

© Д.В. Лаухін¹, Л.М. Дадіверіна¹, О.М. Твердохліб², І.М. Мацюк²

¹ Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ В БУДІВЕЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ

© D. Laukhin¹, L. Dadiverina¹, A. Tverdohleb², I. Matsyuk²

¹ State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipro, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF ADDITIVE 3D-PRINTING TECHNOLOGIES APPLICATION IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Мета. Дослідження спрямовані на визначення напрямів удосконалення існуючих методів планування та організації будівництва, з урахуванням вимог та особливостей використання адитивних технологій 3D-друку.

Методика досліджень. Виконано аналіз та класифікацію сучасних адитивних технологій 3D-друку, які успішно зарекомендували себе у світовій практиці будівельного виробництва. Розглянуто технічні характеристики 3D-друку, технології, матеріали, напрямки використання будівельних 3D-принтерів та вимоги до організації будівельних майданчиків.

Результати дослідження. Визначено фактори, які впливають на використання технологій 3D-друку в будівельному виробництві України. Аналіз основних характерних аспектів адитивного виробництва для будівництва дозволив визначити необхідні кроки для підвищення ефективності використання та виділити перспективні напрямки розвитку 3D-друку.

Наукова новизна. Зроблено висновок, що активне використання 3D-друку в будівництві – питання часу, це дозволить об'єднати новітні наукові розробки в галузях техніки, технології, матеріалознавства, архітектури, дизайну, конструювання та будівництва.

Практичне значення. Таке інтегрування в нову єдину інноваційну систему передбачає вирішення цілого пласту питань та проблем, пов'язаних із необхідністю вдосконалення методів планування, організації та управління будівельним виробництвом, які б дозволили ефективно використовувати новітні адитивні технології 3D-друку в Україні.

Ключові слова: адитивні технології; 3D-принтер; 3D-друк; планування та організація будівельного виробництва.

Вступ. Актуальність поширення використання інноваційних розробок у будівельному виробництві зумовлена об'єктивними факторами розвитку світової економіки. За даними ООН, протягом наступних 10 років приблизно 4 млрд чоловік із малозабезпечених верств населення (з доходом менше \$ 3 тис. на рік) будуть мати гостру потребу в житлі [1].

Особливості, що склалися на ринку будівельних послуг в Україні, вимагають глибокого вивчення питання можливості забезпечення населення комфортним, порівняно недорогим сучасним житлом. На наш погляд, для вирішення цієї наростаючої проблеми необхідно поширити застосування інноваційних технологій в будівельній галузі, таких як 3D-технологій (будівельних принтерів), також відомих як «адитивне виробництво для будівництва»

Мета статті – аналіз, класифікація, визначення умов ефективною експлуатації існуючих адитивних технологій 3D-друку та напрямів подальших досліджень із вдосконалення методів планування та організації будівельних робіт, з урахуванням широкого впровадження 3D-принтерів у будівельній галузі України.

Основна частина. Проведений аналіз свідчить, що в більшості наукових видань, присвячених адитивним технологіям 3D-друку, пріоритетними напрямками досліджень є: 1) розвиток нових та вдосконалення існуючих технологій 3D-друку [2–5]; 2) покращення технічних характеристик 3D-принтерів [6]; 3) визначення раціональних складів робочих сумішей для 3D-принтерів, основою яких є швидкотверднучі бетони, які можуть включати до свого складу різні добавки для підвищення тих чи інших характеристик будівельних конструкцій, а також комбінуватися з різними видами фібр або зі сталевими арматурами [7]; 4) вдосконалення та розробка сучасного програмного забезпечення, що дозволяє реалізовувати складні 3D-моделі, які проектуються, та спрощують роботу операторів [8].

Поряд із зазначеними напрямками досліджень, на наш погляд, важливим є вивчення характерних особливостей адитивного виробництва в будівництві на всіх стадіях реалізації проекту, в тому числі на стадії проектування.

Дослідження та врахування впливу основних факторів 3D-друку на календарне планування, організаційно-технологічне проектування будівельних об'єктів, їх комплексів та на раціоналізацію методів організації будівельного виробництва з використанням 3D-друку передбачає проведення аналізу та класифікацію існуючих адитивних технологій в будівництві з урахуванням досвіду провідних світових фірм-лідерів в цьому сегменті ринку. Аналіз публікацій дозволяє стверджувати, що дослідження в цьому напрямку доцільні.

Адитивне виробництво для будівництва являє собою групу технологій (Additive Manufacturing), що використовує метод 3D-друку для виготовлення окремих конструкцій та будівель шляхом створення пошарових твердих об'єктів із цифрової (комп'ютерної) 3D-моделі з використанням різних матеріалів [3].

