

УДК 629.7:347.85.+747.023.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.15>

КОСМІЧНІ ІННОВАЦІЇ В АРХІТЕКТУРНОМУ ДИЗАЙНІ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ПОВОЄННЕ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

Антоненко Ігор Володимирович¹, Агліуллін Руслан Марселєвич²

¹ старший викладач кафедри дизайну інтер'єру і меблів,
Київський національний університет технологій та дизайну,

Київ, Україна,

e-mail: tonn7171@gmail.com, orcid: 0000-0002-5762-1401,

² доктор філософії, галузь 02 «Культура та мистецтво»,

доцент кафедри дизайну інтер'єру і меблів

Київський національний університет технологій та дизайну,

Київ, Україна,

e-mail: agliullin.rm@knutd.com.ua orcid: 0000-0001-5923-2840

Анотація. У статті досліджується інтеграція космічних технологій в український архітектурний дизайн як засіб підвищення стійкості та ефективності будівництва в умовах повоєнного відновлення. Розглянуто приклади міжнародного та вітчизняного досвіду, включаючи проекти модульних місячних станцій, 3D- та 4D-друку, використання інтелектуальних матеріалів, а також адаптацію принципів народної архітектури. Аналізуються можливості застосування концепцій замкнутого середовища, сталого використання місцевих ресурсів (ISRU), цифрового моделювання (BIM) і онлайн-конструкторів в архітектурній практиці. Стаття також висвітлює роль українських дизайнерів і науковців у глобальному контексті впровадження космічних інновацій у будівельну галузь та підкреслює значення модульності, енергоефективності й матеріалознавства для підвищення якості рукотворного середовища.

Мета. Аналіз процесу імплементації космічних технологій у сферу українського архітектурного дизайну та їхнього впливу на вирішення завдань повоєнного відновлення України.

Методологія. Під час дослідження використовувалися методи порівняльного аналізу наукової літератури в контексті використання космічних технологій для повоєнного відновлення; методи узагальнення та систематизації для виділення ключових тенденцій та структурування наукової роботи; а також метод синтезу для формування цілісного бачення проблеми та інтеграції різноманітних ідей та концепцій у процесі наукового дослідження.

Результати. Розглянуто способи застосування космічних інновацій у сфері українського архітектурного дизайну; їхній вплив на підвищення надійності та адаптованості дизайн-об'єктів; способи їх трансформації та можливості використання у модульній народній архітектурі; можливості та напрями їх застосування для повоєнного оновлення України.

Наукова новизна. Розглянуто можливості застосування космічних технологій в українському архітектурному дизайні для повоєнного відновлення країни, проаналізовано специфіку застосування космічних технологій для таких цілей. Виявлено закономірності та можливості їх упровадження у процес дизайн-проекування.

Практична значущість. Результати дослідження можуть бути використані для подальшого вивчення можливостей та способів застосування космічних технологій в архітектурному дизайні, а також служити теоретичним та практичним матеріалом під час підготовки фахівців в інших галузях дослідницького дизайну та написання наукових праць.

Ключові слова: космічна місія, дизайн-проектування, інтелектуальні матеріали, ґрунт, модульне житло, війна, відновлення, космічні технології, архітектурний дизайн, модульне будівництво, 3D-друк, повоєнне відновлення, сталий розвиток, інноваційні матеріали.

ВСТУП

У науковому світі все частіше згадуються реальні можливості людства закріпитися в космосі – якщо не на Марсі, то на навколomisячній орбіті. Говориться про мультимодальні космічні перевезення (ММКП), які дадуть змогу здійснювати індустріалізацію космосу та нададуть можливості для впровадження орбітальних сервісів (ОС), спрямованих на побудову орбітальної економіки. Організація ОС є перспективним напрямом розвитку космічної індустрії України, оскільки країна має для цього напрацьований потенціал. На даному етапі космічні технології активно використовуються у земних умовах, зокрема у сфері будівельної інженерії та архітектурному дизайні, а також для споруд народної архітектури, традиційно орієнтованої на місцеві умови та ресурси і методи якої, своєю чергою, стали запозичуватися для застосування в космосі. Упровадження космічних технологій дає змогу вирішувати багато завдань, що виникають під час проектування та зведення дизайн-об'єктів з орієнтацією на принципи «кругової економіки», а також стимулюють створення інноваційних будівельних методів для повоєнного відновлення країни.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Архітекторка-дизайнерка Мікаела Патрік у праці «Cosmopolitical Bodies: An Architecture of Space» досліджує зв'язок між космічними технологіями, дизайном та екологічними викликами, що постають перед планетою. У тезі під назвою «Dandal Kura» авторка аналізує домінантні уявлення про космос і вплив цих наративів на дизайнерську практику, розглядаючи потенціал інновацій у сфері архітектури для протидії зміні клімату [48]. У складі дослідницької групи STEMA вона також займалася просторовим аналізом застосування космічних рішень у традиційній африканській архітектурі (зокрема, у проєкті МАМА Manyatta) та досліджувала значення дизайну в упровадженні інноваційних моделей систем охорони здоров'я в Кенії [1; 49].

У 2002 р. в Массачусетському технологічному інституті (MIT) Емі Сміт, яку журнал

Time включив до сотні найвпливовіших людей за її внесок у розвиток космічних технологій та локальних інновацій у країнах Глобального Півдня, ініціювала створення унікальної методики розкриття творчого потенціалу. Ця методика лягла в основу освітньої програми MIT D-Lab, орієнтованої на дослідження в галузі технологічного дизайну [24]. У рамках D-Lab студенти MIT реалізують прикладні проєкти у співпраці з інноваторами з місцевих громад, спираючись на принципи партисипативного й інклюзивного дизайну [51]. Окрім того, вони долучаються до дослідницьких ініціатив у межах Програми можливостей MIT (UROP) [1; 30].

У 2017 р. Даніель Вуд, доцентка кафедри аеронавтики й астронавтики Массачусетського технологічного інституту (MIT) та інженерка в галузі космічних технологій, виступила з доповіддю «Six Space Technologies We Can Use to Improve Life on Earth». У ній вона окреслила перелік ключових технологій, які мають значний соціальний потенціал. До них вона віднесла супутникове спостереження за планетою, комунікаційні та навігаційні супутникові системи, дослідження у сфері мікрогравітації, трансфер космічних технологій до земного середовища, а також фундаментальні наукові відкриття [56]. Окрім наукової діяльності, Даніель Вуд заснувала дослідницьку групу Space Enabled, яка займається створенням систем, спрямованих на підтримку сталого розвитку як на планеті, так і в умовах космосу. Вона також викладає у Морнінгсайдській академії дизайну, де розвиває напрям технологій суспільного інтересу, використовуючи інструменти дизайн-мислення [54].

У своїх наукових публікаціях, створених у співавторстві з Лізбет Б. Де Ла Торре, дослідниця аналізує підходи до дизайн-проектування, що застосовуються в різних галузях із метою формування концепцій космічних місій та вдосконалення відповідних технологій. Такі підходи, зокрема, були використані NASA для проектування середовищ існування та розроблення програмного забезпечення, яке інтегрується в пристрої, призначені для

потреб астронавтів [42]. Надалі авторка зосередила увагу на дослідженні потенціалу космічних технологій для реалізації Цілей сталого розвитку (ЦСР), а також на аналізі викликів, що виникають у цьому процесі, та можливих шляхів їх подолання [1; 55].

Значну роль у формуванні сучасного бачення архітектури для екстремальних умов відіграє Сасаківський міжнародний центр космічної архітектури (SICSA) [50]. У співпраці з NASA [46], The Boeing Company [27], компанією Oceaneering та системою аеропортів Г'юстона/Houston Spaceport [43] центр реалізує інженерно-архітектурні проекти, пов'язані з будівництвом океанічних апаратів, арктичних дослідних станцій та захисних об'єктів для надзвичайних ситуацій. У Європі дослідження у цьому напрямі координує Міжнародний космічний університет у Страсбурзі (ISU) [41]. В Україні питання розвитку космічного сектору, а також аспектів його державного управління досліджуються у працях вітчизняних науковців. Серед них варто виокремити роботи С. Кошової [30], Н. Куссуль, О. Федорова, А. Шелестова [11; 12] та інших фахівців. Упродовж останніх років у наукових колах активно досліджувалися актуальні напрями розвитку глобальної космічної галузі, а також окреслювалися перспективи її еволюції до 2030 р. Аналіз охоплював зміну вартості впровадження космічних технологій під впливом інноваційних факторів, проблематику очищення орбіти від космічного сміття, можливості застосування космічних технологій для протидії кліматичним змінам, а також потенціал 3D-друку для реалізації майбутніх космічних місій [10; 12].

