

УДК 711.58:001.82(158)

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261021.82.805

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ, ПОЛОЖЕННЯ І ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ ЖИТЛОВОГО МОДУЛЯ МІСЯЧНОЇ БАЗИ

НИКІФОРОВА Т. Д.¹, докт. техн. наук, проф.,
ШЕХОРКІНА С. Є.^{2*}, докт. техн. наук, доц.,
ЗІНКЕВИЧ О. Г.³, канд. техн. наук, доц.,
ШЕВЧЕНКО Т. Ю.⁴, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 363-46-38, e-mail: nikiforova.tetiana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

^{2*} Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

³ Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 145-01-99, e-mail: zinkevych.oksana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3425-8216

⁴ Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 750-26-97, e-mail: shevchenko.tetyana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0055-9819

Анотація. Постановка проблеми. Сьогодні проблематикою створення об'єктів на поверхні Місяця займаються провідні дослідники світу. Одним із нагальних завдань постає розроблення житлових модулів, які забезпечують необхідний захист екіпажу Місячних місій. Аналіз існуючих досліджень показав, що задля підтримки тривалих поверхневих місій місячна інфраструктура повинна забезпечувати необхідну функціональність житлово-виробничої бази, тобто видобування та переробку сировини, виготовлення будівельних конструкцій, зведення будівель і споруд, життєзабезпечення об'єктів. **Мета статті** – аналіз сучасного стану науково-прикладної проблеми та постановка мети і завдань подальшого дослідження. **Предмет** дослідження – встановлення закономірностей проектування та експлуатації будівельних об'єктів місячних баз в інтересах розвитку людської цивілізації. **Висновки.** Виконання завдань дослідження із застосуванням запропонованого системного підходу до створення інноваційного продукту подвійного призначення, а саме, розроблення будівельних матеріалів, виробів та конструкцій за адитивними технологіями (3D-друк) та рекомендацій щодо їх виробництва дасть можливість створення проєктів будівель підвищеної безпеки, які можуть бути використані як для освоєння Місяця, так і для проживання на Землі, що сприятиме розвитку вітчизняної територіальної та виробничої інфраструктури. Земні і місячні породи дуже схожі, тому технології обробки земних порід можуть бути застосовні до місячних. Розроблення житлового модуля і проектування конструкцій має враховувати повний життєвий цикл об'єктів місячної бази, а також фізіологічні потреби членів екіпажу місячної бази.

Ключові слова: житловий модуль; місячна база; будівельні технології; архітектурно-конструктивно-технологічна система; автономні будівлі; будівельні матеріали; реголіт

GENERAL METHODOLOGICAL APPROACHES, PROVISIONS AND PRINCIPLES OF CREATING THE HOUSING MODULE LUNAR BASE

NIKIFOROVA T.D.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
SHEKHORKINA S.Ye.^{2*}, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
ZYNKEVYCH O.H.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
SHEVCHENKO T.Yu.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Reinforced-Concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 363-46-38, e-mail: nikiforova.tetiana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

^{2*} Department of Reinforced-Concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

³ Department of Reinforced-Concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (066) 145-01-99, e-mail: zinkevych.oksana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3425-8216

⁴ Department of Reinforced-Concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 750-26-97, e-mail: shevchenko.tetyana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0055-9819

Abstract. Problem statement. Today, the world's leading researchers are working on the creation of objects on the surface of the Moon. One of the urgent tasks is to develop living modules that provide the necessary protection for the crew of the lunar missions. Analysis of existing research has shown that in order to support long-term surface missions, the lunar infrastructure must provide the necessary functionality of the housing base, such as extraction and processing of raw materials, construction, construction of buildings and structures, life support. **Purpose of the article.** Analysis of the current state of scientific and applied problems and setting goals and objectives of the further study. The subject of the study is to establish the patterns of lunar bases design and operation in the human civilization interests. **Conclusions.** The solution of the objectives of the study using the proposed systematic approach of creating an innovative dual-use product, namely, the development of building materials, products and structures by additive technologies (3D-printing) and recommendations for their production will allow the creation of high-security building projects that can be used for development of the Moon and the Earth, which will contribute to the development of domestic territorial and industrial infrastructure. The earth and lunar rocks are extremely similar, so the earth rock processing technologies can be applied to the lunar rocks. The development of the residential module and the structures design must take into account the complete life cycle of the lunar base facilities, as well as the physiological needs of the lunar base crew.

