

DOI: 10.32347/2076-815x.2021.76.83-93

УДК 721:69:004.925.84

д.т.н., професор **Заяць Є.І.**,
zei83dici@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7382-919X,
заслужений архітектор України, професор **Богданов І.В.**,
igor2bogdanov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5575-2996,
к.т.н., доцент **Невгомонний Г.У.**,
nevhomonnyi.hryhorii@pgasa.dp.ua ORCID: 0000-0003-0485-3054,
к. арх., доцент **Мерилова І.О.**,
irina.merilova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2019-0780,
Scopus Author ID: 57211436194, Web of Science Researcher ID: Y-92-63-2019,
Речиц О.А., alexr@i.ua, ORCID: 0000-0003-3105-7942,
ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ В БУДІВНИЦТВІ

Детально розглядається технологія 3D-друку в області будівництва. Проводиться аналіз технічних обмежень технології, а також архітектурно-планувальних можливостей впровадження 3D-друку. В ході дослідження встановлено, що технологія розвивається як в сферу розширення можливостей: пошуку нових властивостей матеріалу, технологій та організації виробництва, комбінаторики елементів; так і в напрямку поглиблення в типологію споруд: житлове і цивільне будівництво, об'єкти інфраструктури, малі архітектурні форми. Наведено приклади.

Дослідження розглядає сучасний ринок будівельного 3D-друку та аналізує перспективи використання технології в будівництві. Встановлено, що частка споруд, повністю або частково побудованих за допомогою технології 3D-друку щорічно зростає, що актуалізує інтерес не тільки до розвитку технології в цілому, а й до досвіду її застосування.

Ключові слова: 3D-друк, метод будівництва, технологія будівництва, 3D-принтер, адитивне будівництво

Постановка проблеми. Сучасні темпи розвитку технологій багато в чому диктують умови організації передових технологічних процесів у всіх сферах виробництва. У тому числі й у будівництві. В даному контексті конкурентно важливим є не тільки володіння технологією, а й досвід її застосування.

Відносно новою та вкрай перспективною для будівельної галузі є технологія 3D-друку, застосування якої здатне не тільки вивести українських

фахівців на світову арену, а й напрацювати низку методів використання даної технології, що стали б світовими прикладами і в цілому позитивно вплинути на імідж держави, міста або архітектора та компанії-забудовника.

Мета статті полягає в розкритті особливостей використання технологій 3D-друку в будівельній практиці.

Матеріали та методи. Дослідження базується на аналізі сучасної наукової бази щодо положень застосування 3D-друку в будівельній галузі, прикладах світової архітектурної практики, аналізі будівельного ринку в цілому та окремо сфери 3D-друку [2, 3, 9, 12, 13]. Незамінними стали дослідження представників Дніпровської будівельної школи з питань принципів, методів та технологій будівництва із залученням 3D-друку [14, 15].

Виклад основного матеріалу. Опис технології. 3D-друк був винайдений дослідником з США, Чаком Халлом у 1986 р. та названий ним як «прилад для стереолітографії». Під даною технологією мається на увазі різновид адитивного виробництва, який відноситься до технологій швидкого прототипування. Даний процес відбувається шляхом використання 3D-принтера - верстата з числовим програмним управлінням, що додає порції матеріалу до заготовки та зазвичай використовує метод пошарового друку [1, 2].

Ключовим моментом у розвитку технології став вихід на комерційний ринок у 1990 р. технології «FDM» («моделювання шляхом декомпозиції матеріалу, що плавиться»), розробленої Скоттом Крапом. Сьогодні вона широко задіюється 3D-принтерами для малого споживання. Технологія «FDM» має на увазі створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі. Як правило, в якості матеріалів для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді катушок ниток або прутків. В якості основної сировини для 3D-друку використовувався ABS пластик, поки в 2008 р. компанія «Objet Geometries Ltd.» не розробила 3D-принтер, що працює з різними типами матеріалів [1, 2].