У контексті реалізації принципів сталого розвитку було сформульовано концепцію українського складника глобальної ініціативи GEOSS – системи UkrGEO. Вона спрямована на інтеграцію супутникових даних та модернізацію інструментів геопросторової аналітики і статистики з метою цифрової трансформації економіки та промисловості [12].

В аспекті повоєнного відновлення країни супутникові зв'язки та навігаційні пристрої вивчали Д. Лутович [13], І. Гавриляк [6]. К. Кіреєва [9] розглядала цей напрям під кутом запуску великих угруповань супутників (мега-констеляцій), що підвищують якість послуг зв'язку та її глобального охоплення за рахунок об'єднання з європейською космічною системою. Л. Шевченко [21] представив на розгляд застосування мюонної томографії – інноваційної технології, яка використовує частки, що виникають під час

взаємодії космічних променів з атмосферою Землі, яка в аспекті відновлення може допомогти: 1) в оцінці пошкоджень будівель; 2) для збереження безпеки під час розбору завалів; 3) під час реконструкції історичних будівель; 4) для екологічного моніторингу. В. Губарева [8] показала у своїй статті, як цифровізація та 3D-сканування не лише допомагають зберегти культурну спадщину в цифровому варіанті, а й породжують додатковий інструментарій для відновлення зруйнованих будівель та споруд.

У сфері архітектурного дизайну тема освоєння космосу стала джерелом натхнення для багатьох творчих студій. Зокрема, роботи українських архітекторів здобули міжнародне визнання: за версією Archdaily, вони увійшли до списку 12 найкращих нереалізованих проектів. Серед них – житловий об'єкт над скелею, розроблений Yakusha Design, та укриття Plan B від Sergey Makhno Architects [38]. До теми космічної архітектури також звернулися й інші українські бюро. Так, Dmytro Aranchii Architects представило концепцію модульної місячної бази під назвою Misiats [3], тоді як Makhno Studio розробило архітектурну модель марсіанського поселення, що отримала назву Plan C [47].

МЕТА

Метою дослідження є розгляд процесу інтеграції космічних технологій у сферу українського архітектурного дизайну, а також вивчення того, як упровадження космічних технологій у цю сферу може сприяти повоєнному відновленню зруйнованих споруд України.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У рамках щорічної авіакосмічної виставки Dubai Air Show у 2019 р. КБ «Південне» представило новий апарат LenderHopper (рис. 1) для дослідження місячного ґрунту та пошуку на Місяці корисних копалин. Окрім цього, апарат призначався для обстеження території планети щодо можливості будівництва місячного містечка для колонізаторських місій [18].

У конструкторському бюро вже протягом кількох років ведеться системна робота над проектом Місячної промислово-дослідницької бази (рис. 16). На основі попередніх досліджень було вибрано модульну концепцію розвитку станції. У межах цього підходу ведеться поступове створення ракети-носія надважкого класу під назвою «Кріптон». Паралельно розробляється структура розгінних модулів, призначених для виконання орбітальних маневрів і забезпечення транспортування між

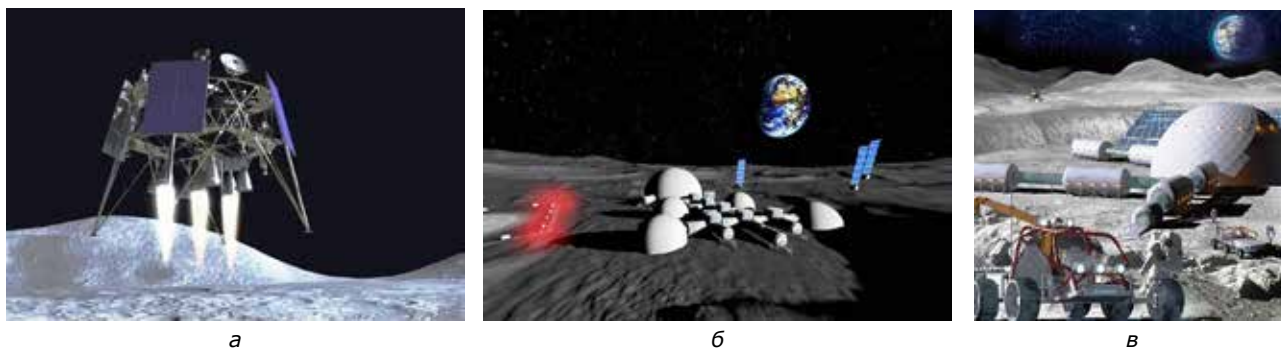


Рис. 1. а) дослідний апарат LenderHopper від КБ «Південне» для первинних досліджень Місяця; б) Місячна промислово-дослідницька база; в) розширена конфігурація місячної бази

Землею та Місяцем. Також аналізується архітектурна модель орбітальної станції навколо Місяця з постійною присутністю екіпажу, яка має стати ключовим етапом для майбутніх міжпланетних місій. Опрацьовуються технічні рішення для різних типів посадкових модулів: вантажних, пілотованих і пасажирських.

Запропонована модульна система базується на принципі секторального розширення інфраструктури. Центральну роль відіграє шлюзовий модуль, що забезпечує вихід екіпажу на поверхню Місяця. До нього приєднують командний центр і житловий відсік. Окремо розробляється модуль-віваріум, де передбачається вирощування рослин для підтримання життєвого циклу екіпажу. Структура бази передбачає можливість масштабування через додавання ремонтних, складських і виробничих секцій [16].

Процес створення місячної бази передбачає реалізацію поетапної стратегії. На першій фазі (2020–2030 рр.) заплановано здійснити докладне картографування видимої частини місячної поверхні, а також розробити ракету-носії великої вантажності під назвою «Кріптон», яка доповнюватиметься розгінним та посадковим модулями. У другій фазі (2030–2032 рр.) передбачається визначення оптимального місця для розміщення майбутньої бази. До цієї локації «Кріптон» доставить чотирьох астронавтів разом із базовими модулями для початку будівництва. Наступний, третій, етап (2032–2042 рр.) передбачає розширення інфраструктури, зокрема монтаж командного та ремонтного модулів, установлення джерел енергозабезпечення, а також транспортування місяцеходу (рис. 1в). У заключній фазі (2042–2062 рр.) планується формування замкненої життєзабезпечувальної системи, призначеної для функціонування виробничого комплексу та наукової обсерваторії. Ці об'єкти проєктуються без потреби постійної присутності людини [19].

На початку вересня 2020 р. Державне космічне агентство України взяло участь в онлайн-засіданні Міжнародної координаційної групи з дослідження космосу (ISECG). На засіданні представники космічних відомств ухвалили Додаток до «Дорожньої карти глобальних досліджень космосу» щодо «Оновлення сценарію досліджень поверхні Місяця». У «Дорожній карті» враховувався український внесок у програму НАСА «Артеміда», а також ініціативи Європейської асоціації Місячного поселення (Moon Village Association – MVA). Було вирішено, що українська сторона продовжить роботу над трьома основними місячними заходами: 1) створення сонячної електростанції; 2) розроблення кубсату (надмалого супутника) на селеноцентричній орбіті передачі спектральних змін і місячних зображень із кількох оглядових точок; 3) створення сонячно-термоелектричного генератора поновлюваної енергії. У прийнятому документі було також сформульовано 12 цілей на основі принципів сталого розвитку для проведення системних досліджень та створення елементів архітектури майбутніх місячних баз [15].

В Україні розвиток архітектурних рішень, натхненних космічною тематикою, активно підтримується низкою проєктних студій і дизайнських бюро. Серед них варто виокремити Dmytro Aranchii Architects із проєктом Misiats та Makhno Studio, яке працювало над концепцією Plan C.

