

УДК 658.5:005.591.6

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.35.1

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

ДУБОВСЬКИЙ Є. Є.^{1*}, *асп.*

ЗАЯЦЬ Є. І.², *докт. техн. наук, проф.*

^{1*} Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: stifflerson49@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-2220-1931

² Кафедра організації і управління будівництвом, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7382-919X

Анотація. Постановка проблеми. Автоматизація в будівництві демонструє потенціал для підвищення продуктивності після багатьох років технічного розвитку та експериментів у цій галузі. Проте нинішні дослідження не надають чіткого розуміння того, як саме це відбувається, а також які суперечності та проблеми супроводжують автоматизацію будівництва. Наразі в Україні не розповсюджена практика використання будівельної роботизованої техніки, переважно через високі витрати на обладнання порівняно з оплатою праці робітників. Однак, засвідчено європейським і американським досвідом, впровадження сучасних автоматизованих технологій у будівельний процес сприяє підвищенню продуктивності, поліпшенню точності та якості виконання робіт, підвищенню рівня безпеки на будівництві. Незважаючи на велику вартість обладнання і додаткові витрати на навчання спеціалістів та обслуговування, а також обмеженість застосування, використання будівельної робототехніки може мати позитивні результати, такі як прискорення темпів виконання робіт, що викличе масштабні зміни організаційно-технологічних рішень та організаційно-технологічного проєктування в цілому. **Мета статті** – аналіз використання сучасних автоматизованих систем і виявлення технічних інновацій та їх практичного потенціалу. **Висновки.** Для отримання більш глибокого уявлення про повний потенціал автоматизації будівництва для підвищення продуктивності та пов'язаних із цим можливих наслідків проведено об'єктивний огляд інформації щодо автоматизованих технологій в будівництві. Його здійснено за допомогою методів аналізу тексту в загальнодоступних письмових документах, які охоплюють широкий спектр відповідних інформаційних джерел, включаючи наукові публікації та офіційні бази даних постачальників обладнання. Визначено основні вектори всесвітніх досліджень та існуючі технології, перевірені практикою. Визначено мету, об'єкти, завдання майбутніх досліджень.

Ключові слова: інновації; будівельна роботизована техніка; організаційно-технологічні рішення; автоматизація будівництва; автоматизовані системи

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL DESIGN OF AUTOMATION SYSTEMS

DUBOVSKY Y.Y.^{1*}, *Postgrad. Stud.*,

ZAIATS Yev.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Organization and Management of Public Works, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: stifflerson49@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-2220-1931

² Department of Organization and Management of Public Works, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7382-919X

Abstract. Formulation of the problem. Automation in construction shows the potential to improve productivity after years of technical development and experimentation in the field. However, current research does not provide a clear understanding of exactly how this happens, as well as what contradictions and problems accompany construction automation. At the moment, the practice of using construction robotic equipment is not widespread in Ukraine, mainly due to the high costs of equipment compared to the wages of workers. However, as evidenced by European and American experience, the introduction of modern automated technologies into the construction process leads to

increased productivity, improved accuracy and quality of work, and increased safety in construction. Despite the high cost of equipment and additional costs for training specialists and service personnel, as well as the limitations of its application, the use of construction robotics can have positive results, such as accelerating the pace of work, which will lead to large-scale changes in organizational and technological solutions and organizational and technological design in general. *The purpose of the article* is to analyze the use of modern automated systems and identify technical innovations and their practical potential. *Conclusions.* In order to gain a deeper understanding of the full potential of construction automation to increase productivity and the associated possible consequences, an objective review of information on automated technologies in construction was conducted. This review was carried out using text analysis techniques in publicly available written documents covering a wide range of relevant information sources, including scientific publications and official databases of equipment suppliers. The main vectors of worldwide research and existing technologies tested in practice are defined. The purpose, objects, tasks and goals of future research are defined.

Keywords: *innovations; construction robotic equipment; organizational and technological solutions; construction automation; automated systems*

Постановка проблеми. В сучасному світі будівельна галузь переживає значні зміни, які зумовлені еволюційними процесами та спонукають до впровадження нових технологій і організаційно-технологічних рішень (ОТР) у спорудження цивільних будівель за допомогою автоматизованих систем.