Головні фактори зростання ринку 3D-друку – попит на доступну вартість друкованих житлових будинків та можливість створювати найскладніші архітектурні конструкції за невисокою ціною.

Автори розробили класифікацію адитивного виробництва 3D-друку для будівництва за такими критеріями:

1. За технологією:

1.1. Екструзійний друк (Extrusion Based Technologies) – бетон / цемент, віск, піна, полімери.

1.2. Струменевий друк (струминне нанесення в'язучого в порошковому шарі, Binder Jetting) – полімерна сполука, хімічна сполука, спікання.

1.3. Електродугове вирощування з використанням зварювального дроту (WAAM, wire arc additive manufacturing).

1.4. Інші технології, включаючи сітчасте формування каркаса, формування вертикальних конструкцій ковзанням, часткове бетонування металевої сітки тощо.

1.5. Окремо можна виділити ринок 3D-друку модулів та цегли (Modularity and Bricks).

В основному будівельні 3D-принтери у своїй роботі використовують технологію екструзіювання, коли кожен новий шар будівельного матеріалу видавлюється з принтера поверх попереднього шару по закладеному програмою контуру. Така технологія називається FDM (Fused Deposition Modeling – моделювання методом осадження нитки) [3–5].

2. За схемою роботи будівельні 3D-принтери розрізняють:

2.1. Принтери з полярною схемою роботи (3D-принтери, що обертаються).

2.2. Дельта-принтери.

2.3. Принтери, засновані на роботах-маніпуляторах.

3. За використанням програмних комплексів для забезпечення 3D-друку:

3.1. Для створення 3D-моделі: Autodesk Revit, який часто використовують в будівництві, Comras 3d – більш старий програмний комплекс, який найчастіше використовується інженерами-механіками, та простіший SketchUp, а також програмні комплекси FreeCAD, Blender, OpenSCAD та Rhinoceros.

Після того як 3D-модель виготовлена, приступають до розбивки на прошки – створення G-code¹, тобто роблять переклад моделі в зрозумілий для 3D-принтера вид. Для цього використовують програмні комплекси CURA, CraftWare, Slic3r, 3D slash. Далі інформація передається з комп'ютера в 3D-принтер.

3.2. Для управління безпосередньо самим принтером: CURA, POLYGON, Repetier-Host [8].

За технічними показниками та матеріалами, які використовуються, виділимо кращі на 2020 рік будівельні 3D-принтери.

1. SOBOD BOD2. Розмір зборки: 11,98 × 45,07 × 1,53 м. Матеріал: бетон. Країна: Данія. Цей конструкторський 3D-принтер розвиває швидкість до 18 м/хв. BOD2 модульний і може бути адаптований під різні розміри.

2. Constructions-3D 3D-Constructor. Розмір зборки: 13 × 13 × 3,8 м. Матеріал: бетон. Країна: Франція. Constructions-3D – дочірня компанія французького ритейлера 3D-принтерів Machines-3D. 3D Constructor мобільний завдяки своїм гумовим гусеницям та поміщається в 20-футовий транспортний контейнер для зручного транспортування з одного будівельного майданчика на інший.

3. CyBe Construction CyBe RC 3Dp. Розмір зборки: 2,75 × 2,75 × 2,75 м. Матеріал: бетон. Країна: Нідерланди. CyBe RC 3Dp складається з одного маніпулятора з наконечником, здатний досягати висоти до 2,75 м, простий у використанні, для його роботи потрібно двоє людей.

4. ICON Vulcan II. Розмір зборки: 2,6 × 8,5 × ∞ м. Матеріал: бетон. Країна: США. ICON планує революціонізувати будівельну галузь за допомогою свого

принтера Vulcan II. Vulcan II зручний для користувача завдяки інтерфейсу на основі планшета, а бетонна суміш ICON Lavacrete оптимізована для полегшення друку.

5. MudBots Concrete 3D Printer. Розмір зборки: $1,83 \times 1,83 \times 1,22$ м (мінімум). Матеріал: бетон. Країна: США. MudBots – це виробник бетонних 3D-принтерів у США. Їх найменша модель (приблизно $1\ 830 \times 1\ 830 \times 1\ 220$ мм) доступна за ціною 35 000 \$. Доступні також великі розміри складання, що досягають 30 м у довжину. MudBots Concrete 3D Printer може надрукувати невеликий будинок всього за 12 годин.

6. Stroybot2. Розмір збоки: $10 \times 15 \times 6$ м. Матеріал: бетон. Країна: США. StroyBot, також відомий як 3D-принтер Rudenko, являє собою універсальну мобільну систему для конструкторського друку, що поставляється у вигляді набору для збирання користувачем. У середньому він може надрукувати будинок площею 100 м^2 за 48 годин (тільки стіни).