Keywords: *living module; lunar base; construction technologies; architectural-structural-technological system; autonomous buildings, building materials, regolith*

Постановка проблеми. Людство мріє підкорити Космос протягом багатьох років. Деякі цілі давно стали реальністю, а про інші можна поки що тільки будувати проекти. Простір за межами Землі – це можливий ключ до вирішення проблем перенаселення, скорочення ресурсів і зміни кліматичних умов. Наразі ряд країн світу розробляють проекти з освоєння космічного простору, зокрема, супутника Землі – Місяця. Державне космічне агентство України підписало в рамках програми NASA «Артеміда» домовленості щодо принципів співпраці в цивільному дослідженні й використанні Місяця, Марса, комет та астероїдів у мирних цілях.

Очікується, що на Місяці є доступні поклади речовин, які потрібні, насамперед, для організації виробництва безпосередньо на місці. Існують декілька варіантів будівництва місячних баз. Одним із таких перспективних варіантів бачиться використання місячного ґрунту як будівельного матеріалу, технології 3D-друку будівельних об'єктів, напрацювання в напрямку створення автономних будівель.

Специфіка Місяця – це суворі

кліматичні умови: надзвичайно розріджена газова оболонка, високий перепад температур (від -190 до +120 °C), вплив сонячного вітру, радіації, наявність сейсмічної активності. Це вимагає під час розроблення і проектування конструкцій враховувати повний життєвий цикл об'єктів місячної бази, який включає створення архітектурної концепції, інженерно-технічні рішення життє-забезпечення, конструктивні рішення високофункціональних будівельних конструкцій та матеріалів для їх виготовлення. Сьогодні існує низка проектів створення місячного життєвого середовища в рамках різних конкурсів. На даний момент такі питання комплексно не вирішувались як в Україні, так і в світі.

Науковий колектив Придніпровської державної академії будівництва та архітектури виконує дослідження в рамках держбюджетної теми: «Розвиток наукових основ будівельних технологій створення житлового модуля місячної бази» (№ ДР 0121U109794). Базова ідея проекту полягає в можливості створення та функціонування автономних будівельних об'єктів житлового та виробничого

призначення для місячної бази шляхом розроблення комплексу інноваційних архітектурних, конструктивних, технічних та технологічних рішень із використанням місячної сировинної бази (реголіту, базальту тощо), сонячної енергії, адитивних технологій (3D-друку) та інформаційного моделювання, що в комплексі забезпечить стійкість до екстремальних впливів Космосу.

Аналіз публікацій. Сьогодні проблематикою створення об'єктів на поверхні Місяця займаються провідні дослідники світу. Одне з нагальних завдань це розроблення житлових модулів, які забезпечать необхідний захист екіпажу Місячних місій. Особливості географічних, геологічних, гравітаційних, температурних та атмосферних параметрів Місячного середовища та їх вплив на особливості конструкцій та обладнання для людського поселення на Місяці розглянуті в [1].

Рекомендації щодо майбутніх досліджень для розроблення концептуальних проєктів місячних будівельних об'єктів та будівельних стандартів для проєктування конструкцій на Місяці наведені у праці [2]. Автори статей [3; 4] пропонують конструкції місяцеходів, пристосованих для короткострокового проживання та транспортування екіпажів Місячних місій, які виготовляються та перевозяться із Землі. Проводяться численні дослідження із створення захищених постійних місячних баз [5].

Для мінімізації витрат від транспортування необхідних матеріалів на Місяць пропонується застосовувати місцеву сировину (місячний пил, реголіт). 3D-друк як будівельна технологія вважається перспективною стратегією для будівництва на Місяці. У праці [6] наводяться концептуальні архітектурно-конструктивні рішення житлового модуля на основі пневматичної оболонки, по якій 3D-друком передбачається наносити захисний шар з армованого реголіту. Технологія спікання реголіту на поверхні Місяця з використанням концентрованого сонячного світла для виробництва матеріалу,

придатного для 3D-друку, наведена в [7]. Питаннями реалізації програми Місячного поселення, формотворення, зведення та життєзабезпечення будівель і споруд займаються також вітчизняні вчені [8].

Можливість організації будівництва технічних споруд на поверхні Місяця з використанням реголіту, а також синтезу реголіту на основі земних ґрунтів демонструється в [9]. Ручну установку 3D-друку штучних будівельних виробів (цеглин) із місцевого реголіту для зведення житлових будівель на Місяці пропонують автори [10].

Як показав аналіз існуючих досліджень, для підтримки тривалих поверхневих місій місячна інфраструктура повинна забезпечувати необхідну функціональність житлово-виробничої бази, таку як видобування та переробку сировини, виготовлення будівельних конструкцій, зведення будівель і споруд, життєзабезпечення об'єктів.