На сьогодні, на жаль, в Україні мало розвинена практика використання будівельної роботизованої техніки, в основному через високу вартість обладнання, порівняно з витратами на заробітну плату працівників. Як свідчить європейський і американський досвід, впровадження сучасних автоматизованих технологій в будівельний процес сприяє підвищенню продуктивності, поліпшенню точності та якості виконання робіт, підвищенню безпеки будівництва. Незважаючи на високу вартість цього обладнання, додаткові витрати на навчання спеціалістів і обслуговування та обмеженість застосування, пришвидшення виконання робіт, за умови залучення будівельних роботів, може мати позитивні наслідки.

Тому вважається за необхідне проведення дослідження впливу застосування автоматизованих систем на показники ефективності організаційно-технологічних рішень (ОТР) будівництва.

Мета статті – аналіз використання сучасних автоматизованих систем і виявлення технічних інновацій та їх практичного потенціалу.

Аналіз публікацій. Деякі вітчизняні та зарубіжні науковці схиляються до думки, що використання робототехніки в будівництві

поліпшує безпеку та продуктивність на будівельних майданчиках, пріоритетом їх досліджень стало полегшення та прискорення виконання важких, монотонних або повторюваних робіт, які можна автоматизувати, використовуючи новітні роботизовані технології.

Вивчаючи сучасний стан будівельних інновацій, Цянь Чень, Борха Гарсія де Сото, Браян Т. Адей [1] визначили найперспективніші напрями дослідження шляхом аналізу наукових публікацій за допомогою програм VOS Viewer та RapidMiner Studio. Також вони встановили перспективні сфери будівельної галузі, що викликають занепокоєння щодо впровадження автоматизованих систем у будівельний процес.

Дослідивши провідні технології адитивного виробництва в будівельній галузі, Д. В. Лаухін та Л. М. Дадіверіна [2] визначили і встановили основні недоліки, які впливають як на саму технологію використання будівельних 3D-принтерів, так і на організаційно-технологічні рішення, а саме: технологія друку залишається недосконалою щодо якості виготовлення конструкцій, хімічного складу, структури та властивостей використовуваних матеріалів, а тому існує потреба у проведенні подальших наукових досліджень.

Рамані Айягарі, Цянь Чен та Борха Гарсія де Сото [3] у своїх дослідженнях розробили дві різні моделі для традиційного будівельного ланцюга поставок (Т-БЛП) і будівельного ланцюга поставок для 3D-друку (3D-БЛП), щоб порівняти продуктивність на основі двох показників

продуктивності: сукупних зусиль і виробничої швидкості. Зусилля, використані як вхідні дані для моделювання в *Simphony.NET*, були оцінені на основі досвіду експертів, які працювали в галузі 3D-друкованих бетонних невеликих будівель в ОАЕ.

Таким чином, результати моделювання [3] свідчать, що адитивний метод виробництва зазнає на 21 % більших сукупних зусиль і на 6 % зниження продуктивності порівняно з традиційною логістикою. Це тому, що, по-перше, значення за шкалою Лайкерта розглядалися консервативно для широкого діапазону проєктів, що включають прості та архітектурно складні конструкції, і, по-друге, оскільки дослідження проведене на макрорівні, жоден із учасників традиційного будівельного ланцюга поставок не брав участі у розробленні моделі для 3D-БЛП.

Але якщо уявити передбачуваний оптимістичний будівельний ланцюжок постачання конструкцій, виготовлених за технологією 3D-друку (3ДПО-БЛП), припускаючи, що технологія та будівельні норми розроблені, то продуктивність 3ДПО-БЛП збільшилася на 13 % і сукупні зусилля зменшилися на 12 % порівняно з 3D-БЛП. Крім того, хоча ПЛП-3DD має дещо вищу продуктивність і сукупні зусилля, ніж Т-БЛП, переваги від впровадження цієї технології багаторазові, і їх можна оцінити на основі багатьох інших показників.

Джей Діксон [4] обговорював дані промислових роботів, які зараз доступні в Канаді, а також проблеми, що можуть виникнути під час масштабного впровадження автоматизованої техніки в різних галузях. Дані вказують, що великі інвестиції в роботів зосереджені в основних промислових регіонах Канади, хоча протягом останніх років вони почали поширюватися на інші регіони. За останнє десятиліття впровадження роботів поширилося як в інших галузях промисловості, так і географічно. Автор висловлює думку, що робототехніка може «вбити робочі місця» і в своїх дослідженнях доводить протилежне. Попередні хвилі

автоматизації в основному були нешкідливими, принаймні в цілому. Попри всі завдання, які взяли на себе «машини», з'явилося достатньо нових завдань для людей, щоб утримувати частку праці у виробництві приблизно постійною.