7. WASP Crane WASP "Infinity 3D- Printer". Розмір зборки: $\varnothing 6,3 \times 3$ м. Матеріал: бетон, земля та ін. матеріали. Країна: Італія. Crane WASP – це еволюція попереднього будівельного принтера WASP, BigDeltaWASP 12MT. Ця система з відкритим вихідним кодом модульна, кілька принтерів Crane можуть працювати разом на одному проєкті, що дає теоретично нескінченні можливості для 3D-друку.

8. Apis Cor 3D-printer. Розмір зборки: $8,5 \times 1,6 \times 1,5$ м. Матеріал: бетон. Країна: США. Apis Cor, 3D-будівельна компанія, базується в Сан-Франциско та, за інформацією розробників, зможе надрукувати будинок в 3D менше ніж за 24 години. Принтер Apis Cor схожий на роботизовану руку, посів перше місце в конкурсі трьох етапів 3D-друку NASA.



Рис. 1. 3D-принтер Apis Cor у роботі

9. Vatiprint 3D – 3D-принтер. Розмір зборки: розмір зборки готового виробу не обмежується, за рахунок друку складових елементів. Матеріал: бетон та інші матеріали. Країна: Франція. 3D-принтер друкує не тільки цементом, а й ізоляційною піною, що робить його одним із найбільш повних 3D-рішень для будівництва.

10. S-Squared ARCS VVS NEPTUNE. Розмір складання: $9,1 \times 4,4 \times \infty$. Матеріал: бетон. Країна: США. S-Squared, також відомий як SQ3D, працює над масштабним проектом «4D-друк», мета якого – швидке, надійне, екологічно чисте та доступне житло для бідних районів. ARCS VVS NEPTUNE – одна з робочих моделей компанії, але вона не буде доступна для комерційного продажу.

11. Contour Crafting 3D-printing system (також відома як CC Corp). Розмір зборки: обмеження тільки по ширині руху маніпулятора. Матеріал: бетон. Країна: США.



Рис. 2 Будівельна система Contour Crafting (CC Corp)

Ця автоматизована будівельна система здатна 3D-друкувати великі будівлі. Contour Crafting прагне підвищити ефективність допомоги під час стихійних лих завдяки технології виробництва добавок для бетону.

12. XtreeE 3D-принтер. Розмір зборки: розмір зборки готового виробу не обмежується, за рахунок друку складових елементів. Матеріал: бетон. Країна: Франція. XtreeE розробляє спеціальні рішення для 3D-друку для будівництва, проектування та архітектурного дизайну. Цей стартап міститься у Франції та вже завершив низку 3D-будівельних проектів [9].

За освоєними процесами та напрямками застосування на сьогоднішній день будівельні принтери 3D-друку можна групувати:

- 3D-друк окремих малоповерхових будівель та малогабаритних споруд;
- 3D-друк фундаментів та стін, переважно за допомогою великомасштабної екструзії бетону;
- 3D-друк прес-форм та опалубок, в які можуть бути відлиті матеріали для виготовлення будівельних конструкцій та елементів;
- 3D-друк конструкцій, виробів, матеріалів та деталей, які можна друкувати бетоном або гібридними матеріалами (цегла, панелі, блоки, будівельні та з'єднувальні компоненти або складні архітектурні деталі фасадів).

Виділено основні напрямки використання 3D-друку в будівельних проектах провідними компаніями світу.

Китай. Компанія Shanghai WinSun – один із лідерів галузі, відома декількома успішними проектами, зокрема, будівництвом офісу Dubai Future Foundation (робота виконана за 17 днів, \$ 140 000) та п'ятиповерхового будинку в Сучжоу (одна з найвищих 3D-будівель на планеті).



Рис. 3. Офіс Dubai Future Foundation

Завдяки технології 3D-друку компанії WinSun зведено будинок вартістю всього 4 800 доларів. 3D-принтери фірми Shanghai WinSun та Decoration Design Engineering стаціонарні та встановлюються поза контуром будівлі. Принтери WinSun дозволяють друк будівлі, використовуючи суміш із будівельних відходів (скло, сталь, цемент).

США. 3D-друк використовується під час реконструкції історичних будівель, що дозволяє створювати та вбудовувати елементи класичного фасадного орнаменту за порівняно невеликих витрат усіх видів ресурсів.

NASA фінансує дослідження із застосування 3D-друку в будівництві баз на Марсі та Місяці, при цьому планується використовувати 90 % матеріалів, наявних на Місяці, і тільки 10 % матеріалу будуть привезені із Землі.



Рис. 4. Проект використання адитивних технологій для будівництва в космосі для перших поселень на Місяці та Марсі (технологія Contour Crafting)

Розробляється проект будинку Curve Appeal, із посиленого вуглецевого волокна та пластику від Branch Technology, в якому не буде жодної прямої лінії (м. Чикаго, США).