Сьогодні кількість матеріалів, що використовуються для 3D-друку, перевищила 100 типів. Серед нових матеріалів найбільш цікаві біоматеріали та бетон. У 2014 р. почалося активне будівництво будівель за допомогою 3D-принтерів з використанням бетону в якості основного матеріалу [1].

3D-друк в будівництві. Дана технологія багато здатна запропонувати будівельній галузі. Прикладом може послужити досвід архітекторів з Нью-Йорка, які використовують 3D-друк при реставрації історичних будівель. Так, мотивацією для проекту «EDG» стало бажання відновити дизайн фасаду історичного будинку на П'ятій авеню в Нью-Йорку, який підлягав знесенню.

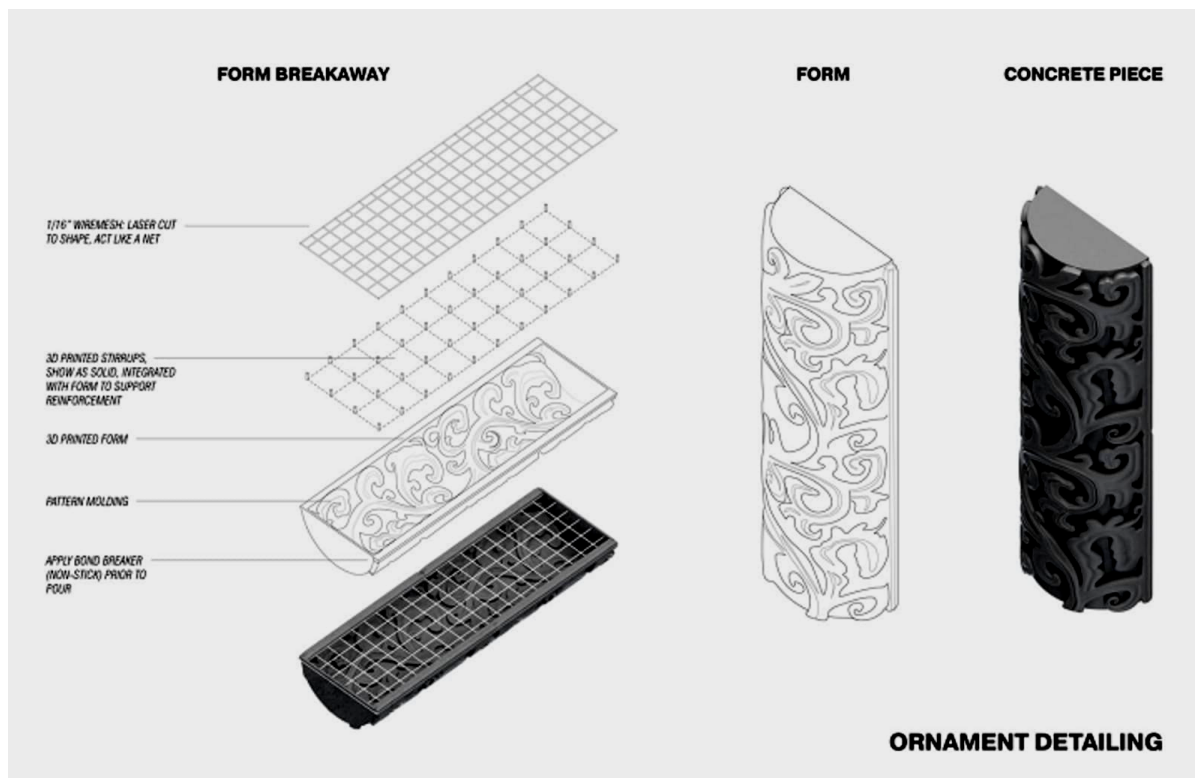


Рис. 1. Орнамент, відтворений за допомогою 3D-друку

Архітектори стверджували, що класичні орнаменти на фасадах занадто складно або взагалі неможливо відтворити в наш час. Саме з цієї причини команди архітекторів по всьому світу нечасто звертаються до реставрації історичних зразків, що залишилися. Нова методика з використанням 3D-друку дозволяє створити і вбудувати елементи фасадного орнаменту при дуже невеликих витратах. 3D-друк дозволяє з першого разу отримувати ідеальні деталі з дорогих матеріалів (рис. 1) [3, 4].