Проєкт «Модульна космічна станція Misiats», реалізований Dmytro Aranchii Architects, базується на аналізі можливих умов та викликів, що можуть виникнути під час тривалого перебування людей на Місяці (рис. 3). Архітектурна форма модулів базується на геометрії зрізаних восьмигранників. Зовнішні оболонки є змінними, що дає змогу здійснювати ремонт за заздалегідь розробленими сценаріями. Джерелом енергії у цій концепції

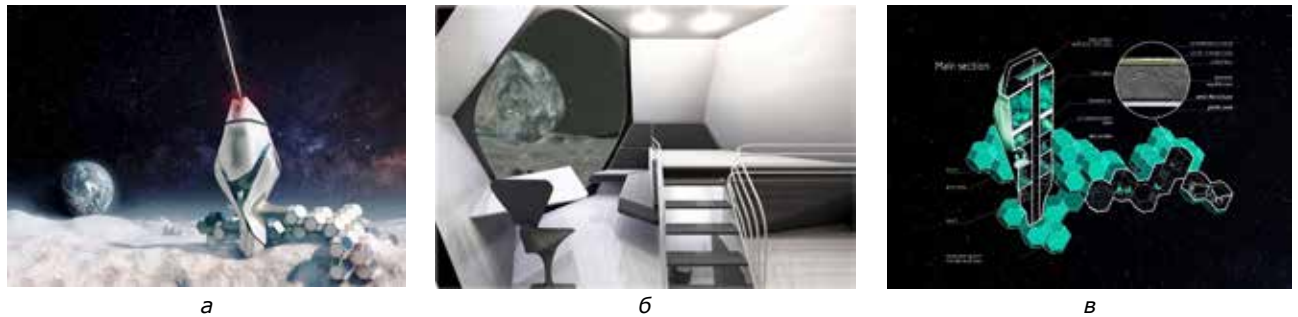


Рис. 2. Модульна космічна станція *Misiats*, Dmytro Aranchii Architects, 2019

виступає ізотоп Гелій-3, який передбачається добувати на поверхні Місяця з подальшим використанням у реакції контрольованого термоядерного синтезу [1; 3].

Україна закріпила свої наміри щодо участі в глобальних космічних ініціативах, підписавши меморандум про співпрацю з NASA та приєднавшись до програм Європейського космічного агентства. Окрім місячних місій, передбачено також участь у дослідженнях Марса [7]. У цьому контексті Makhno Studio розробило проєкт марсіанського поселення під назвою Plan C (рис. 3), яке планується розміщувати в межах кратера для забезпечення захисту від зовнішніх впливів, зокрема піщаних бур, сонячної радіації та метеоритних загроз. Спорудження зовнішніх конструкцій передбачається здійснювати за допомогою великогабаритних 3D-принтерів. Інфраструктура проєкту включає житлові приміщення, зони для дослідницької діяльності, технічні блоки, а також громадські простори. Центральним елементом є зелена кільцева комунікаційна зона, яка проходить уздовж усього комплексу, забезпечуючи зв'язок між основними функціональними частинами: медичними пунктами, лабораторіями, адміністративними структурами та дослідницькими центрами [1; 47].

Космічні дослідження стали рушієм появи інноваційних технологій, здатних функціонувати в надзвичайно складних умовах поза межами земної атмосфери. Розробки, що з'явилися з необхідності забезпечити

життєдіяльність у вакуумі, дедалі більше орієнтовані на вдосконалення умов життя на Землі. Сучасна космічна архітектура, яка розвивається на тлі зростаючого інтересу людства до освоєння інших планет, фактично виконує функцію підготовки до довготривалого перебування в умовах надзвичайних ситуацій – як природного, так і техногенного походження. У цих процесах задіяні інженерні, архітектурні та дизайнерські рішення, що дають змогу створювати автономні середовища, здатні адаптуватися до змін. Практичні напрацювання у сфері космосу вдосконалюють моделі штучного простору на Землі, забезпечуючи їх гнучкість і стійкість [29]. Цифрові підходи до проєктування стали основою для трансформації архітектурної практики, зокрема через упровадження технології BIM. Національні космічні структури спільно з НЦУВКЗ ініціювали створення регіональних інноваційних кластерів, які працюють над вирішенням архітектурних завдань у середовищі метавсесвіту та з використанням цифрових двійників. У цьому напрямі вирізняється український стартап Era Twin від Urbanistyka Hub – цифрова платформа, що оптимізує проєктні процеси, зменшує витрати ресурсів, викиди вуглекислого газу, допомагає виявляти помилки та проводить аналітику будівельного циклу [3]. Для космічних місій особливо перспективною є технологія 3D-друку з використанням екструзії, яка забезпечує швидке зведення об'єктів. Як матеріал пропонується

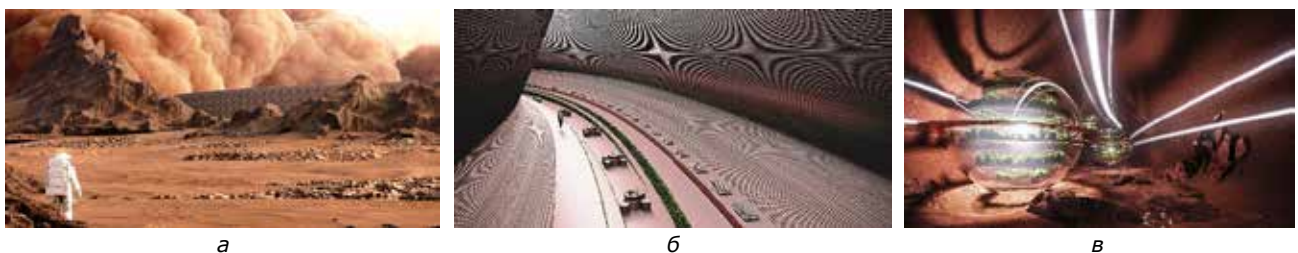


Рис. 3. Поселення для Марса під назвою Plan C, Makhno Studio, 2021: а – концепція поселення усередині кратера; б – функціональні простори вздовж кільцевої структури поселення; в – сферичні теплиці

реголіт – ґрунт, що вкриває поверхню Місяця, – доступне місцеве джерело, яке може замінити традиційний бетон у позаземних умовах.

На Землі 3D-друк та модульне будівництво стали ключовими інструментами у формуванні нових архітектурних підходів, зокрема в народній архітектурі. Використання локальних ресурсів та екоорієнтоване будівництво, властиве традиційним практикам, отримало нове прочитання через інтеграцію адитивних технологій. Концепція ISRU (In-Situ Resource Utilization) – використання наявних природних ресурсів на місці – забезпечує самодостатність, мінімізує залежність від зовнішніх джерел і скорочує кількість відходів [45]. Це дає змогу не лише прискорити будівельні процеси, а й ефективно реагувати на виклики в умовах природних катастроф або післявоєнного відновлення [1; 44].

Серед провідних компаній, що реалізують проекти 3D-друкованого будівництва, вирізняються ICON і HAVELAR. Їхні рішення демонструють, як за допомогою широкої палітри матеріалів і сучасних технологій можна проєктувати складні форми з високими естетичними й функціональними якостями [39]. У липні 2024 р. неподалік Ірпеня завершено перший в Україні житловий будинок, надрукований 3D-принтером, створеним компанією 3D UTU. Він став житлом для родини військовослужбовця, загиблого під час війни [1; 17].

4D-друк – це технологія, що включає додатковий вимір – час, що означає здатність автономної трансформації матеріалу внаслідок внутрішніх реакцій на стимули навколишнього середовища. Концепція була популяризована координатором лабораторії самоскладання Массачусетського технологічного інституту (MIT) Скайларом Тіббітсом у співпраці зі Stratasy та Autodesk [22]. Технологія може використовуватися у будівництві, автомобілебудуванні, аеронавтиці, а також в охороні здоров'я у поєднанні з біодруком. У технології використовуються «інтелектуальні матеріали», здатні змінюватися у відповідь на тепло, світло, вологість, тиск або магнетизм, що дає їм змогу рухатися та змінювати форму без робототехніки, електроніки чи двигунів [31].

За стимуляції об'єкти можуть перетворюватися на інші тривимірні об'єкти; стискатися та розширюватися (наприклад, дренажні труби), долаючи ухили на місцевості; або трансформуватися із сировини у готові конструкції без утручання людини. Традиційно жорсткі структури (аерокосмічна, автомобільна, будівельна промисловість і т. д.) набудуть здатності ставати динамічними, що

адаптуються та налаштовуються для підвищення продуктивності. 4D-друк, покращений технологією мультиматеріалів, кардинально змінить процес контролю та програмування матеріалів від ідеї-концепції до друку трансформацій, що змінюють форму [36]. Ведуться серйозні дослідження у сфері полімерних матеріалів як огорожувальних конструкцій будинків [53], у регенерації людських тканин, органів і реконструкції кісток [52].