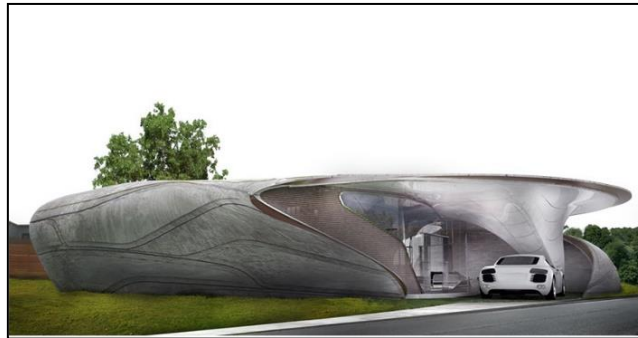


Рис. 5. Будинок Curve Appeal

Будинок буде створений з панелей, які зварять одна з одною на будмайданчику, потім після 3D-друку каркаса будинку на нього буде нанесена піна для ізоляції та додаткового посилення.

Студія Emerging Object розробила проект зі створення «охолоджувальної цегли». «Охолоджувальні» пористі цеглини – це заміна кондиціонерів, що характеризуються значними енерговитратами та негативним впливом на навколишнє середовище.

Технологія охолодження будівель та окремих елементів заснована на тому, що конструкція з пористої цегли вбирає вологу, потім, коли повітря буде проходити через цеглу, вода випаровується, охолоджуючи будинок.



Рис. 6. Охолоджувальна цегла

Іспанія. Minibuilders – це нова концепція, розроблена дослідниками з Інституту передової архітектури Каталонії. Технологія передбачає використання безлічі невеликих пристроїв розміром із персональний 3D-принтер, найбільший з них – усього 42 см. Пристрої легко перевозити, будівельні компанії можуть використовувати стільки 3D-принтерів, скільки потрібно для проекту. Особливість: використання таких малогабаритних пристроїв дозволяє вирішити проблеми логістики, пов'язані з установкою 3D-принтера на будмайданчику, а також виконувати різні будівельні процеси, використовуючи потоковий та паралельний

методи організації робіт. Також ученим-дослідникам вдалося розробити речовини, які за додавання їх у ґрунтову суміш, взяту на будівельному майданчику, дозволяють отримати будівельний матеріал, утричі міцніший промислової глини.

Італія. Італійський виробник WASP, проект компанії Centro Sviluppo Progetti, створив найбільший на сьогоднішній день будівельний 3D-принтер – Дельта-бот BigDeltaWASP. Особливість проекту BigDelta – застосування в будівництві пресованої соломи, глини та землі, тобто – будівельний 3D-друк із використанням природних матеріалів [7].



Рис. 7. Використання 3D-друку компанії WASP для зведення екобудинку

Нідерланди. CyBe Construction – компанія з Нідерландів, яка застосовує 3D-друк у спорудженні будинків «під ключ». CyBe виробляє матеріал для друку MORTAR. Будівельний маніпулятор 3D ProTo R 3Dp стаціонарний, виробляє окремі конструктивні елементи (стіни, підлоги), опалубні системи, які далі монтуються на будівельному майданчику. Витратний матеріал – бетонна суміш CyBe MORTAR, що набуває проектної міцності за кілька хвилин. За використання MORTAR в атмосферу викидається на 32 % менше вуглекислого газу, порівняно зі звичайним бетоном, цей матеріал підлягає повній вторинній переробці, що робить його більш екологічно чистим. Будівельний маніпулятор 3D ProTo R 3Dp використовується для виробництва труб різного діаметра для інженерних комунікацій та зведення стін висотою понад 4,5 м. Ведуться розробки зі створення мобільної версії – RC 3Dp на гусеничному ході.

Також у Нідерландах зведено бетонний міст, надрукований на 3D-принтері. При цьому використовувалася нова розробка, в результаті якої принтер не тільки заливав бетон по верствах, а й укладав між ними сталевий трос.

Франція. Університет Нанта, Франція, спільно з Nantes Digital Sciences Laboratory (LS2N), працює над проектом друку будинків на 3D-принтері, відомому як Yhnova. Для проекту використовується розроблена університетом технологія Vatiprint3D (друк «зсередини»). Сутність технології полягає в тому, що принтером спочатку шляхом пошарового створення поліуретанових шарів буде влаштована опалубка округлої форми, яка далі буде заливатися бетонною сумішшю. Ця система (INNOprint) дозволяє за 30 хв побудувати базове житло в районах природних катаклізмів [10-12].

Аналіз і класифікація світового досвіду ступеня використання адитивного виробництва в будівництві дозволить враховувати цю групу факторів під час організаційно-технологічного проектування, а саме під час розробки раціональних календарних планів будівництва об'єктів та їх комплексів.

