing integrated with translucent vacuum insulation panel and vacuum glazing. *Energy Convers. Manag.* 215, 112920 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112920>
2. Sun, Y., Shanks, K., Baig, H., Zhang, W., Hao, X., Li, Y., He, B., Wilson, R., Liu, H., Sundaram, S., Zhang, J., Xie, L., Mallick, T., Wu, Y.: Integrated semi-transparent cadmium telluride photovoltaic glazing into windows: Energy and daylight performance for different architecture designs. *Appl. Energy.* 231, 972–984 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.133>

Джерела ілюстрацій до четвертого розділу

Рис. 4.1.1

1. Дорохіна, Г., Жданова, Я.: Архітектурна класифікація вертикальних агрокомплексів за способом кооперування. In: Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. pp. 87–93. Potere della ragione Editore, Rome, Italy (2021)

2. Жданова Я. Архітектурно-планувальна організація поліфункціональних вертикальних агрокомплексів: атестаційна робота магістра. Київ: КНУБА, 2021. с. 107. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26188.54408/1>

Рис. 4.1.2

1. Christaller, W.: Die zentralen Orte in Süddeutschland [Central places in southern Germany]. (1933)

2. Дорохіна, Г.: Архітектурно-планувальна організація фізкультурно-оздоровчих закладів для людей з обмеженими фізичними можливостями, (2013)

3. ДБН Б.2.2-12:2019 “Планування і забудова територій,” https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3260441209981634046, (2019)

4. Bustanica | We farm differently. We care passionately, <https://www.bustanica.ae/about>

5. Emirates Crop One Vertical Farm, <https://www.groupamana.com/project/emirates-crop-one-vertical-farm/>

6. Ilimelgo Reimagines Future of Urban Agriculture in Romainville, <https://www.archdaily.com/874922/ilimelgo-reimagines-future-of-urban-agriculture-in-romainville>

7. Andrews, K.: Pasona Urban Farm by Kono Designs. Dezeen. (2013)

8. INFARM: About us, <https://www.infarm.com/about-us/>

Рис. 4.2.2

1. Жданова, Я., Дорохіна, Г. Принципи цілісності та гармонізації архітектурно-просторових рішень вертикальних ферм. Сучасні проблеми

Архітектури та Містобудування. 2024. № 68. С. 215–227. URL:
<https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.68.215-227>

Рис. 4.3.1

1. iFarm Vertical Farms Technologies Portfolio, <https://ifarm.fi/projects>
2. Podmirseg, D.: Vertical Farm Aspern Vienna, <https://verticalfarminstitute.com/vertical-farm-aspern-vienna/>, (2022)

Рис. 4.3.3

1. 4 wheels steel plywood shelves danish nursery plant flower shipping carts for sale, <https://www.bestsuppliers.com/products/flgupib6qvkw/4-wheels-steel-plywood-shelves-danish-nursery-plant-flower-shipping-carts-for-sale>
2. Metal Plant Trolley – Durable & Customizable Trolley for Agriculture | direct from Growers House, <https://growershouse.com/metal-plant-trolley>
3. Seed Cart “Tube” 5 floors x 4 Trays, <https://www.carretillasamate.com/gb/manual-products/81-seed-cart-tube-5-floors-x-4-trays.html>
4. VF5213 Transport/Hardening Off Trolley, <https://v-farm.co.uk/products/vf-5213-transport-hardening-off-trolley>
5. VF5226 - Harvest ladder, <https://v-farm.co.uk/products/vf5226-harvest-ladder>
6. Escalera con tarima – KRAUSE: acceso por un lado | kaiserkraft, <https://www.kaiserkraft.es/medios-auxiliares-de-subida/escaleras-de-plataforma-escaleras-con-tarima/escalera-con-tarima/acceso-por-un-lado/p/M4987297/>
7. Escalera móvil con plataforma y 6 peldaños - Manupack, <https://manupacksl.com/escalera-movil-con-plataforma-y-6-peldanos/>
8. Escalera de plataforma móvil PL200/8, 2.000 mm altura de la plataforma, 8 peldaños, TOPREGAL | TOPREGAL, <https://www.topregal.es/es/escaleras/escalera-de-plataforma-movil-pl200-8-2000-mm-altura-de-la-plataforma-8-peldanos-topregal.html>
9. Tracker Mobile Platform Ladder, <https://www.backsafeaustralia.com.au/product-page/tracker-mobile-platform-ladder>

10. Mobile platform ladder PL200/8, platform height 2.000 mm, 8 steps, TOPREGAL, <https://www.topregal.com/en/ladders/mobile-platform-ladder-pl200-8-platform-height-2000-mm-8-steps-topregal.html>