У 1984 р. іранський архітектор Надер Халілі представив метод будівництва SuperAdobe, який ґрунтується на використанні земляних мішків і поєднанні вертикальних та горизонтальних навантажень для забезпечення стабільності споруд в екстремальних середовищах, зокрема на поверхнях Місяця або Марса. Ця технологія стала відомою завдяки своїй екологічності, енергоефективності й можливості зводити житло вручну з доступних природних матеріалів. SuperAdobe отримала визнання як приклад сучасного підходу до архітектури, придатного як для земного використання, так і для позаземного будівництва [23].

В Україні аналогічна технологія набула поширення під назвою «Суперсаман», яку застосовували, зокрема, для боротьби з повеннями й будівництва захисних дамб [4]. Пізніше ця методика еволюціонувала в конструктивну систему Genesis, що базується на зведенні каркасних споруд з оцинкованого металу з ущільненням ґрунту за допомогою електроінструментів [14]. У межах українських ініціатив у сфері модульного будівництва як місцевий ресурс було запропоновано використовувати технічні коноплі. Зокрема, на базі Інституту нової архітектури в Нідерландах (NAI) було розроблено систему мобільного соціального житла з конопляних панелей, модулі якого (розміром від 19 до 90 м²) легко транспортуються та монтуються з уніфікованих деталей. Подібні рішення були успішно реалізовані й у Великій Британії, де утворено галузевий осередок British Hemp Alliance і сформовано стандарт для конопляних конструкцій – The RICS Building with Hemp Report [28]. В Україні інноваційний підхід до застосування конопляної сировини в будівництві реалізує компанія Hempire UA, яка створила високоефективний конопляний бетон, придатний як для житлового, так і для громадського будівництва. Ще одна українська компанія – BeWood – спеціалізується на виробництві збірних каркасних будинків із використанням костроблоків та конопляних утеплювачів [1; 40].

Експериментальна спільнота Bauhaus Earth оголосила стипендіатами 2025 р. М. Лісогорську та К. Сонг із групи Assemble (Лондон), а також архітекторів А. Помазан та М. Шевченка (Львів). Їхні проєкти спрямовані на дослідження землі як будівельного матеріалу. Проєкт «Earth, Lightly» М. Лісогорської та К. Сонг акцентується на сенсорній та тактильній взаємодії між людьми та екологічними структурами. Використовуючи земляні штукатурки та місцеві матеріали, планується розробити наочні прототипи демонстрації взаємодії дизайну з довкіллям. Проєкт «Ґрунт» О. Помазаної та М. Шевченка спрямовано вивчення естетичного потенціалу матеріалу під час використання його у регенеративній практиці і навіть на вирішення проблем в екологічно спустошених зонах військових дій. За допомогою інноваційних дизайнерських рішень формується стратегія відновлення постраждалих територій, що перетворює проблему наслідків війни на можливість для архітектурного дизайну. Ключовими компонентами проєкту є формування міждисциплінарних зв'язків та розроблення методів, що дадуть змогу використовувати такі моделі в аналогічних зонах по всьому світу. Проєкт пройде дослідницьку фазу від польових робіт до створення експериментального прототипу тривалістю від 6 до 8 місяців. Результати будуть поширені через різні публічні платформи (зокрема, медіаканали Bauhaus Earth) [35].

Найважливішою інновацією у цій ситуації є модульність. Космічні житлові системи проєктуються за принципом модульності, що дає змогу швидко збирати конструкції та адаптувати їх до конкретних потреб. Цей підхід активно застосовується й у сучасній архітектурній практиці. Аналогічно до принципів, за якими створюються космічні апарати, архітектурні об'єкти на Землі все частіше формуються з уніфікованих та взаємозамінних елементів, що забезпечує високу гнучкість, ефективність використання ресурсів і стійкість будівельних рішень. Такий формат особливо актуальний під час проєктування житла, соціальної інфраструктури та громадських просторів. Завдяки модульному підходу складні системи розбиваються на простіші складники, що сприяє доступності процесу проєктування і ширшій участі у ньому різних фахівців [1; 34].

У 2022 р. українська архітектурна студія Balbek Bureau запустила інноваційну модульну систему житла для переміщених осіб. Розробники планували виділити шаблони проєктування кожного регіону та подати свої висновки за допомогою доступного онлайн-інструменту (назва – RE:Ukraine Villages). Було

вивчено особливості української народної архітектури (рис. 4), виділено елементи, що повторюються (рис. 5), за первинне планування взято витягнуту форму (характерну для вивчених районів), інтер'єрний простір зонувався за функціями без детальних перегородок, окремо надавалася можливість додати заасклену веранду [25].

Зрештою, виник єдиний алгоритм для перетворення даних на онлайн-конструктор, усі компоненти були розсортовані за категоріями, варіації будівель моделювалися за допомогою програми Grasshopper у середовищі Rhinoceros, що давало змогу змінювати параметри на будь-якому етапі проєктування.

Після виконання всіх кроків RE:Ukraine Villages генерував 3D-модель будинку та пропонував користувачеві рекомендації з проєктування та будівництва будинку, а також посібник (у форматі PDF) з ізометріями, планами, кресленнями, сканами фасадів, технічним описом та вказівками щодо оздоблювальних матеріалів (рис. 6). У процесі моделювання онлайн-конструктор використовував типові для цього регіону декори та пропонував безліч варіантів комбінаторики. Кожна сім'я має унікальне бачення власного будинку і спирається на певний бюджет, тому під час розроблення проєкту за допомогою інструменту RE:Ukraine Villages закладалася можливість завантаження в параметри конструктора різних переваг, потреб і смаків майбутніх домовласників, що було гнучким рішенням і давало сім'ї можливість спиратися на наявні в неї ресурси та конкретні фізичні можливості [37].

Об'єднання підходів аерокосмічної та архітектурної інженерії сприяло виникненню взаємозбагачувальної співпраці, де інновації в одній сфері стимулюють прогрес в іншій. Космічні дослідження, що проходять у надзвичайно складних умовах із суворими обмеженнями ресурсів, стимулювали створення нових технологій будівництва, енергоефективних систем та матеріалів із підвищеними характеристиками. Частина з них може бути отримана виключно в умовах мікрогравітації, що частково компенсує високу собівартість їх виробництва. Прикладом може бути ZBLAN – фторидне волокно, виготовлене з фтористого скла. Цей матеріал характеризується надзвичайно низькими втратами сигналу на одиницю довжини, що робить його цінним для оптичних систем.

Ще одним прикладом є CFRP – вуглецево-волоконний композит із полімерною основою, спочатку розроблений для потреб аерокосмічної промисловості. Завдяки високій міцності за малої ваги, довговічності та



Рис. 4. Аналіз української житлової архітектури по областях:

а) Чернігівська; б) Харківська; в) Сумська; г) Миколаївська; д) Запорізька; е) Херсонська; ж) Одеська; з) Дніпровська; і) Полтавська; к) Волинська

стійкості до корозії цей матеріал знайшов широке застосування і в архітектурному проектуванні. Його використання дає змогу зміцнювати конструкції без суттєвого збільшення їхньої маси, знижуючи витрати на матеріали та подовжуючи термін експлуатації [1; 33].

Також заслуговує на увагу концепція самовідновлюваного бетону, що базується

на біоміметичних принципах і була вдосконалена в ході космічних досліджень. Такий бетон містить мікрокапсули з активними речовинами, які активуються за появи тріщин, забезпечуючи автономне їх закриття, підвищуючи надійність конструкцій та зменшуючи витрати на обслуговування [26]. Окрему роль відіграють інноваційні виробничі процеси,



Рис. 5. Систематизація фасадного декору для створення онлайн-конструктора



Рис. 6. Приклад згенерованої 3D-моделі будинку за допомогою онлайн-конструктора

що впроваджуються на орбіті, зокрема на Міжнародній космічній станції (МКС). Серед них: біологічний друк, кристалізація речовин високої чистоти, лиття суперсплавів, вирощування людських стовбурових клітин та керамічна стереолітографія – усі ці технології демонструють унікальні можливості космічного виробництва [1].