У ході дослідження виділено характерні особливості застосування в світовій практиці будівельних 3D-принтерів.

1. Переваги:

1.1. Переваги технології використання 3D-друку порівняно з класичними технологіями будівельного виробництва:

1.1.1. Скорочення термінів робіт на будівельному майданчику, підвищення якості та точності процесів завдяки програмному керуванню. Порівняно з традиційними технологіями використання 3D-принтерів для зведення будинків дозволить скоротити час будівництва на 60...70 % [10].

1.1.2. Економія трудовитрат та витрат на матеріали. Із процесу будівництва виключаються деякі види матеріалів, логістика та трудовитрати по них (наприклад, опалубка).

1.1.3. Зменшення кількості персоналу, задіяного в будівництві, дозволяє знизити трудовитрати. На будівництво 3D-друкованих об'єктів витрачається на 50...80 % менше людино-годин, тому що участь людей потрібна тільки для обслуговування машин, проведення комунікацій та складання конструкцій.

1.1.4. 3D-друк ідеально вписується в концепцію модульного виробництва (DFMA¹). Виключення оснастки з процесу або скорочення термінів (витрат) на виготовлення та установку опалубки (оснастки) [10].

1.1.5. Підвищення безпеки та поліпшення умов праці.

1.1.6. Поліпшення екологічної ситуації. У процесі будівництва не утворюється будівельне сміття, що вимагає вивезення з будівельного майданчика та утилізації. 3D-друк дозволяє використовувати перероблені відходи як складові бетонної суміші (на будівельну галузь припадає до 80 % світових відходів).

1.1.7. Топологічна оптимізація та набуття спеціальних властивостей, зміна проектувального процесу.

1.1.8. Різноманітність форм та простота. Технологія дозволяє істотно скоротити витрати на зведення будівель з унікальною архітектурою. Розробникам доступні практично будь-які геометричні форми, а тривалість будівництва унікальних об'єктів стає порівнянною з тривалістю спорудження типових будинків.

1.2. Економічні чинники ефективності застосування 3D-друку в будівництві у світовій економіці:

1.2.1. Прискорення процесу розроблення нових продуктів. 3D-друк дозволив збільшити швидкість, а, відповідно, зменшити вартість та ризики при отриманні перших версій продукту з різними варіаціями (формами, функціоналом

¹ Метод Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) – один з методів паралельної організації робіт у процесі технічної підготовки виробництва. DFMA – це набір методик та принципів, що регулюють процес розроблення та постановки виробів на виробництво таким чином, щоб заздалегідь оптимізувати всі етапи життєвого циклу виробу (виготовлення, складання, випробування, закупівлю, доставку та обслуговування).

тощо) та модифікаціями, що, у свою чергу, дало можливість отримати зворотний зв'язок максимально швидко (метод дозволяє створити форм-фактори моделей за кілька годин та цього ж дня отримати результати перших тестів та споживчу реакцію).

1.2.2. Зміна виробничої стратегії. Частина виробничих потужностей втраять свою актуальність через поступове зниження ціни, зростання якості друку та розширення можливостей 3D-принтерів, які дозволяють створювати окремі деталі та застосовувати їх у серійному виробництві.

1.2.3. Зміна генераторів прибутку. Можливість скорочення обсягів складського простору та виключення витрат на доставку деталей, які можна надрукувати на 3D-принтері. Також з'являється можливість кастомізації продукту – персоналізації в дизайні та функціоналі.

1.2.4. Нові можливості для дизайнерів та архітекторів. Оскільки дизайн прив'язаний до методів виробництва, прикладні знання в галузі використання та можливостей 3D-друку зможуть забезпечити конкурентні переваги в роботі над проектами.

1.2.5. Конкуренція за володіння інноваційною технологією. Технологія 3D-друку допомагає зробити менш інвестиційноємним вихід на ринок для нових компаній (особливо в дрібносерійному виробництві). Переваги нової технології дозволяють в окремих сегментах конкурувати з великими компаніями, що володіють міцними позиціями на ринку [8, 13].

2. Обмеження (недоліки) застосування 3D-друку в будівельних проектах провідних компаній світу.

2.1. Частота виходу з ладу 3D-принтерів дуже висока (якщо принтер використовується безперервно, ризик відмови істотно зростає) [14, 15].

2.2. Якість виробів, що виготовляються за допомогою 3D-принтерів, досить низька. Грубий зовнішній вигляд: якість поверхні може бути не такою гладкою, як діючі стандарти, потрібні поліпшення та подальший етап обробки за участю людини (вирівнювання, штукатурення або застосування облицювальних матеріалів) [14].

2.3. 3D-принтери наразі працюють порівняно повільно.

2.4. Більшість матеріалів, доступних на сьогоднішній день, потребують удосконалення [15].