У 2014 р. голландська проектна компанія «DUS Architects» (Netherlands) вирішила побудувати будинок, надрукувавши його деталі гігантським принтером. Проект «3D print Canal House» в Амстердамі є першим проектом в Європі, який планували реалізувати за допомогою технології 3D-друку (рис. 2). Спорудження будівлі тривало протягом трьох років [5, 6].

В ході будівництва стало ясно, що технологія моделювання методом пошарового наплавлення, яка використовувалась для «3D print Canal House», вимагає розробки нових матеріалів. Наразі це залишається найбільшою проблемою в будівельних проектах з використанням 3D-технологій. У голландському проекті використовувався термопластичний матеріал на біоснові, розроблений компанією «Henkel» (Germany). Були спроектовані будівельні компоненти, що легко з'єднуються разом, з зазорами всередині у вигляді сот для заповнення спеціальним легким бетоном [6, 7].

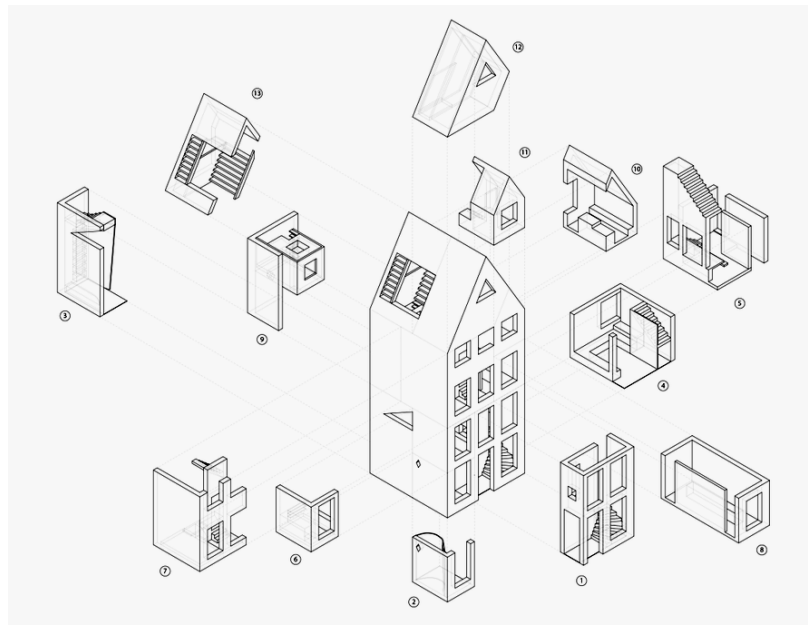


Рис. 2. Проект «3D print Canal House». Складові блоки будівлі.

У розрізі аналізу світової практики використання 3D-друку в будівництві вкрай важливим є досвід компанії «WinSun Decoration Design Engineering» (China) - китайського підприємства, що працює над матеріалом, схожим на бетон. У 2014 р. їм вдалося побудувати будинки з використанням 3D-технологій (рис. 3). Ця технологія заснована на будівельних компонентах, надрукованих в якості збірних елементів, що надалі були зібраних на місці. Компоненти друкувалися на принтері висотою 6 м, шириною 10 м та 40 м завдовжки. Принтер видавлював матеріал (розчин) через сопло шар за шаром. Стіни мали діагонально армовану структуру з порожнинами, які діють як шар ізоляції. Компоненти друкувалися на принтері, а після друку транспортувалися на будівельний майданчик і збиралися разом для створення цілісної конструкції [7, 8].