Українські вчені (Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного) проводили дослідження в галузі високоміцних накомполітичних матеріалів (для створення тонкостінних елементів ракет-носіїв), які за допомогою методу модифікації структури використовуються також для підвищення ефективності традиційних класів будівельних матеріалів: оптимізації характеристик бетонних сумішей; в'язучих речовин; емульсій; полімерних нанопленок; зносостійких і самоочисних покриттів, довговічних фарб і тонких плівок; клейових матеріалів із керованими параметрами; аерогелів. ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля розробило унікальну технологію іонно-плазмового нанесення зносостійких покриттів мідних кристалізаторів. А приватне акціонерне товариство «Елміз» створило технологію виробництва пористого литого алюмінію з унікальною комбінацією теплофізичних, механічних, акустичних та хімічних властивостей, що є основою нових технічних розробок у сфері космічної техніки. Окрім перерахованих сфер застосування, накомполіти використовують також для створення «біоімітуючих» матеріалів; концептуальних «інтелектуальних» матеріалів; для адитивного виробництва (3D-друк) та високопродуктивних бетонних сумішей для

3D-друку. Дослідженнями працездатності елементів конструкцій та оцінкою міцності перспективних композитних матеріалів займався Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренко. На базі Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського були проведені дослідження з розроблення технологій виготовлення оболонкових і силових елементів космічних апаратів із полімерних композитів, доповнених багатшаровим внутрішнім покриттям. Паралельно в Українському державному хіміко-технологічному університеті створено склад і технологію виробництва кордієритової кераміки для потреб надвисокошвидкісної авіаційної та ракетної техніки. Цей матеріал також успішно застосовується як тепло- та електроізоляційний складник і як основа для сучасних композитів [3]. Висока енергоефективність – одна з ключових умов у сфері космічних досліджень через жорсткі обмеження в ресурсах. Розроблені для космосу технології, такі як сонячні енергосистеми та методи збереження енергії, поступово були адаптовані до земного середовища, ставши надійними й економічно вигідними рішеннями для генерації та акумуляції відновлюваної енергії. Закриті екологічні системи, призначені для циркуляції води й повітря в умовах обмеженого простору, надали нові підходи до екологічного управління ресурсами. Перенесення цих технологій на наземні будівельні об'єкти дає змогу створювати стійкі ресурсозберігаючі споруди з мінімальним впливом на довкілля. Зокрема, українські науковці розробили систему бездротової індуктивної передачі енергії, що використовується в екологічно безпечних технологіях [1; 20].

Залучення космічних технологій до архітектурного дизайну відкриває нові шляхи для подолання глобальних викликів – від кліматичних змін і виснаження ресурсів до занепаду інфраструктури. Використання 3D-друку, модульних рішень, інноваційних матеріалів і систем енергоефективності дає змогу підвищити якість проектування та будівництва. Інтеграція цих технологій може відігравати ключову роль у відновленні України після війни, забезпечуючи довговічність, гнучкість та естетичну привабливість нової інфраструктури, а також покращуючи умови життя у штучному середовищі.

ВИСНОВКИ

Космічні умови, зокрема обмеженість ресурсів та екстремальні впливи, стимулюють створення високотехнологічних будівельних рішень, здатних прискорити процес зведення об'єктів, підвищити їх довговічність та здатність до адаптації. У цьому контексті модульність, 3D-друк і новітні матеріали стають визначальними чинниками трансформації сучасного українського архітектурного дизайну. Роль дизайнера полягає у вмілому впровадженні таких рішень, що підсилює екологічну й технологічну сталість проєктів. Подальше дослідження космічних технологій обіцяє значні здобутки в галузі дизайну, допомагаючи вирішувати професійні виклики високого рівня та сприяючи вдосконаленню стратегій сталого управління ресурсами.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Агліуллін Р.М., Антоненко І.В., Вишневська О.В., Кузьменко В.В. Інтеграція космічних технологій у середовище українського архітектурного дизайну. *Art and design*. 2024. № 4. С. 62–75. DOI: <https://doi.org/10.30857/2617-0272.2024.4.5>.
- [2] Аерокосмічний портал України. URL: <http://www.space.com.ua> (дата звернення: 27.04.2025).
- [3] Аранчий Д. Параметрична модульна станція на поверхні Місяця. *Dmytro Aranchii Architects*. URL: <http://aranchii.com/ua/blog/misiats-moon-station/> (дата звернення: 22.09.2024).
- [4] Благостова О.О., Печерцев О.О. Використання традиційних та новітніх будівельних технологій при проектуванні екологічних поселень. *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т. 98. № 4. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2019_98_4_31 (дата звернення: 02.10.2024).
- [5] Бутко К. Digital Twin для будівництва та управління нерухомістю. Запуск стартапу під час війни від Urbanistika Hub. *Pragmatika Media*. URL: <https://pragmatika.media/digital-twin-dlia-budivnytstva-ta-upravlinnia-nerukhomosti-zapusk-startapu-pid-chas-vijny-vid-urbanistika-hub/> (дата звернення: 29.09.2024).

- [6] Гавриляк І. Нова космічна економіка: можливості та перспективи. *ГЛАВКОМ*. URL: <https://glavcom.ua/digest/nova-kosmichna-ekonomika-mozhливosti-ta-perspektivi-807637.html> (дата звернення: 16.12.2024).

- [7] Україна візьме участь у програмах NASA з освоєння Місяця і вивчення Марса – голова Держкосмосу. *Гордон*. URL: <https://gordonua.com/ukr/news/society/ukrajina-vizme-uchast-v-programah-nasa-z-osvojenja-misjatsja-i-vivchennja-marsa-glava-derzhkosmosu-1548371.html> (дата звернення: 27.04.2025).

- [8] Губарева В. Цифрова відбудова: як сучасні технології допоможуть зберегти архітектурну спадщину? *Рубрика*. URL: <https://rubryka.com/article/3d-skanuvannya-arhitektury/> (дата звернення: 03.05.2025).

- [9] Кіреєва К. Космічна політика Європи: де місце України серед зірок ЄС? *ADASTRA*. URL: <https://adastra.org.ua/blog/kosmichna-politika-yevropi-de-misce-ukrayini-sered-zirok-yes> (дата звернення: 15.03.2025).

- [10] Кошова С. Інноваційні тенденції створення ракетно-космічної техніки: аспект публічного управління. *Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення*. 2024. № 7. С. 94–105. DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2024-7-94-105>.

- [11] Куссіль Н.М. Мрії про Космос як драйвер науки, освіти та інновацій. *Аерокосмічний портал України*. URL: <https://space.com.ua/2021/04/16/mriyi-pro-kosmos-yak-drajver-nauki-osviti-ta-innovatsij/> (дата звернення: 09.05.2025).

- [12] Куссіль Н., Федоров О., Шелестов А. Моніторинг досягнення цілей сталого розвитку України за супутниковими даними. Київ : Наукова думка, 2023. 164 с. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1865-5>.

- [13] Лутович Д. Космічні технології у війні проти РФ: як вони впливають на перебіг бойових дій в Україні. *ФОКУС*. URL: <https://focus.ua/uk/voennyenovosti/676457-viyna-v-ukrajini-yake-znachennya-mayut-kosmichni-tehnologiji-v-konflikti-analiz> (дата звернення: 12.04.2025).

- [14] Парфентьев І.О., Михальчук Т.Г. Нові технології швидкого та економічного зведення житлових будинків. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2016. № 5. С. 25–31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2016_5_6 (дата звернення: 02.09.2024).

- [15] Проєкти Державного космічного агентства увійшли до оновленого глобального сценарію дослідження поверхні Місяця від ISECG. *Асоціація «КОСМОС»*. URL: <https://a-kosmos.com.ua> (дата звернення: 19.02.2025).

- [16] Рец І. Маршрут Україна – Місяць: як наша країна готується до колонізації космосу. *Сьогодні*. URL: <https://forpost.lviv.ua/daidzhest/25819-marshrut-ukraina-misiats-iak-nasha-kraina-hotuietsia-dokolonizatsii-kosmosu> (дата звернення: 27.04.2025).

- [17] Родина polegлого ірпінчанина Ярослава Березова отримала перший в Україні будинок, надрукований на 3D-принтері. *SpaceMag*. URL: <https://>

spacemag.com.ua/fashion/news/rodyna-poleglogo-irpinchanyna-yaroslava-berezova-otrymala-pershyy-v-ukrayini-budynok-nadrukovanyj-na-3d-prynteri/ (дата звернення: 29.10.2024).

[18] Стасюк І. Українські конструктори презентували проєкт поселення на Місяці. *Хмарочос*. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2019/12/11/ukrayinski-konstruktory-prezentuvaly-proyekt-poselennya-na-misyatsi/> (дата звернення: 27.04.2025).

[19] Українці побудують на Місяці власну базу: деталі амбітного проєкту. *Politeka*. URL: <https://politeka.net/uk/news/630752-ukrainsy-postroyat-na-lune-sobstvennuyu-bazu-detali-ambitsioznogo-proekta> (дата звернення: 27.04.2025).