2.5. Великі початкові інвестиції. Будівельне виробництво із застосуванням 3D-друку сьогодні – це дослідно-експериментальний майданчик набору знань та практичних навичок у застосуванні всього різноманіття адитивного виробництва в будівництві.

2.6. Для керування принтером потрібен досвідчений оператор, а також матеріалознавець для якісної підготовки та змішування матеріалів.

2.7. Технологія будівництва із застосуванням 3D-принтера вимагає особливих характеристик будівельного майданчика, зокрема, для укладання напрямних рейок необхідний рівний майданчик, а також безперервний контроль над дотриманням їх паралельності для забезпечення високої точності друку [3, 4, 18].

2.8. Методи автономного виробництва не придатні для довгорозмірних конструкцій.

2.9. Скорочення робочих місць. Застосування 3D-друку в будівництві дозволяє автоматизувати робочі місця в промисловості, скорочуючи потребу в ручній праці та, як наслідок, скорочуючи робочі місця для місцевих працівників. Цей факт може викликати опір інноваціям і затримати темп їх використання в галузі, особливо в бідних регіонах або містах із високим рівнем безробіття.

2.10. Відсутність типового будівництва, типових технічних рішень в 3D-друку. Всі роздруковані будівлі унікальні, тому економіка будівництва з використанням 3D-друку поки не передбачувана [3, 4].

Визначено систему факторів, які впливають на темпи поширення використання 3D-друку в будівельному виробництві України.

1. Передумови використання:

1.1. Низька продуктивність праці в будівельній галузі. Резерв її зростання, пов'язаний із цифровізацією будівельного процесу та його автоматизацією, в т. ч. за рахунок будівельного 3D-друку.

1.2. Можливість виключення «людського» чинника та помилок, із ним пов'язаних (на них припадає до 70 % браку).

1.3. Ефект за рахунок економії на забезпеченні безпеки виробництва будівельних робіт, у зв'язку з мінімізацією присутності персоналу на будмайданчику.

1.4. Сформована розвинена національна екосистема («зелене будівництво») готова до активної роботи, прийшовши в галузь стратегічних інвесторів.

1.5. Можливість збереження сильної наукової школи по частині будівельного матеріалознавства та інжинірингу [19, 20].

2. Труднощі впровадження 3D-друку:

2.1. Загальна слабкість у розвитку машинобудування та хімічної промисловості, висока вартість імпортованих комплектуючих та комплексних модифікувальних добавок (як наслідок – залежність від коливань валют та висока вартість матеріалів для 3D-друку та обладнання).

2.2. Необхідність подальших досліджень, з використанням нанотехнологій для розроблення нових матеріалів та сумішей, необхідних для ефективного 3D-друку.

2.3. Слабкий інтерес та відсутність підтримки проектів 3D-друку з боку будівельної галузі та держави в цілому.

2.4. Складна нормативна та регуляторна база.

2.5. Відсутність стимулу до зростання ефективності будівельної галузі через доступність дешевої низькокваліфікованої робочої сили [19–22].

Висновки. 1. Виконаний аналіз основних характерних аспектів адитивного виробництва для будівництва дозволив визначити необхідні кроки для підвищення ефективності використання та виділити перспективні напрямки розвитку 3D-друку:

1.1. Використання 3D-друку на всіх етапах виконання будівельно-монтажних робіт (зведення будинку «під ключ»), тобто повна автоматизація будівельного виробництва. Для реалізації цього напрямку необхідні істотні організаційні та технологічні зміни в концепції адитивного будівництва, серед яких можна виділити:

1.1.1. Друк різними матеріалами або розробка мультиматеріалів. Практично всі сьогоdnішні 3D-принтери друкують з одного матеріалу (зазвичай з бетону).

1.1.2. Інсталяція спеціалізованих компонентів. Велика частина будівлі виконана із загальнопоширених взаємозамінних матеріалів (комодитів), проте існує безліч спеціалізованих компонентів, які на даний час не друкуються 3D-принтерами (наприклад, вікна з потрійним склом, заповнені азотом, електронні дверні замки, світлодіодні системи освітлення, що затемнюються, та ін.).

На наш погляд, існує два рішення цієї проблеми:

1.1.2.1. Створення виробничого процесу, який би включав у себе ці попередньо створені компоненти в проект будівлі, доставку їх на майданчик та установку.

1.1.2.1. Створення роботизованих систем, які будуть спеціалізуватися на роботі з певними типами компонентів (наприклад, «робот для установки вікон», який міг би ефективно працювати з декількома типовими стилями віконних конструкцій).

1.1.2. Організація комплексних та раціональних поставок витратних матеріалів. Одне з можливих рішень цієї проблеми, на наш погляд, – це створення системи «транспортувального контейнера», в якому всі необхідні для будівництва компоненти та матеріали можуть бути завантажені в режимі організатора та подаватися в міру необхідності.