З роботизацією може бути так само. Однак може також статися, що роботи виявляться настільки компетентними та вправними, що вони братимуться за існуючі завдання швидше, ніж з'являться нові завдання для людей, і це може торкнутися багатьох галузей.

Аналізуючи результати впровадження відомих та перспективних інноваційних проєктів підвищення безпеки праці працівників та статистичні дані нещасних випадків, В. І. Федорчук-Мороз та М. В. Рудинець [5] зробили припущення щодо можливості підвищення рівня безпеки праці шляхом впровадження системи управління безпекою з орієнтацією на ризики. Це також може включати в себе створення графіка безпеки, нових орієнтованих на практику навчальних курсів (включаючи навчання з лайфрестлінгу), використання комп'ютерних технологій, а також використання 3D-технологій віртуальної реальності для навчання та перевірки знань персоналу.

Проте суттєве підвищення рівня безпеки праці також може досягатися завдяки впровадженню проєктів автоматизації робочих процесів, створенню комфортних умов праці, керуванню якістю, оптимізації графіків роботи з використанням регулярних перерв для відпочинку. Також важливими бачаться інноваційні засоби захисту, включаючи системи відстеження розташування працівників за допомогою радіочастотних міток, фітнес-браслетів та дронів.

Д. С. Іваненко та А. А. Бобраков [6] також виконали аналіз несприятливих факторів, котрі спричиняють на збільшення травматизму на робочому місці. Запропоновано ідею єдиної системи стажування. Наголошено на важливості вдосконалення теорії та інноваційних підходів у комплексній системі охорони

праці, впровадження творчих та нових методів та підходів. Крім цього, акцентовано увагу на негативних наслідках, які можуть виникнути в разі ігнорування або недостатньої уваги питанням безпеки праці та наведено схему проведення стажування, яку, на думку авторів, необхідно закріпити на рівні держави з регулярними перевірками. І, як приклад, продемонстровано застосування ефективних систем у зарубіжній практиці на будівельному виробництві.

Беда Баркокебас, Пабло Мартінес [7] описали методи оцінювання технології зовнішнього будівництва (OSC) та вдосконалення самого процесу виробництва на основі цифровізації. Цей метод ґрунтується на висновках експертів у сфері виробництва, а також на даних, які зібрані за допомогою RFID-датчиків і моделей BIM, з використанням цифрового підходу.

У публікації [7] також розглядається вплив автоматизації та стратегій, спрямованих на підвищення операційної гнучкості будівельного процесу. У цьому дослідженні використовується міжгалузевий стандартний процес інтелектуального аналізу даних (CRISP-DM) як методологія для систематичного оцінювання ефективності запропонованих заходів щодо вдосконалення процесу OSC. На думку авторів, CRISP-DM – найпоширеніша методологія для проведення поліпшень на основі даних у контексті Індустрії 4.0, де генеруються великі обсяги виробничих даних.

Удосконалення вже існуючого обладнання і створення нових приладів – невід’ємна частина шляху модернізації будівельних процесів, які можуть повністю або опосередковано впливати на неї.

Проект YHNOVA від об’єднання VatiPrint3D™ [8] – це одна з передових технологій, яка використовує унікальну технологію 3D-друку. Вона розроблена і запатентована Нантським університетом у результаті співпраці двох нантських лабораторій: LS2N (спеціалізованої на розробленні роботизованих систем) і GeM (сфокусованої на вивченні матеріалів, їх

формуванні та характеристиках). Основною метою цієї розробки стало будівництво доступного житла, яке адаптоване до рельєфу місцевості, з можливістю швидкої доставки та низькими витратами.

Ця інноваційна технологія полягає в нанесенні трьох шарів матеріалів за допомогою промислового багатошарового робота: два шари піни, що розширюється, використовуються як опалубка для третього шару – бетону. Після завершення будівництва стін піна залишається на місці, щоб забезпечити теплоізоляцію будинку без теплових містків. Траєкторії руху робота контролюються за допомогою лазерного датчика із цифрової моделі навколишнього середовища, розміщеного на плиті. Робот встановлений на автоматизованому керованому транспортному засобі (AGV), який адаптований до обмежень будівельного майданчика та забезпечує стабільність для контрольованого впорскування матеріалу.