[20] Цікаві факти про науку та винаходи – дивовижні досягнення вітчизняних вчених. *Новини ФАКТ*. URL: <https://fact-news.com.ua/tsikavi-fakti-pro-ukrainsku-nauku-ta-vinaxodi-divovizhni-dosyagnennya-vitchiznyanix-vchenix> (дата звернення: 30.09.2024).

[21] Шевченко Л. Краще за рентген: що таке мюони і як космічні технології допоможуть у відбудові України. *24 Канал*. URL: https://24tv.ua/vidbudova-ukrayini-pislya-viyni-shho-take-myuoni-yaku-tehnologiyu_n2699788 (дата звернення: 29.04.2025).

[22] A research lab at MIT inventing self-assembly and programmable material technologies. *Self-Assembly Lab*. URL: https://selfassemblylab.mit.edu/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com (дата звернення: 21.01.2025).

[23] Alvarez L. What is a SuperAdobe home, and why is it so special? *AmazingArchitecture*. URL: <https://amazingarchitecture.com/articles/what-is-a-superadobe-home-and-why-is-it-so-special> (дата звернення: 02.10.2024).

[24] Amy Smith. *MIT D-Lab*. URL: <https://d-lab.mit.edu/about/people/amy-smith> (дата звернення: 15.01.2025).

[25] Balbek S. RE:Ukraine Villages. *Balbek*. URL: <https://www.balbek.com/reukraine-villages-en> (дата звернення: 07.02.2025).

[26] Bliss L. The New Alchemy: How Self-Healing Materials Could Change the World. *Bloomberg*. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2014-09-15/the-new-alchemy-how-self-healing-materials-could-change-the-world> (дата звернення: 04.09.2024).

[27] *Boeing*. URL: <https://www.boeing.com/> (дата звернення: 09.01.2025).

[28] Carbon Footprint Assessment: Case Studies for Hemp-Based Eco-Concrete Masonry Blocks. *Buildings*. 2024. Vol. 14(10):3150. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14103150>.

[29] Chandler N. How Has NASA Improved Solar Energy? *HowStuffWorks*. URL: <https://science.howstuffworks.com/innovation/nasa-inventions/nasa-improve-solar-energy.htm>. (дата звернення: 02.09.2024).

[30] Design for Second Life Innovations. *MIT D-Lab*. URL: <https://d-lab.mit.edu/innovation-practice/design-second-life-innovations> (дата звернення: 06.01.2025).

[31] Dr. Anna Ploszajski: Explaining the Future of Materials. *Western Digital Corporate Blog*. URL: <https://blog.westerndigital.com/dr-anna-ploszajski-explaining-the-future-of-materials/> (date of access: 23.01.2025).

[32] Fakharany N. ICON Unveils Groundbreaking Construction Innovations at SXSW: Revolutionizing Building with Robotics, AI, and Sustainable Materials. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/1014514/icon-unveils-groundbreaking-construction-innovations-at-sxsw-revolutionizing-building-with-robotics-ai-and-sustainable-materials> (дата звернення: 05.09.2024).

[33] Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Structural Engineering. *TU Delft*. URL: <https://online-learning.tudelft.nl/courses/frp-composites-in-structural-engineering/> (дата звернення: 05.09.2024).

[34] Florian M.-C. The Promise of Accessibility: Can Modular Systems Contribute to Democratizing the Design Process? *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/1015799/the-promise-of-accessibility-can-modular-systems-contribute-to-democratizing-the-design-process> (дата звернення: 01.09.2024).

[35] Florian M.-C. Ursula von der Leyen and Francis Kéré Open the Bauhaus Earth Conference. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/983511/ursula-von-der-leyen-and-francis-kere-open-the-bauhaus-earth-conference> (дата звернення: 06.02.2025).

[36] Gibbs A. This designer creates magic from everyday materials. *MIT Technology Review*. URL: <https://www.technologyreview.com/2024/08/27/1096638/skylar-tibbits-4-d-printing-materials-transformation/> (дата звернення: 12.02.2025).

[37] Gugliotta F. «Our homes, our memory». Slava Balbek, Ukrainian architect at war, speaks. *Interni Magazine*. URL: <https://www.internimagazine.com/features/interviews/le-nostre-case-la-nostra-memoria-parla-slava-balbek-architetto-ucraino-in-guerra/> (дата звернення: 12.02.2025).

[38] Harrouk C. An Underground House in Ukraine and an Extension for the Glasgow School of Art: 12 Unbuilt Projects Submitted by our Readers. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/943829/an-underground-house-in-ukraine-and-an-extension-for-the-glasgow-school-of-art-12-unbuilt-projects-submitted-by-our-readers> (дата звернення: 15.09.2024).

[39] Havelar. URL: <https://www.havelar.com/> (дата звернення: 05.09.2024).

[40] Hempire. URL: <https://www.hempire.com.ua/> (дата звернення: 29.12.2024).

[41] International Space University. URL: <https://www.isunet.edu/> (дата звернення: 09.01.2025).

[42] Lizbeth B.D.L.T., Wood D. Exploratory Methods and Techniques for Space Technology Development and Space Mission Concept Development. *IAC 2020*. 2021. P. 15–40.

[43] Locations. *Oceaneering*. URL: <https://www.oceaneering.com/locations/> (дата звернення: 09.01.2025).

[44] Montjoy V. Off-Site Construction is Radically Changing the Rules of Architectural Design. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/971874/off-site-construction-is-radically-changing-the-rules-of-architectural-design> (дата звернення: 02.09.2024).

[45] NASA. In-Situ Resource Utilization (ISRU). *NASA*. URL: <https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru/> (дата звернення: 02.09.2024).

[46] NASA. URL: <https://www.nasa.gov/> (дата звернення: 09.01.2025).

[47] Parkes J. Makhno Studio designs conceptual settlement within Martian crater. *Dezeen*. URL: <https://www.dezeen.com/2022/01/24/makhno-plan-c-mars-settlement-concept-architecture/> (дата звернення: 02.10.2024).

[48] Patrick M. Cosmopolitical bodies: An architecture of space. *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 157. P. 215–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.003>

[49] Patrick M., Grewal G., Chelagat W., Shannon G. Planetary health justice: feminist approaches to building in rural Kenya. *Buildings and Cities*. 2020. Vol. 1, no. 1. P. 308–324. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.18>.

[50] Sasakawa International Center for Space Architecture (SICSA). *University of Houston*. URL: <https://sicsa.egr.uh.edu/> (дата звернення: 09.01.2025).

[51] Sevtsuk A. Street smarts. *MIT News*. URL: <https://news.mit.edu/2024/street-smarts-thriving-city-spaces-andres-sevtsuk-1215> (дата звернення: 15.01.2025).

[52] Souza E. 4D Printing? Bridging Additive Manufacturing with Smart Materials. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials> (дата звернення: 12.02.2025).

[53] Souza E. Smart Facades: Buildings that Adapt to the Climate Through their Skin. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/922537/smart-facades-buildings-that-adapt-to-the-climate-through-their-skin> (дата звернення: 12.02.2025).

[54] Technologist M.P.I. Satellite Technologies as Public Interest Tech: an Interview with Danielle Wood. *The Public Interest Technologist*. URL: <https://technologist.mit.edu/pit-and-space-technology-danielle-wood/> (дата звернення: 09.01.2025).

[55] Wood D, et al. Challenges and progress in applying space technology in support of the sustainable development goals. *Acta Astronautica*. 2024. Vol. 219. P. 678–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.03.064>.

[56] Wood D. Six space technologies we can use to improve life on Earth. *MIT Media Lab*. URL: <https://www.media.mit.edu/posts/6-space-technologies-we-can-use-to-improve-life-on-earth/> (дата звернення: 15.01.2025).

REFERENCES

[1] Ahliullin, R., Antonenko, I., Vyshnevskaya, O., & Kuzmenko, V. (2024). Intehratsiia kosmichnykh tekhnolohii u seredovyshe ukrainskoho arkhitekturnoho dyzainu [Integrating space technologies into ukrainian architectural design]. *Art and design*, 4, 62–75. DOI: <https://doi.org/10.30857/2617-0272.2024.4.5> [in Ukrainian].

[2] *Aerokosmichnyi portal Ukrainy*. [Aerospace Portal of Ukraine]. (2023). Retrieved from: <http://www.space.com.ua> [in Ukrainian].

[3] Aranchyi, D. (2019). Parametrychna modulna stantsiia na poverkhni Misiatsia [Parametric modular station on the surface of the Moon]. *Dmytro*

Aranchii Architects. Retrieved from: <http://aranchii.com/ua/blog/misiats-moon-station/> [in Ukrainian].