Рис. 3. Будівля, побудована компанією «WinSun» за допомогою технології 3D-друку

У проекті від «WinSun» в якості матеріалу для стереолітографічного друку використовувалась суміш промислових відходів, скловолокна, цементу і затверджувача. Розроблений матеріал дозволив створювати будівельні компоненти шар за шаром, як у звичайній 3D-технології. Бажана суміш повинна мати максимальну оброблюваність, а також максимальну плинність, щоб її можна було легко розміщувати в шарах. Шари повинні забезпечувати зчеплення з наступними шарами одночасно. Оскільки від розчину необхідна міцність на стиск, вміст води має бути мінімізовано при збереженні відповідної плинності [7, 8].

Сьогодні пріоритетом серед дослідників в галузі 3D-друку є розробка найкращого рецепта бетону, який буде досить керованим, щоб викачуватися з сопла принтера, і таким же міцним, як залізобетон.

Незважаючи на постійний пошук шляхів удосконалення сировинного матеріалу, 3D-друк активно застосовується в безлічі будівельних сфер [9]:

- для архітектурних макетів і моделей, прототипування, перевірки концепцій складних з'єднань і вузлів на практиці;
- для предметів інтер'єру та меблів, а також малих архітектурних форм;
- для будівельних конструктивних елементів: друку та укладання цегли; друку блоків, скла, «цифрової» деревини, композитів; балок, «лісів», каркасів;
- для виготовлення підлог (топологічна оптимізація та друк);
- при складних фасадах, корпусах для зовнішніх конструкцій, включно з ремонтом та реставраційними роботами;
- при друці несучих і не несучих стін, а також лінійних об'єктів (стічні канали, бруствери, дорожні полотна, в т.ч. їх ремонт);
- при друці як великих будівель, так і нескладних споруд цілком;
- при класичному 3D-друці в будівництві (друк металом, пластиком, полімерами, піском): пристосування для кріплення та збирання, в т.ч. будівельних виробів і конструкцій; опалубки і оснастки;
- при друці мостів;
- для 3D-друку труб при прокладанні тунелів під землею.

Перспективи застосування 3D-друку в будівництві. Компанією «J'son & Partners Consulting» був проведений аналіз поточної ситуації та перспектив застосування 3D-друку в будівництві [10, 11]. Згідно зі звітом, за технологіями адитивного будівництва в даний час ринок в своїй більшості поділяється на:

1. Екструзійний друк («Extrusion Based Technologies»), де в якості сировинного матеріалу виступає бетон, а також цемент, віск, піна та полімери;
2. Струменевий друк (струменеве нанесення розчину в порошковому шарі, «Binder Jetting»), який передбачає полімерне з'єднання, хімічне з'єднання та спікання в якості сполучних технологій;

3. Електродугове вирощування з використанням зварювального дроту (WAAM - «wire arc additive manufacturing»);
4. Інші технології, включно з сітчастим формуванням каркаса, формування вертикальних конструкцій ковзанням, часткове бетонування металевої сітки і т.д. Окремо виділяється ринок 3D-друку модулів та цегли («Modularity and Bricks»).

Світовий ринок будівельного 3D-друку. У 2017 р. екструзивний друк будівель та елементів інфраструктури склав найбільшу частку ринку (за вартістю та обсягом) завдяки здатності виробляти великомасштабні будівельні компоненти зі складною геометричною структурою та використанню традиційних будівельних матеріалів: бетон, пластик, метал, кераміка і т.п. Традиційно, найбільш поширеним матеріалом в будівництві виступив бетон у всіх можливих конфігураціях: готова бетонна суміш, збірний залізобетон, торкрет-бетон, бетон високої щільності [12, 13].

Прогнозується, що в майбутньому найбільш швидкозростаючим сегментом індустрії 3D-друку стане житлове будівництво [13].

Висновки. Аналіз технології 3D-друку встановив, що вона має багато обмежень. Однак на даний момент саме вона є найбільш перспективним напрямком в будівельній індустрії, оскільки передбачає можливості моделювання об'єктів різних масштабів: від цегли і дрібних блоків, до цільних блокових вузлів зі складною конфігурацією. Так само зараз активно розробляються універсальні структури для 3D-принтерів та нові матеріали, здатні забезпечити продуктам 3D-друку різні властивості, в тому числі теплоізоляцію або міцність.