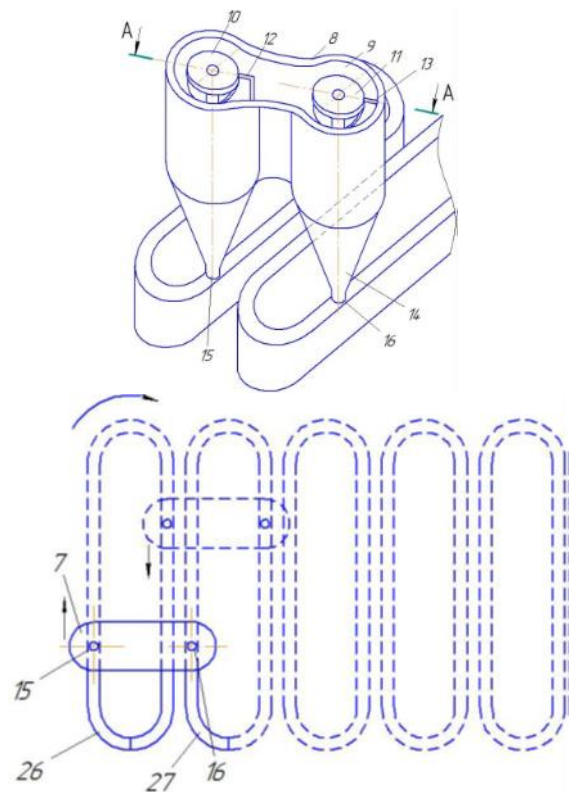


Рис. 1. Процес друкування виробів 3D-принтером удосконаленої конструкції [9]

У дослідженні С. В. Шатова, М. В. Савицького [9] розглянуто різні типи будівельних 3D-принтерів мостового типу, вивчено, які вони мають недоліки та яких

потребують поліпшень. Автори розробили удосконалену конструкцію для 3D-друку, яка забезпечує одночасне друкування декількох виробів. Аналіз параметрів розглянутих моделей 3D-принтерів вказує, що використання поліпшеного принтера може зумовити до зменшення собівартості виробництва 1 м³ продукції в 1,9...2,7 рази і зменшення металомісткості обладнання в 1,8...2,6 рази порівняно з іншими принтерами.

Але якщо подивитися на процес друкування запропонованою системою, можна стверджувати, що така модернізація набуває сенсу у виробництві конструкцій для збірного будівництва, тобто для виготовлення конструкцій на підприємствах будівельної індустрії.

Для швидкої передачі актуальної інформації від проєктантів до виконавців К.-Х. Янг [10] запропонував чотири типи програмного забезпечення (RS4B), за допомогою якого представники сектора модульного будівництва зможуть отримувати інформацію з існуючої BIM-моделі та передавати інформацію для керування роботом. RS4B призначений головним чином для того, щоб допомогти будівельнику зв'язати оригінальний дизайн із робототехнічним керуванням. Будівельник може дотримуватися покрокового процесу, щоб розділити компоненти будівлі, створити план складання та привести в дію роботів. За допомогою такого програмного пакета будівельник, який зазвичай не має достатніх знань і навичок, зможе швидко і легко впровадити роботів у виробничий процес.

Розробленням подібних технологій займалися, використавши підхід асоціації функцій на основі BIM і виявлення об'єктів у реальному часі на основі згорткової нейронної мережі (CNN), Сінге Чжао, Чіен Черн Чеа [11], які запропонували систему самоініціалізації будівельного робота для контролю будівельного процесу (використана галузь будівництва для експерименту), та відтворення виконаних робіт у BIM-моделях.

В [11] пропонується вільна від інфраструктури (тобто технологію можна

використовувати в різних галузях) та незалежна від середовища система ініціалізації мобільного робота на основі BIM для локалізації робота на відомій карті, побудованій на основі BIM. Виявлення об'єктів на основі CNN використовується для розпізнавання візуальних особливостей, тоді як геометрична та семантична інформація BIM застосовується для зв'язування із сенсорною інформацією для полегшення визначення розташування робота. Запропонований метод забезпечує життєздатне рішення для реалізації автоматизованої ініціалізації робота в різних будівельних середовищах без будь-яких вимог до попереднього сканування або розгортання інфраструктури і дозволить приймати організаційно-технологічні рішення в режимі онлайн.

К. Ванг [12] запропонував структуру, яка дозволяє взаємодіяти та співпрацювати людині та роботу у режимі цифрового копіювання у віртуальній реальності в режимі реального часу на рівні процесу, створеного шляхом об'єднання розробленої моделі BIM та еволюції, що розвивається як вбудована геометрія робочого простору, отримані від датчиків.