11. Agricultural Farming Equipment Greenhouse Indoor Electric Harvest Trolley Lift Tomato Harvester Pipe Rail Cart Trolley Lifting - Picking Trolley and Forklift for Picking, <https://sunshine-greenhouse.en.made-in-china.com/product/DEHYgCyMHAUq/China-Agricultural-Farming-Equipment-Greenhouse-Indoor-Electric-Harvest-Trolley-Lift-Tomato-Harvester-Pipe-Rail-Cart-Trolley-Lifting.html>

12. Electric Scissor Lifts | Slab Scissor Lifts | Genie - Quality By Design, <https://www.genielift.com/en-gb/aerial-lifts/electric-slab-scissor-lifts>

13. Farming Equipment Greenhouse Indoor Electric Harvest Trolley Lift Tomato Harvester Picking Cart For 550mm Rail Support - Buy Agricultural Greenhouse Electric Pipe Rail Cart Trolley Lifting agricultural Indoor Farming Electric Harvest Trolley Lift Picking Cart agricultural Farming Equipment Greenhouse Tomato Harvester Trolley Lift For 550mm Rail Support Product on Alibaba.com, <https://www.alibaba.com/product-detail/Agricultural-farming-equipment-greenhouse-indoor-electric-1600602674467.html>

14. Genie scissors assist 'Europe's largest' vertical farm, <https://www.accessbriefing.com/news/genie-scissors-assist-europes-largest-vertical-farm/8014093.article>

15. Agricultural Farming Equipment Greenhouse Indoor Electric Harvest Trolley Lift Tomato Harvester Pipe Rail Cart Trolley Lifting, <https://sunshine-greenhouse.en.made-in-china.com/product/DEHYgCyMHAUq/China-Agricultural-Farming-Equipment-Greenhouse-Indoor-Electric-Harvest-Trolley-Lift-Tomato-Harvester-Pipe-Rail-Cart-Trolley-Lifting.html>

16. Genie Scissor Lift - Free CAD Drawings, <https://freecadfloorplans.com/genie-scissor-lift/>

17. Planos De Escalera De Servicio Ilustración del Vector - Ilustración de equipo, existencias: 210711105, <https://es.dreamstime.com/planos-de-escalera-servicio-ilustración-vectorial-estilizada-una-plataforma-para-image210711105>

Рис. 4.3.4

1. Vertical High Density Mobile Shelving – HI-BAY, <https://www.montel.com/en/products/hi-bay-powered-mobile-shelving-system>

2. Gee, E.: AeroFarms Announces Build-out of Largest Farm of its Kind in the World in Danville, Virginia, <https://www.aerofarms.com/aerofarms-build-out-largest-farm-of-its-kind-in-the-world/>

Рис. 4.3.5

1. Dayananda, H.: One Square Meter Yield: A Hydroponic System Design, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1568472&dswid=-6516>, (2021)

Рис. 4.3.6

1. Dayananda, H.: One Square Meter Yield: A Hydroponic System Design, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1568472&dswid=-6516>, (2021)

Джерела ілюстрацій до додатків

Рис. В.1.

1. Digitale, U.: Futura Gaïa lève 11 millions d’euros pour commercialiser son système d’agriculture verticale. (2023)

2. Heavy-Duty Mobile Vertical Grow Rack System GROW&ROLL 8MA | Montel Inc., <https://www.montel.com/grow-more/products/mobile-vertical-farming-systems/growroll-8ma>

3. [Hot Item] Agriculture Hydroponics Tower Vertical Hydroponic Column for Growing Lettuce/Strawberry Complicated Hydroponics System, <https://zenong.en.made-in-china.com/product/jdZaYANhriVR/China-Agriculture-Hydroponics-Tower-Vertical-Hydroponic-Column-for-Growing-Lettuce-Strawberry-Complicated-Hydroponics-System.html>

4. Indoor Plant Factory,Hydroponics System,Vertical Farming – Buy Vertical Farming indoor Plant Growing Systems vertical Hydroponic System Product on Alibaba.com, https://www.alibaba.com/product-detail/Indoor-Plant-Factory-Hydroponics-system-Vertical_60307751358.html

5. Editors, M.: Sky Urban Vertical Farming System Wins 2015 INDEX: Award, <https://thisismold.com/space/farm-systems/sky-urban-vertical-farming-system-wins-2015-index-award>, (2015)

6. Tuam Tshoj Customized Hydroponic Farming Manufacturers – Lag luam wholesale Service – GROWSPEC, <https://mww.growspecdevice.com/grow-system/vertical-farming-equipment-hydroponic-system/hydroponic-farming.html>

7. Vertical Farming Trends & Solutions for 2021, <https://www.edengreen.com/blog-collection/vertical-farming-trends-amp-solutions-for-2021>