Значним потенціалом володіє концепція розташування технології 3D-друку на місці будівництва, що потенційно дозволить скоротити витрати на транспортування збірних конструкцій, і, як складова частина, концепція контурної обробки, що дозволить друкувати дома на будівельному майданчику. Дані методики виставляють нові вимоги перед архітектурними підходами до проектування будівель та матеріалами, придатними для процесу 3D-друку, враховуючи і такі, в яких традиційні компоненти будуть замінені екологічно чистими. Особливою перевагою 3D-друку здатна стати порівняно легка можливість створення будівель складної форми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лохмутов, Н.Д.; Куличков, Д.В.; Ермолаева, В.В. (2018). Перспектива развития 3D-печати в строительстве. Молодой ученый. № 23 (209). С. 177-179. URL: <https://moluch.ru/archive/209/51318/> (дата звернення: 01.10.2020).
2. Excell, J. (2010). The rise of additive manufacturing. The Engineer. URL: <https://www.theengineer.co.uk/the-rise-of-additive-manufacturing/> (дата звернення 01.10.2020).
3. Pollock, E. (2018). EDG Uses 3D Printing To Resurrect Old Building Facades. URL: <https://www.engineering.com/BIM/ArticleID/17106/EDG-Uses-3D-Printing-To-Resurrect-Old-Building-Facades.aspx> (дата звернення 01.10.2020).
4. D'Angelo, M. (2019). Edg Wants to Resurrect Architectural Ornament Through 3D Printing. Architect. URL: https://www.architectmagazine.com/technology/edg-wants-to-resurrect-architectural-ornament-through-3d-printing_o (дата звернення 01.10.2020).
5. Фиговский, О. (2014). Инновационный инжиниринг – путь к реализации оригинальных идей и прорывных технологий. Инженерный вестник Дона. № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321> (дата звернення: 01.10.2020).
6. 3D print Canal Hause (2013). URL: <https://3dprintcanalhouse.com/about-the-3d-print-canal-house-1> (дата звернення 01.10.2020)
7. Герасимова, В.О.; Любин, Н.С.; Петрова, В.С. (2019). Технология 3D-печати в строительстве и архитектуре. Инженерный вестник Дона. №1. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5737> (дата звернення: 01.10.2020).
8. Massie, C. (2015). China's WinSun Unveils Two New 3D Printed Buildings. Architect. URL: https://www.architectmagazine.com/technology/chinas-winsun-unveils-two-new-3d-printed-buildings_o (дата звернення: 01.10.2020).
9. 3D-печать (Additive Manufacturing, аддитивное производство): перспективы практического использования. URL: https://json.tv/ict_telecom_analytics_view/3d-pechat-additive-manufacturing-additivnoe-proizvodstvo-perspektivy-prakticheskogo-ispolzovaniya-20190521065428 (дата звернення: 01.10.2020).
10. Текущая ситуация и перспективы применения 3D-печати в строительстве (3DCP) в России и мире. Аддитивные технологии, 3D-печать. URL: https://json.tv/ict_telecom_analytics/additive_technologies_3D_printing (дата звернення: 01.10.2020).
11. Most used 3D printing technologies 2017–2018 | Statistic. (2018). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/> (дата звернення: 01.10.2020).

12. 3D concrete printing market worth \$56.4M by 2021 (2016). URL: <https://www.3ders.org/articles/20160530-3d-concrete-printing-market-worth-by-2021.html> (дата звернення: 01.10.2020).

13. Stevenson, K. (2018). What Construction 3D Printing Must Do Next. URL: <https://www.fabbaloo.com/blog/2018/8/30/what-construction-3d-printing-must-do-next> (дата звернення: 01.10.2020).