1.1.3. Розроблення програмного забезпечення для управління виробництвом у цілому. Створення програмного забезпечення для планування, організації та контролю над усією виробничою діяльністю на будівельному майданчику.

1.2. Будівельні проекти з використанням 3D-друку мають перевагу в скороченні тривалості будівництва, також у можливості створення архітектурних проектів та окремих конструкцій, які неможливо виконати будь-яким іншим способом. Наприклад, надрукувати конструкцію, що включає внутрішню систему повітропроводів, яка автоматично вмикає вентиляцію при сонячному освітленні.

1.3. Подальші дослідження з розроблення сумішей, використовуваних у 3D-друку, дозволять не тільки підбирати готові склади під конкретні умови та завдання, а й використовувати як сировину відходи будівництва та місцеві матеріали – сіно, ґрунт, пісок тощо, з додаванням сполучної речовини. Застосування в бетонних розчинах мінеральних добавок дозволить вирішити деякі екологічні проблеми, приміром, знизити викид вуглекислого газу в атмосферу за рахунок зменшення споживання цементу.

1.4. Перспективний, на наш погляд, напрямок застосування будівельних 3D-принтерів – це робота у важко доступних місцях із використанням дронів. Наприклад, для реконструкції фасадів висотних будівель; для реконструкції несних конструкцій мостів, як у повітряному, так й у водному середовищі, і т.п.

2. Недоліки використання 3D-друку в будівництві, в основному, зумовлені двома факторами: малодосконалою технологією друку, хімічним складом, структурою та властивостями використовуваних матеріалів, які теж вимагають додаткових наукових досліджень.

3. Ґрунтуючись на оцінках аналітиків Wohlers Report та SmarTech Publishing [23], які очікують зростання, загальної виручки по всіх товарах та послугах у сфері адитивних технологій в 2022 р. до 23,9 млрд дол. та до 35,6 млрд дол. – 2024 р., а також зростання ринку 3D-друку в будівництві до 2027 року до 40 млрд дол., можна констатувати, що розширене використання 3D-друку в будівництві – це питання часу.

4. Адитивне виробництво для будівництва з використанням 3D-друку дозволяє об'єднати новітні наукові розробки в галузях техніки, технології, матеріалознавства, архітектури, дизайну, конструювання та будівництва. Таке інтегрування в нову єдину інноваційну систему відкрило цілий пласт питань та проблем, пов'язаних із необхідністю вдосконалення методів планування, організації та управління будівельним виробництвом, які б дозволили ефективно використовувати новітні адитивні технології 3D-друку в Україні.

Перелік посилань

1. Социальное жилье в регионе ЕЭК ООН. Модели, тенденции и вызовы. Европейская экономическая комиссия организации объединенных наций. (2018). https://www.unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/Publications/Social_Housing_in_UNECE_region.rus.pdf
2. Savytskyi, M.V., Shatov, S.V., & Ozhyshchenko, O.A. (2016). 3D-printing of buld objects. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 3, 8–26.
3. *The 3D Printing Construction Market is Booming*. Contact (n.d.) Retrieved from <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-construction-240120184/>
4. *Текущая ситуация и перспективы применения 3D-печати в строительстве (3 DCP) в России и в мире*. (n.d.) JSON.TV Взято с http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/tekuschaya-situatsiya-i-perspektivy-primeneniya-3d-pechati-v-stroitelstve-3dcp-v-rossii-i-mire-20190726054004
5. *3D-принтер друкування поверхонь будівельних об'єктів* (2019) (Патент No 137564)
6. Савицький, М.В., Конопляник, О.Ю., Мислицька, А.О., Лясота, О.В. (2020). Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D-друку будівельних конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 2, 59–68. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622>
7. Грахов, В.П., Мохначев, С.А., & Бороздов, О.В. (2014). Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства. *Фундаментальные исследования*, 11–12, 2673–2676.
8. 13 лучших 3D-принтеров 2019 года. (н.д.) ЕРО3D. Взято с https://epo3d.com/blog/76_13-luchshikh-stroitelnykh-3d-printerov-2019-g
9. Абрамян, С.Г., & Илиев, А.Б. (2018). Современные строительные аддитивные технологии. Часть 2. *Инженерный вестник Дона*, 1, 43–49.
10. *Топ-10 инноваций в 3D-печати в строительстве*. (н.д.). 3D PULSE. Взято с <https://www.3dpulse.ru/news/analitika/top-10-innovatsii-v-3d-pechati-v-stroitelstve/>
11. *Construction 3D printing*. (n.d.) Wikipedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing

12. Новак, Т., Хромняк, М., Секуля, Р., & Гао, Л. (2006). Простота окупается. *ABB Review*, 1, 55–58.
13. Лунева, Д. А., Кожевникова, Е. О., & Калошина, С. В. (2017). Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*, 8(1), 90-101.
14. Zaiats, Y. L., Kravchunovska, T. S., Kovalov, V. V., & Kirnos, O. V. (2018). Risk level assessment while organizational-managerial decision making in the condition of dynamic external environment. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2, 123-129.
<https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/24>
15. Заяць, Є. І., Дадіверіна, Л. М., & Мартиш, О. О. (2018). Фактори виникнення відмов у процесі будівництва. *Вісник Придніпровської Державної Академії Будівництва Та Архітектури*, (3), 29–35.
<https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.250918.29.193>
16. Чейз, Р.Б., Эквилайн, Н.Дж., & Якобс, Р.Ф. (2004). *Производственный и операционный менеджмент*. Издательский дом «Вильямс».
17. *3D Printing – Possibilities and Current Limitations*. (n.d.). Retrieved from <https://www.spotlight-metal.com/3d-printing-possibilities-and-current-limitations-a-669410/>
18. Дадіверіна, Л.М., & Дадіверіна, Г.В. (2016). *Методи обґрунтування проектних рішень з організації будівельних майданчиків при зведенні та реконструкції будинків і споруд : навч. посіб.* ПДАБА.
19. *3D printing for construction and architecture projects: The Ultimate Guide 2020*. (n.d.) Sculpteo. Retrieved from <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-applications/construction-and-architecture/>
20. *О применении 3D-технологий в строительстве*. (н.д.). Новые Зодчие. Взято с <http://www.n-zodchie.com/articles/3-D-technologii-v-stroitelstve.html>
21. *What Construction 3D Printing Must Do Next*. (n.d.) Fabbaloo. Retrieved from <https://www.fabbaloo.com/blog/2018/8/30/what-construction-3d-printing-must-do-next>
22. *Печать домов строительным 3D-принтером*. (n.d.). Top3Dshop. Retrieved from <https://top3dshop.ru/blog/3d-printing-houses-in-russia-china-europe-price-video.html>
23. Филипова Н.С. (2019) *Аддитивная революция*. Атомный эксперт. Взято с <http://atomicexpert.com>

АННОТАЦИЯ

Цель. Исследования направлены на определение направлений совершенствования существующих методов планирования и организации строительства с учетом требований и особенностей использования аддитивных технологий 3D-печати.

Методология. Выполнен анализ и классификация современных аддитивных технологий 3D-печати, которые успешно зарекомендовали себя в мировой практике строительного производства. Рассмотрены технические характеристики 3D-печати, технологии, материалы, направления использования строительных 3D-принтеров и требования к организации строительных площадок.

Результаты исследований. Определены факторы, влияющие на активное использование технологий 3D-печати в строительном производстве Украины. Анализ основных отличительных аспектов аддитивного производства для строительства позволил определить необходимые шаги для повышения эффективности использования и выделить перспективные направления развития 3D-печати.

Научная новизна. Сделаны выводы, что активное использование 3D-печати в строительстве – вопрос времени, это позволит объединить новейшие научные разработки в области техники, технологии, материаловедения, архитектуры, дизайна, конструирования и строительства.

Практическое значение. Такое интегрирование в новую единую инновационную систему предусматривает решение целого пласта вопросов и проблем, связанных с необходимостью совершенствования методов планирования, организации и управления строительным производством, позволяющих эффективно использовать новейшие аддитивные технологии 3D-печати в Украине.

Ключевые слова: *аддитивные технологии; 3D-принтер; 3D-печать; планирование и организация строительного производства*

ABSTRACT

Purpose. The research is directed towards the improvement of existing methods of planning and organization of construction, taking into account the requirements and features of using additive 3D-printing technologies.

Methodology. For this purpose the analysis and classification of modern 3D additive technologies was performed. These technologies successfully proved themselves in the world of construction production. The specifications of 3D-printing, technologies, materials, directions for building 3D-printers, and the requirements for the organization of construction sites were considered.

Research results. The factors that influence widely used 3D-printing technologies in the construction industry of Ukraine are identified. An analysis of the main distinguishing aspects of additive manufacturing for construction allowed us to identify the necessary steps to increase the efficiency of use and highlight promising directions for the development of 3D printing.

Scientific novelty. Wide use of 3D-printing in construction is a matter of time, it will allow combining the latest scientific developments in the field of engineering, technology, materials science, architecture, design, and construction.

Practical implications. Such integration into the new unified innovation system provides for the solution of a whole range of issues and problems which require the improvement methods of planning, organization and management of construction production, allowing the effective use of the latest additive 3D-printing technologies in Ukraine.

Keywords: *additive technologies; 3D-printer; 3D-printing; planning and organization of construction production.*