Також у сфері створення цифрових копій фізичного об'єкта чи процесу – цифрових близнюків, Кошик Сельва Дхануш Раві та ін. [13] описали експеримент проведений, за допомогою прототипу робота-муляра, що підтвердив потенційні напрямки майбутнього розвитку системи цифрових двійників у реальному часі. Загалом ця робота сприяє розширенню сукупності знань про двійників та управління будівництвом за допомогою технології змішаної реальності.

Виходячи з результатів досліджень, можна стверджувати, що ці технології допомагають поліпшити співпрацю та взаємодію людини і робота й уможливити дистанційне керування, моніторинг та оновлення роботизованих процесів у реальному часі.

Також, щоб підготувати підґрунтя для основних досліджень, бази даних і запобігти дублюванню в розробках, виконано аналіз існуючого будівельного обладнання,

повністю або частково роботизованого та перевіреного на практиці в будівництві.

Механізми обиралися з урахуванням специфіки робіт, щоб було можливим продемонструвати зміни ОТР на різних етапах будівництва, і пересвідчитись, чи є сенс у залученні їх до роботи на цьому етапі. Тому були розглянуті провідні технології у сфері роботизації будівництва.

1) Будівельний робот Fastbrick Robotics (FBR) Nadrian X.

Австралійська компанія Fastbrick Robotics представила свого робота-муляра Nadrian X, який, як стверджує компанія, може класти близько 200 цеглин за годину. Користувачі завантажують 3D-моделі САД будівель і будинків, і Nadrian X починає працювати, укладаючи цеглини за допомогою технології динамічної стабілізації (DST), яка підтримує стабільність робота навіть у несприятливих умовах. Замість розчину, щоб утримувати цеглини на місці, робот використовує поліуретановий клей, що дозволяє йому працювати в несприятливих умовах. Nadrian X спочатку аналізує 3D-модель САПР, а потім переходить до різання та шліфування модульних блоків залежно від вимірювань. Потім він наносить клей і розташовує цеглу на місці, і повторюватиме процес, доки не буде побудована вся конструкція.

Порівнюючи з одним із перших апаратів Construction Robotics SAM 100, можна побачити зменшену кількість можливого робочого потенціалу. Він здатний якісно укласти понад 3 000 цеглин за зміну, що у кілька разів перевищує можливості людини. Також на ринку можна придбати модель SAM100, яка встановлюється безпосередньо на місці зведення стін та забезпечує необхідну якість. Але перед початком робіт необхідно було змонтувати металеву колію, по якій би рухався робот. Нині ця модель не випускається через велику ціну і малий попит.

2) MULE (Material Unit Lift Enhancer) ML150.

MULE — це інструмент для робочої зони, який використовується для піднімання та розміщення агрегатів і матеріалів вагою

до 70 кг на відстані 3,5 м по вертикалі. Захвати та гаки розроблені для багатьох конкретних застосувань. На запит можуть бути розроблені спеціальні захвати або кріпильні пристрої, а також платформи для встановлення в зоні виконання робіт та візки для переміщення між монтажними зонами.

3) TuBot Advanced Construction Robotics — це автономний робот-в'язальник арматури, який допомагає будувати мости та настили для будівель. Робот спочатку встановлюється в задану точку, а потім повідомляє, у якому напрямку рухатися звідти. Потім він за допомогою машинного зору визначає точки зв'язування вздовж сітки арматури і дротом закріплює кожен точку. TuBot розміщений під 40-футовим автоматизованим порталом, який дозволяє йому рухатися в чотирьох напрямках: вперед або назад, ліворуч та праворуч. Перш ніж робот розпочне свою роботу, працівники укладають арматуру у вигляді сітки, а потім зв'язують окремі поперечні секції, щоб уся сітка залишалася нерухомою, а робот слідував за нею. TuBot здатний виконувати 1 000 зв'язків за годину (бригада із семи чи восьми осіб) і не потребує попереднього картографування чи калібрування для виконання своєї роботи.

4) Автономне важке будівельне обладнання Built Robotics.