14. Шатов, С.В.; Евсеев, Е.О.; Савицкий, Н.В.; Евсеева, Г.П. (2020). Возведение зданий и сооружений из грунтовых материалов 3D-печатаением. Молодежь в науке и предпринимательстве: сборник научных статей IX международного форума молодых ученых. Гомель: учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации». С. 421-425. ISBN 978-985-540-541-3

15. Shatov, S.; Yevseieva, H. (2020). Integration in the construction of ecological housing 3D-printing. Association agreement: driving integrational changes. Vol. III. Collective Monograph. Accent Graphics Commumications & Puhlishing 807-2625 Regina st., Ottawa, Ontario, K2B5W8 Canada, 2020. P. 336-347. ISBN 978-1-77192-537-2

д.т.н., профессор **Заяц Е.И.**,
заслуженный архитектор Украины, профессор **Богданов И.В.**,
к.т.н., доцент **Невгомонный Г.У.**,
к. арх., доцент **Мерилова И.А.**, **Речиц А.А.**,
ГВУЗ «Приднепровская государственная
академия строительства и архитектуры»

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В статье детально рассматривается технология 3D-печати в области строительства. Проводится анализ технических ограничений технологии, а так же архитектурно-планировочных возможностей задействования 3D-печати. В ходе исследования установлено, что технология развивается как в сфере расширения возможностей: поиска новых свойств материала, технологий и организации производства, комбинаторики элементов; так и в направлении углубления в типологию сооружений: жилое и гражданское строительство, объекты инфраструктуры, малые архитектурные формы. Приведены примеры.

Исследование рассматривает современный рынок строительной 3D-печати, а так же анализирует перспективы использования технологии в строительстве. Установлено, что доля сооружений, полностью или частично

построенных с помощью технологии 3D-печати ежегодно возрастает, что актуализирует интерес не только к развитию технологии, но и к опыту ее применения.

В статье приведены заключения, определяющие потенциал 3D-печати, как главной технологии будущего массового жилого строительства, а так же поднимается вопрос разработки концепций применения технологии с целью минимизации время- и ресурсозатрат.

Ключевые слова: 3D-печать, метод строительства, технология строительства, 3D-принтер, аддитивное строительство

Dr. Sc. (Tech.), professor **Zaiats Yevhen**,
Architect, professor **Bogdanov Igor**,
Ph.D., associate professor **Nevhomonnyi Hryhorii**,
Ph.D. associate professor **Merylova Iryna**,
Architect, Senior lecturer **Rechyts Olexandr**,
Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture

FEATURES OF 3D PRINTING TECHNOLOGY APPLICATION IN CONSTRUCTION

The article discusses the technology of 3D printing in the field of construction in detail.

The analysis of the technical constraints of the technology, as well as the architectural and planning possibilities of using 3D printing is carried out.

In the course of the study, it was found that the technology is developing and expanding its opportunities: the search for new material properties, production technologies, combination of elements and extension into the typology of structures: residential and civil construction, infrastructure facilities, small architectural forms, etc. The article contains graphic examples.

The study examines the modern market of 3D printing construction, as well as analyzes the prospects for using this technology in construction.

It has been established that the number of structures built with 3D printing technology (in full or in part) increases annually, which generates interest not only in the development of the technology, but also in the experience of its application.

The article provides conclusions which determine the potential of 3D printing as the main technology of the future in mass residential construction. It also raises the issue of developing concepts for the application of technology in order to minimize time and resource costs.

Key words: 3D printing, construction method, construction technology, 3D printer, additive construction