[4] Blahovestova, O.O., & Pechertsev, O. (2019). Vykorystannia tradytsiinykh ta novitnykh budivelnnykh tekhnolohii pry proektuvanni ekolohichnykh poselen [Using traditional and modern construction technologies in the design of ecological settlements]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 98(4), 5–10. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2019_98_4_31 [in Ukrainian].

[5] Butko, K. (2024). Digital Twin dlia budivnytstva ta upravlinnia nerukhomistiu. Zapusk startapu pid chas viiny vid Urbanistyka Hub. [Digital Twin for construction and property management. Launching a startup during wartime from Urbanistyka Hub]. *Pragmatika Media*. Retrieved from: <https://pragmatika.media/digital-twin-dlia-budivnytstva-ta-upravlinnia-nerukhomistiu-zapusk-startapu-pid-chas-viiny-vid-urbanistyka-hub/> [in Ukrainian].

[6] Havryliak, I. (2021). Nova kosmichna ekonomika: mozhlyvosti ta perspektyvy. [New space economy: opportunities and prospects. HEAD]. *HLAVKOM*. Retrieved from: <https://glavcom.ua/digest/nova-kosmichna-ekonomika-mozhlyvosti-ta-perspektivi-807637.html> [in Ukrainian].

[7] HORDON. (2021). Ukraina vizme uchast u prohramakh NASA z osvoiennia Misiatsia i vyvchennia Marsa – holova Derzhkosmosu. [Ukraine will participate in NASA programs to explore the Moon and study Mars – the head of the State Space Agency]. *Hordon*. Retrieved from: <https://gordonua.com/ukr/news/society/ukrajina-vizme-uchast-v-programah-nasa-z-osvoienja-misjatsja-i-vyvchennja-marsa-glava-derzhkosmosu-1548371.html> [in Ukrainian].

[8] Hubareva, V. (2023). Tsyfrova vidbudova: yak suchasni tekhnolohii dopomozhut zberehty arkhitekturnu spadshchynu? [Digital reconstruction: how will modern technologies help preserve architectural heritage?]. *Rubryka*. Retrieved from: <https://rubryka.com/article/3d-skanuvannya-arhitektury/> [in Ukrainian].

[9] Kirieieva, K. (2024). Kosmichna polityka Yevropy: de mistse Ukrainy sered zirok YeS? [Europe's Space Policy: Where Does Ukraine Place Among the EU Stars?]. *ADASTRA*. Retrieved from: <https://adastra.org.ua/blog/kosmichna-politika-yevropi-de-misce-ukrayini-sered-zirok-yes> [in Ukrainian].

[10] Koshova, S. (2024). Innovatsiini tendetsii stvorennia raketno-kosmichnoi tekhniki: aspekt publichnoho upravlinnia. [Innovative trends in the creation of rocket and space technology: a public administration aspect]. *Publichne upravlinnia: kontseptsii, paradyhma, rozvytok, udoskonalennia*, (7), 94–105. DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2024-7-94-105> [in Ukrainian].

[11] Kussul, N.M. (2021). Mrii pro Kosmos yak draiver nauky, osvity ta innovatsii [Dreams about Space as a driver of science, education and innovation]. *Aerospace Portal of Ukraine*. Retrieved from: <https://space.com.ua/2021/04/16/mriyi-pro-kosmos-yak-drajver-nauki-osvity-ta-innovatsij/> [in Ukrainian].

[12] Kussul, N., Fedorov, O., & Shelestov, A. (2023). Monitorynh dosyahnennya tsiley staloho rozvytku Ukrainy za suputnykovymi danymi. [Monitoring of sustainable development goals using satellite

data]. *Naukova Dumka*. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1865-5> [in Ukrainian].

[13] Lutovych, D. (2024). Kosmichni tekhnologii u viini proty RF: yak vony vplyvaiut na perebih boiovykh dii v Ukraini. [Space technologies in the war against the Russian Federation: how they affect the course of hostilities in Ukraine]. *FOKUS*. Retrieved from: <https://focus.ua/uk/voennye-novosti/676457-viyna-v-ukrajini-yake-znachennya-mayut-kosmichni-tehnologiji-v-konflikti-analiz> [in Ukrainian]

[14] Parfentiev, I.O., & Mykhalchuk, T.H. (2016). Novi tekhnologii shvydkoho ta ekonomichnoho zvedennia zhytlovykh budynkiv. [New technologies for fast and economical construction of residential buildings]. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunku v budivnytstvi*, (5), 25–31. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2016_5_6 [in Ukrainian]

[15] Proiekt Derzhavnoho kosmichnoho ahentstva uviishly do onovlenoho hlobalnoho stsensarii doslidzhennia poverkhni Misiatsia vid ISECG. [The projects of the State Space Agency were included in the updated global scenario for exploring the lunar surface from ISECG]. (2024). *Asotsiatsiia «KOSMOS»*. Retrieved from: <https://a-kosmos.com.ua> [in Ukrainian]

[16] Rets, I. (2020). Marshrut Ukraina – Misiats: yak nasha kraina hotuietsia do kolonizatsii kosmosu. [Ukraine – Moon route: how our country is preparing for space colonization]. *Sohodni*. Retrieved from: <https://forpost.lviv.ua/daidzhest/25819-marshrut-ukraina-misiats-iak-nasha-kraina-hotuietsia-do-kolonizatsii-kosmosu> [in Ukrainian]

[17] Rodyna polehloho irpinchanyia Yaroslava Berezova otrymala pershyi v Ukraini budynok, nadrukovanyi na 3D-prynteri. [The family of the deceased Irpinchany Yaroslav Berezov received the first house in Ukraine printed on a 3D printer]. (2024). *SpaceMag*. Retrieved from: <https://spacemag.com.ua/fashion/news/rodyna-poleglogo-irpinchanyia-yaroslava-berezova-otrymala-pershyj-v-ukrayini-budynok-nadrukovanyj-na-3d-prynteri/> [in Ukrainian].

[18] Stasiuk, I. (2019). Ukrainski konstruktory prezentuvaly proiekt poselennia na Misiatsi. [Ukrainian designers presented a project for a settlement on the Moon]. *Khmarochos*. Retrieved from: <https://hmarochos.kiev.ua/2019/12/11/ukrayinski-konstruktory-prezentuvaly-proiekt-poselennya-na-misyatsi/> [in Ukrainian].

[19] Ukraintsi pobuduiut na Misiatsi vlasnu bazu: detali ambitnoho proektu. [Ukrainians will build their own base on the Moon: details of an ambitious project]. (2024). *Politeka*. Retrieved from: <https://politeka.net/uk/news/630752-ukraintsy-postroyat-na-lune-sobstvennyu-bazu-detali-ambitsioznogo-proekta> [in Ukrainian].

[20] Tsikavi fakty pro nauku ta vynakhody – dyvovyzhni dosiahnennia vitchyznanykh vchenykh. [Interesting facts about science and discoveries – extraordinary achievements of scientists]. (2024). *Novyny FAKT*. Retrieved from: <https://fact-news.com.ua/tsikavi-fakti-pro-ukrainsku-nauku-ta-vinaxodivovizhni-dosyagnennya-vitchiznyanix-vchenix>.

[21] Shevchenko, L. (2024). Krashche za renthen: shcho take miuony i yak kosmichni tekhnologii

dopomozhut u vidbudovi Ukrainy. [Better than X-rays: what are muons and how space technologies will help rebuild Ukraine]. *24 Channel*. Retrieved from: https://24tv.ua/vidbudova-ukrayini-pislya-viyni-shho-take-myuoni-yaku-tehnologiyu_n2699788 [in Ukrainian].

[22] *Self-Assembly Lab*. (2024). Retrieved from: https://selfassemblylab.mit.edu/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com [in English].

[23] Alvarez, L. (2023). What is a SuperAdobe home, and why is it so special? *Amazing Architecture*. Retrieved from: <https://amazingarchitecture.com/articles/what-is-a-superadobe-home-and-why-is-it-so-special> [in English].

[24] Amy Smith. (2024). *MIT D-Lab*. Retrieved from: <https://d-lab.mit.edu/about/people/amy-smith> [in English].

[25] Balbek, S. (2023). RE:Ukraine Villages. *Balbek*. Retrieved from: <https://www.balbek.com/reukraine-villages-en> [in Ukrainian].

[26] Bliss, L. (2014). The New Alchemy: How Self-Healing Materials Could Change the World. *Bloomberg*. Retrieved from: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2014-09-15/the-new-alchemy-how-self-healing-materials-could-change-the-world> [in English].