Компанія Built Robotics представила нову лінію автономного важкого обладнання для будівельної галузі, включаючи бульдозер, екскаватор і STL (компактний гусеничний навантажувач). Замість того, щоб сидіти в курній кабіні протягом восьми годин, оператори можуть запрограмувати обладнання для виконання копання, сортування та штовхання шляхом уведення координат. Подібно до автономних транспортних засобів, важке обладнання оснащено тією ж технологією для виконання своїх операцій, включаючи LIDAR, GPS і підвісні датчики, щоб справлятися з різними конструкціями. Цікаво, що автономну систему навігації компанії можна встановити на будь-яку частину важкого обладнання — незалежно від виробника — і вона має

можливість повернутися до повного ручного керування, якщо це необхідно.

5) Робот-собака Boston Dynamics.

Оснащений пристроями для захоплення зображень і лазерними сканерами, Spot може патрулювати заздалегідь визначені шляхи на робочому місці та переміщатися по складній місцевості. Машина розроблена таким чином, щоб скоротити робочі години, витрачені на багаторазове виконання одних і тих самих завдань, а також забезпечувати часті оновлені зображення готової ділянки.

6) Процес виготовлення C-Fab від Branch Technology.

Технологія C-Fab (Cellular Fabrication) від Branch Technology забезпечує 3D-друк у великих масштабах для багатьох різноманітних структурно надійних конструкцій. C-Fab — це процес 3D-друкування, який створює нестандартні структури з відкритими комірками, які можна використовувати або як окрему структуру, або як риштування для будівельних матеріалів і архітектурних компонентів.

Ця технологія забезпечує систему екструзії вільної форми, яка дозволяє інженерам використовувати армовані волокнами полімери для створення будь-якої кількості структур у вільному просторі без обмежень або опорних структур. Відкриті комірки 3D-друкованої матриці дозволяють будівельникам використовувати супутні матеріали для поліпшення існуючих структурних можливостей. Система C-Fab пропонує таку саму об'ємну швидкість, як і більшість звичайних багатосарових 3D-принтерів, але використовує в 20 разів менше матеріалів завдяки конструкції з відкритими комірками.

7) Система 3D-друку Hyperion Robotics.

Hyperion Robotics — ще одна компанія, яка використовує 3D-принтери промислового розміру для будівельних робіт. 3D-принтер компанії Hyperion заснований на промислових роботах Kuka і використовує цемент для екструдера для створення будь-яких форм. Він також має механічне посилення, розміщуючи сталеві конструкції всередині друкованих елементів.

Hyperion Robotics використовує унікальні суміші бетону та перероблених відходів, адаптованих для різних середовищ, зміцнюючи 3D-друковану структуру, усуваючи відходи.

8) Розумні роботизовані ліфти Kewazo для вдосконаленого складання риштувань.

Мюнхенський стартап Kewazo прагне поліпшити будівельну логістику за допомогою аналізу даних і роботизації, першим рішенням стали роботизовані ліфти. Ліфти призначені для використання на будівельних майданчиках і промислових підприємствах. Вони зосереджені на вдосконаленні риштувань — зокрема, процесу складання — що й роблять, доставляючи деталі за потреби та в правильну точку складання. За словами Кевазо, роботизовані ліфти допомагають заощадити кошти, підвищити швидкість і безпеку, а також надавати дані в режимі реального часу про процес складання — включно з тими, хто працює на риштуваннях і матеріалах, що використовуються.

9) Okibo Autonomous Wall Plastering Robo.

Ізраїльський робототехнічний стартап Okibo планує виробляти лінійку будівельних роботів, першою з яких буде автономна установка для штукатурки стін і стель. Робот може долати пересічену місцевість будівельних майданчиків і створювати 3D-карти свого робочого середовища, щоб порівняти об'єм із BIM, аби визначити, скільки штукатурки потрібно. Робот оснащений промисловою роботизованою рукою Kuka та використовує датчики та ШІ для виконання своїх завдань з мінімальним втручанням людини.

10) Maverick від MIST.

Робот-маляр Maverick оснащений датчиками, які роблять його повністю функціональним автономним роботом. Він оснащений платформою, рукояткою та системою розпилення, що забезпечує рівномірне покриття, використовує технологію картографування та шахту, схожу на ліфт, для розпилення фарби вгору та вниз по стінах. Maverick починає з картографування кімнати, а потім

обертається, щоб зафарбувати тільки ті зони, які повинні бути покриті матеріалами для обробки стін. MIST заявив, що сподівається додати інші функції в майбутньому, які можуть спростити використання приладу

11) Масштабований робот для моніторингу будівельних майданчиків.