REFERENCES

1. Lokhmutov, N.D.; Kulichkov, D.V.; Yermolayeva, V.V. (2018). Perspektiva razvitiya 3D-pechati v stroitel'stve. Molodoy uchenyy. № 23 (209). P. 177-179. URL: <https://moluch.ru/archive/209/51318/> (date of appeal 01.10.2020) {in Russian}
2. Excell, J. (2010). The rise of additive manufacturing. The Engineer. URL: <https://www.theengineer.co.uk/the-rise-of-additive-manufacturing/> (date of appeal 01.10.2020) {in English}
3. Pollock, E. (2018). EDG Uses 3D Printing To Resurrect Old Building Facades. URL: <https://www.engineering.com/BIM/ArticleID/17106/EDG-Uses-3D-Printing-To-Resurrect-Old-Building-Facades.aspx> (date of appeal 01.10.2020) {in English}
4. D'Angelo, M. (2019). Edg Wants to Resurrect Architectural Ornament Through 3D Printing. Architect. URL: https://www.architectmagazine.com/technology/edg-wants-to-resurrect-architectural-ornament-through-3d-printing_o (date of appeal 01.10.2020) {in English}
5. Figovskiy, O. (2014). Innovatsionnyy inzhiniring – put' k realizatsii original'nykh idey i proryvnykh tekhnologiy. Inzhenernyy vestnik Dona. № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2321> (date of appeal 01.10.2020) {in Russian}
6. 3D print Canal Hause (2013). URL: <https://3dprintcanalhouse.com/about-the-3d-print-canal-house-1> (date of appeal 01.10.2020) {in English}
7. Gerasimova, V.O.; Lyubin, N.S.; Petrova, V.S. (2019). Tekhnologiya 3D-pechati v stroitel'stve i arkhitekture. Inzhenernyy vestnik Dona. №1. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5737> (data obrashcheniya: 01.10.2020) {in Russian}
8. Massie, C. (2015). China's WinSun Unveils Two New 3D Printed Buildings. Architect. URL: https://www.architectmagazine.com/technology/chinas-winsun-unveils-two-new-3d-printed-buildings_o (date of appeal 01.10.2020) {in English}
9. 3D-pechat' (Additive Manufacturing, additivnoye proizvodstvo): perspektivy prakticheskogo ispol'zovaniya. URL: https://json.tv/ict_telecom_analytics_view/3d-pechat-additive-manufacturing-additivnoe-proizvodstvo-perspektivy-prakticheskogo-ispolzovaniya-20190521065428 (date of appeal 01.10.2020) {in Russian}
10. Tekushchaya situatsiya i perspektivy primeneniya 3D-pechati v stroitel'stva (3DCP) v Rossii i mire. Additivnyye tekhnologii, 3D-pechat'. URL:

https://json.tv/ict_telecom_analytics/additive_technologies_3D_printing (date of appeal 01.10.2020) {in Russian}

11. Most used 3D printing technologies 2017–2018 | Statistic. (2018). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/> (date of appeal 01.10.2020) {in English}

12. 3D concrete printing market worth \$56.4M by 2021 (2016). URL: <https://www.3ders.org/articles/20160530-3d-concrete-printing-market-worth-by-2021.html> (date of appeal 01.10.2020) {in English}

13. Stevenson, K. (2018). What Construction 3D Printing Must Do Next. URL: <https://www.fabbaloo.com/blog/2018/8/30/what-construction-3d-printing-must-do-next> (date of appeal 01.10.2020) {in English}

14. Shatov, S.V.; Yevseyev, Y.O.; Savitskiy, N.V.; Yevseyeva, H.P. (2020). Vozvedeniye zdaniy i sooruzheniy iz gruntovykh materialom 3D-pechataniyem. Molodezh' v nauke i predprinimatel'stve: sbornik nauchnykh statey IKH mezhdunarodnogo foruma molodykh uchenykh. Gomel': uchrezhdeniye obrazovaniya «Belorusskiy trgovno-ekonomicheskoy universitet potrebitel'skoy kooperatsii». P. 421-425. ISBN 978-985-540-541-3 {in Russian}

15. Shatov, S.; Yevseieva, H. (2020). Integration in the construction of ecological housing 3D-printing. Association agreement: driving integrational changes. Vol. III. Collective Monograph. Accent Graphics Communications & Publishing 807-2625 Regina st., Ottawa, Ontario, K2B5W8 Canada, 2020. P. 336-347. ISBN 978-1-77192-537-2 {in English}