[27] *Boeing*. (2024). Retrieved from: <https://www.boeing.com/> [in English].

[28] Carbon Footprint Assessment: Case Studies for Hemp-Based Eco-Concrete Masonry Blocks. (2024). *MDPI*. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/10/3150> [in English].

[29] Chandler, N. (1970). How Has NASA Improved Solar Energy? *HowStuffWorks*. Retrieved from: <https://science.howstuffworks.com/innovation/nasa-inventions/nasa-improve-solar-energy.htm> [in English].

[30] Design for Second Life Innovations. (2024). *MIT D-Lab*. Retrieved from: <https://d-lab.mit.edu/innovation-practice/design-second-life-innovations> [in English].

[31] Dr. Anna Ploszajski: Explaining the Future of Materials. (2021). *Western Digital Corporate Blog*. Retrieved from: <https://blog.westerndigital.com/dr-anna-ploszajski-explaining-the-future-of-materials/> [in English].

[32] Fakharany, N. (2024). ICON Unveils Groundbreaking Construction Innovations at SXSW: Revolutionizing Building with Robotics, AI, and Sustainable Materials. *ArchDaily*. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/1014514/icon-unveils-groundbreaking-construction-innovations-at-sxsw-revolutionizing-building-with-robotics-ai-and-sustainable-materials> [in English].

[33] Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Structural Engineering (2024). *TU Delft*. Retrieved from: <https://online-learning.tudelft.nl/courses/frp-composites-in-structural-engineering/> [in English].

[34] Florian, M.-C. (2024). The Promise of Accessibility: Can Modular Systems Contribute to Democratizing the Design Process? *ArchDaily*. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/1015799/the-promise-of-accessibility-can-modular-systems-contribute-to-democratizing-the-design-process> [in English].

[35] Florian, M.-C. (2022). Ursula von der Leyen and Francis Kéré Open the Bauhaus Earth Conference.

ArchDaily. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/983511/ursula-von-der-leyen-and-francis-kere-open-the-bauhaus-earth-conference> [in English].

[36] Gibbs, A. (2024). This designer creates magic from everyday materials. *MIT Technology Review*. Retrieved from: <https://www.technologyreview.com/2024/08/27/1096638/skyler-tibbits-4-d-printing-materials-transformation/> [in English].

[37] Gugliotta, F. (2024). «Our homes, our memory». Slava Balbek, Ukrainian architect at war, speaks. *Interni Magazine*. Retrieved from: <https://www.internimagazine.com/features/interviews/le-nostre-case-la-nostra-memoria-parla-slava-balbek-architetto-ucraino-in-guerra/> [in English].

[38] Harrouk, C. (2020). An Underground House in Ukraine and an Extension for the Glasgow School of Art: 12 Unbuilt Projects Submitted by our Readers. *ArchDaily*. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/943829/an-underground-house-in-ukraine-and-an-extension-for-the-glasgow-school-of-art-12-unbuilt-projects-submitted-by-our-readers> [in English].

[39] Havelar. (2024). Retrieved from: <https://www.havelar.com/> [in English].

[40] Hempire. (2024). Retrieved from: <https://www.hempire.com.ua/> [in English].

[41] International Space University. (2024). Retrieved from: <https://www.isunet.edu/> [in English].

[42] Lizbeth B.D.L.T., & Wood, D. (2021). Exploratory Methods and Techniques for Space Technology Development and Space Mission Concept Development. *IAC 2020*, 15–40 [in English].

[43] Locations. (2024). *Oceaneering*. Retrieved from: <https://www.oceaneering.com/locations/> [in English].

[44] Montjoy, V. (2021). Off-Site Construction is Radically Changing the Rules of Architectural Design. *ArchDaily*. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/971874/off-site-construction-is-radically-changing-the-rules-of-architectural-design> [in English].

[45] NASA. In-Situ Resource Utilization (ISRU). (2024). *NASA*. Retrieved from: <https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru> [in English].

[46] NASA. (2024). Retrieved from: <https://www.nasa.gov/> [in English].

[47] Parkes, J. (2022). Makhno Studio designs conceptual settlement within Martian crater. *Dezeen*. Retrieved from: <https://www.dezeen.com/2022/01/24/makhno-plan-c-mars-settlement-concept-architecture/> [in English].

[48] Patrick, M. (2019). Cosmopolitical bodies: An architecture of space. *Acta Astronautica*, 157, 215–224. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.003> [in English].

[49] Patrick, M., Grewal, G., Chelagat, W., & Shannon, G. (2020). Planetary health justice: feminist approaches to building in rural Kenya. *Buildings and Cities*, 1(1), 308–324. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.18> [in English].

[50] Sasakawa International Center for Space Architecture (SICSA). (2024). *University of Houston*. Retrieved from: <https://sicsa.egr.uh.edu/> [in English].

[51] Sevtsuk, A. (2024). Street smarts. *MIT News*. Retrieved from: <https://news.mit.edu/2024/street-smarts-thriving-city-spaces-andres-sevtsuk-1215> [in English].

[52] Souza, E. (2024). 4D Printing? Bridging Additive Manufacturing with Smart Materials. *ArchDaily*. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/966556/have-you-heard-of-4d-printing-bridging-additive-manufacturing-with-smart-materials> [in English].

[53] Souza, E. (2019). Smart Facades: Buildings that Adapt to the Climate Through their Skin. *ArchDaily*. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/922537/smart-facades-buildings-that-adapt-to-the-climate-through-their-skin> [in English].

[54] Technologist, M.P.I. (2024). Satellite Technologies as Public Interest Tech: an Interview with Danielle Wood. *The Public Interest Technologist*. Retrieved from: <https://technologist.mit.edu/pit-and-space-technology-danielle-wood/> [in English].

[55] Wood, D., et al. (2024). Challenges and progress in applying space technology in support of the sustainable development goals. *Acta Astronautica*, 219, 678–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.03.064> [in English].

[56] Wood, D. (2017). Six space technologies we can use to improve life on Earth. *MIT Media Lab*. Retrieved from: <https://www.media.mit.edu/posts/6-space-technologies-we-can-use-to-improve-life-on-earth/> [in English].

ABSTRACT

Antonenko I., Ahliullin R. Space Innovations in Architectural Design and Their Impact on Ukraine's Post-War Reconstruction

This article explores the integration of space technologies into Ukrainian architectural design as a means of enhancing the resilience and efficiency of construction during post-war recovery. It examines international and domestic experiences, including projects such as modular lunar stations, 3D and 4D printing, the use of smart materials, and the adaptation of vernacular architecture principles. The study analyzes the application potential of closed-loop systems, in-situ resource utilization (ISRU), Building Information Modeling (BIM), and online construction platforms in architectural practice. The article also highlights the role of Ukrainian designers and researchers in the global context of applying space innovations in construction,

emphasizing the importance of modularity, energy efficiency, and materials science in improving the quality of the built environment.

Purpose. The aim of this study is to investigate the process of implementing space technologies into Ukrainian architectural design and to explore how this implementation can contribute to the reconstruction of war-damaged structures in Ukraine.

Methodology. The research employs informational-investigative and visual-analytical approaches, combined with methods of systematization and comparative analysis regarding the use of space technologies in architectural design.

Results. The study discusses the integration process of space innovations into Ukrainian architectural design, their impact on improving the reliability and adaptability of design objects, methods for their transformation, and their potential use in modular vernacular architecture, which often relies on local resources and techniques. It outlines possibilities and strategies for applying these technologies in the context of Ukraine's post-war rebuilding.

Scientific novelty. The study examines the practical application of space technologies in Ukrainian architectural design, identifies implementation features and challenges, and contributes to a deeper understanding of their integration into the design process.

Practical relevance. The findings may prove useful for developing design methods and strategies, as well as for educational and research purposes among students, instructors, and architects in the field of design.

Keywords: space mission, design planning, smart materials, soil, modular housing, war, reconstruction, space technologies, architectural design, modular construction, 3D printing, post-war recovery, sustainable development, innovative materials.

AUTHOR'S NOTE:

Antonenko Ihor, Senior Lecturer at the Department of Interior and Furniture Design, Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine, e-mail: tonn7171@gmail.com, orcid: 0000-0002-5762-1401.

Ahliullin Ruslan, PhD 02 Culture and arts, Associate Professor at the Department of Interior and Furniture Design, Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine, e-mail: agliullin.rm@knuatd.com.ua, orcid: 0000-0001-5923-2840

Стаття подана до редакції 27.05.2025 р.