Компанія Scaled Robotics випустила робота для моніторингу будівельного майданчика, який відстежує хід будівництва, включаючи його якість, а також виявляє фактичні відхилення від проєкту. Чотириколісний робот використовує LIDAR і технологію автономного транспортного засобу для навігації та створення карт із використанням відеозображень та інших зібраних даних, які потім порівнюються з BIM проєкту та подаються керівникам проєкту, щоб забезпечити повний огляд його статусу. Роботів уже розгорнули на кількох будівельних майданчиках по всьому світу, включаючи Dura Vermeer у Нідерландах та Kier у Великобританії.

12) Apis Cor 3D-printer.

Розумна машина, що негайно доставляється до місця виконання робіт, потребує мінімуму часу й енергії для того, щоб розпочати роботу в польових умовах. Принтер має компактні габарити 4×1,6×1,5 м. Важить 2 тонни — приблизно як позашляховик. Тому для його транспортування можна використовувати стандартну спецтехніку. Матеріал друкування: бетон. Apis Cor, будівельна компанія, базується в Сан-Франциско та, за інформацією розробників, зможе надрукувати будинок в 3D менше ніж за 24 години.

13) ICON Vulcan II.

3D-принтер має висоту 3,5 м та може друкувати стіни висотою 2,6 м. По ширині деталі може бути довжиною до 28 м. У процесі будівництва будинку 3D-принтер

подає смуги матеріалу шириною 5 см і висотою 2 см. Швидкість друкування в горизонтальній площині варіюється від 13 до 17 см/с. Щоб надрукувати будинок, пристрою потрібно до трьох днів залежно від розмірів. Що стосується будівельних матеріалів, 3D-принтер повністю сумісний з технологією ICON Lavacrete, портландцементним матеріалом, який має міцність на стиск 413 бар під час друкування, пружність та високу теплову масу.

Висновки

Вивчивши практику впровадження та використання автоматизованих і роботизованих систем у будівельний процес, дійшли висновків, що подальшого дослідження потребує їх вплив на розроблення та прийняття організаційно-технологічних рішень. Також для проведення подальших досліджень поставлено такі завдання:

1) визначити процеси, які спонукають до впровадження нових технологій і організаційно-технологічних рішень спорудження цивільних будівель підвищеної поверховості;

2) систематизувати і класифікувати фактори та параметри, які визначають вплив на ОТР під час використання автоматизованих і роботизованих систем у спорудженні цивільних будівель підвищеної поверховості;

3) обґрунтувати раціональні параметри перспективних організаційно-технологічних рішень для спорудження цивільних будівель підвищеної поверховості;

4) створити передумови впровадження організаційно-технологічних рішень, враховуючи зростаючі темпи використання автоматизованих систем у спорудженні цивільних будівель підвищеної поверховості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Qian Chen, Borja García de Soto, Bryan T. Adey. Construction automation : Research areas, industry concerns and suggestions for advancement. *Automation in Construction*. October, 2018. Vol. 94. Pp. 22–38. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517311068>.
2. Лаухін Д. В., Дадіверіна Л. М. та ін. Аналіз застосування в будівельному виробництві адитивних технологій 3D-друку. *Збірник наукових праць НГУ*. 2020. № 61. С. 163–177.

3. Ramani Ramani Ayyagari, Qian Chen, Borja García de Soto. Quantifying the impact of concrete 3D printing on the construction supply chain. *Automation in Construction*. November, 2023. Vol. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523002923>.
4. Dixon Jay. La création d'une base de données Robots : article 11-633-X № 028 2020004. Jay Dixon. *Division de l'analyse économique Statistique Canada*. 2020. 21 p. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-633-x/11-633-x2020004-fra.htm>
5. Федорчук-Мороз В. І. та Рудинець М. В. Інноваційні проекти підвищення безпеки праці в сучасних умовах розвитку виробничих технологій. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 6. С. 69–74.
6. Іваненко Д. С. та Бобраков А. А. Важливість організації системи стажування в будівельній галузі для безпечної та продуктивної праці. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 58–64.
7. Beda Barkokebas, Pablo Martinez and other. Digitalization-based process improvement and decision-making in offsite construction. *Automation in Construction*. November, 2023. Vol. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580523003126>.
8. Une maison construite en quelques jours par impression 3D grâce au procédé Batiprint 3D: dossier de presse. Nantes, Ynova, 2017. 9 p.
9. Шатов С. В., Савицький М. В., Голубченко О. І. та ін. Дослідження варіантних рішень обладнання для 3d-друку будівельних виробів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1. С. 80–88.
10. C.-H. Yang, T.-H. Wu, B. Xiao, and S.-C. Kang. Design of a Robotic Software Package for Modular Home Builder. *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2019. Pp. 1217–1222.
11. Xinge Zhao, Chien Chern Cheah. BIM-based indoor mobile robot initialization for construction automation using object detection. Research article. *Automation in Construction*. Vol. 146. February, 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522005179>.
12. Wang X., Liang C. J., Menassa C. C., Kamat V. R. Real-Time Process-Level Digital Twin for Collaborative Human-Robot Construction Work. *37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2020. Pp. 1528–1535.
13. Kaushik Selva Dhanush Ravi, Ming Shan Ng, Jesús Medina Ibáñez and Daniel Mark Hall. Real-time Digital Twin of On-site Robotic Construction Processes in Mixed Reality. *38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2021. Pp. 451–458.

REFERENCES

1. Qian Chen, Borja García de Soto and Bryan T. Adey. Construction automation : research areas, industry concerns and suggestions for advancement. *Automation in Construction*. October, 2018, vol. 94, pp. 22–38. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517311068>.
2. Laukhin D.V., Dadiverina L.M. etc. *Analiz zastosuvannya v budivel'nomu vyrobnytstvi adytyvnykh tekhnolohiy 3D-druku* [Analysis of the application of additive 3D printing technologies in construction production]. *Zbirnyk naukovykh prats' NHU* [Collection of Scientific Works of NSU]. 2020, no. 61, pp. 163–77. (in Ukrainian).
3. Ramani Ramani Ayyagari, Qian Chen and Borja García de Soto. Quantifying the impact of concrete 3D printing on the construction supply chain. *Automation in Construction*. November, 2023, vol. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523002923>.
4. Dixon Jay. La création d'une base de données Robots : article 11-633-X № 028 2020004. Jay Dixon. *Division de l'analyse économique Statistique Canada*. 2020, 21 p. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-633-x/11-633-x2020004-fra.htm>. (in French).
5. Fedorchuk-Moroz V.I. and Rudynets M.V. *Innovatsiyni proyekty pidvyshchennya bezpeky pratsi v suchasnykh umovakh rozvytku vyrobnychyykh tekhnolohiy* [Innovative projects to increase labor safety in modern conditions of development of production technologies]. *Ukrayins'kyy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 6, pp. 69–74. (in Ukrainian).
6. Ivanenko D.S. and Bobrakov A.A. *Vazhlyvist' orhanizatsiyni systemy stazhuvannya v budivel'niy haluzi dlya bezpechnoyi ta produktyvnoyi pratsi* [The importance of organizing an internship system in the construction industry for safe and productive work]. *Ukrayins'kyy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 4, pp. 58–64. (in Ukrainian).
7. Beda Barkokebas, Pablo Martinez and oth. Digitalization-based process improvement and decision-making in offsite construction. *Automation in Construction*. November, 2023, vol. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580523003126>
8. Une maison construite en quelques jours par impression 3D grâce au procédé Batiprint 3D : dossier de presse. Nantes, Ynova, 2017, 9 p. (in French).
9. Shatov S.V., Savytskyi M.V., Golubchenko O.I. etc. *Doslidzhennya variantnykh rishen' obladnannya dlya 3d-druku budivel'nykh vyrobiv* [Study of variant solutions of equipment for 3d printing of construction products]. *Ukrayins'kyy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 1, pp. 80–88. (in Ukrainian).

10. Yang C.-H., Wu T.-H., Xiao B. and Kang S.-C. Design of a Robotic Software Package for Modular Home Builder. 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2019, pp. 1217–1222.
11. Xinge Zhao and Chien Chern Cheah. BIM-based indoor mobile robot initialization for construction automation using object detection. Research article. Automation in Construction. Vol. 146, February, 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522005179>.
12. Wang X., Liang C. J., Menassa C. C. and Kamat V.R. Real-Time Process-Level Digital Twin for Collaborative Human-Robot Construction Work. 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2020, pp. 1528–1535.
13. Kaushik Selva Dhanush Ravi, Ming Shan Ng, Jesús Medina Ibáñez and Daniel Mark Hall. Real-time Digital Twin of On-site Robotic Construction Processes in Mixed Reality. 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2021, pp. 451–458.

Надійшла до редакції: 01.10.2023.