Мета статті – аналіз сучасного стану науково-прикладної проблеми та постановка мети і завдань дослідження.

Метою проєкту виступає розроблення архітектурно-конструктивно-технологічної системи зведення і функціонування будівельних об'єктів місячної бази.

Проєкт спрямовано на розроблення науково-методичних, архітектурно-конструктивних, техніко-технологічних, нормативно-технічних засад створення та функціонування автономних будівельних об'єктів житлового та виробничого призначення для місячної бази шляхом розроблення комплексу інноваційних архітектурних, конструктивних, технічних та технологічних рішень та інформаційного моделювання, що в комплексі забезпечить стійкість до екстремальних впливів Космосу.

Завданнями проєкту передбачено визначення технічних вимог та принципів проєктування в місячному середовищі, розроблення інноваційної архітектурної концепції місячної бази з використанням 3D-друку, високофункціональних елементів конструкцій та інженерно-технічних рішень

автономного функціонування будівельних об'єктів, розроблення та дослідження складів та технології виготовлення матеріалів на основі місячного ґрунту (реголіту), технологічної схеми перетворення реголіту на будівельний матеріал, придатний до застосування в адитивному виробництві (3D-друк).

Предметом дослідження є встановлення закономірностей створення, розвитку і функціонування будівельних об'єктів місячних баз заради раціонального використання для розвитку людської цивілізації.

Результати досліджень. Автори досліджень мають один із перших досвідів у проектуванні поселень на інших планетах. Дослідження проводилися в галузі топології, функціональних зв'язків між об'єктами, раціональних архітектурних форм.

Навантаження і впливи, яким піддаються об'єкти в Космосі і безпосередньо на місячній поверхні, екстремальні з точки зору коливань температур, впливу радіації, відсутності повітря, можливості падіння тіл космічного походження на зведені об'єкти, вимоги до параметрів мікроклімату і життєзабезпечення, необхідності забезпечення харчуванням потребують вирішення нових питань з урахуванням існуючої бази знань, а також генерації нових знань із матеріалознавства, архітектурно-конструктивної топології об'єктів, автономних джерел енергії, надійності систем, технології 3D-друку, технологічного обладнання для зведення і забезпечення функціонування об'єктів на поверхні Місяця.

Багато напрацювань виконано в напрямі створення автономних будівель і автономних поселень із замкнутим циклом матеріальних і енергетичних потоків [12–14], але дослідження проводились для умов Землі, які кардинально відрізняються від умов на Місяці. Наступним доробком авторів стало дослідження з технологій ґрунтобетону й обладнання для виготовлення будівельних виробів [15; 16].

Поверхня Місяця складається з реголіту – місячного ґрунту, різнозернистого уламково-пилуватого шару, крупністю від мікрметрів до міліметрів. Цей матеріал може бути використаний як будівельний для створення конструкцій будівель і споруд [17–20]. Проте дослідження ґрунтобетонів із ґрунтом даного складу і в'язучими матеріалами різного типу не проводилися.

Ще одним доробком авторів проекту стали результати досліджень із розроблення наукових основ інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку [21; 22]. Ця технологія може бути використана для зведення будівельних об'єктів на Місяці.

Наступний компонент – це результати досліджень у галузі механіки композиційних матеріалів та неоднорідних конструкцій. Враховуючи екстремальні умови експлуатації об'єктів на Місяці, вочевидь, огорожувальні конструкції будівель мають бути композитними. Розвинуті авторами положення в цьому напрямі [23–25] можуть бути використані для розроблення конструкцій будівель і споруд для життєзабезпечення і безпеки життєдіяльності персоналу місячних баз.

Для досягнення поставленої мети проекту пропонується шляхом застосування загальновідомих та апробованих методів наукових теоретичних і експериментальних досліджень виявити закономірності процесу розроблення архітектурно-конструктивно-технологічної системи зведення і функціонування будівельних об'єктів місячної бази із застосуванням новітніх технологій 3D-друку, технічних та технологічних рішень переробки сировини місцевого походження, високоефективного використання природних і людських ресурсів.

Новизна запропонованого проекту полягатиме в застосуванні системного підходу до створення інноваційного продукту подвійного призначення, а саме: у розробленні будівельних матеріалів, виробів та конструкцій за адитивними технологіями (3D-друк), зведення будівель підвищеної

безпеки, які можуть бути використані як для освоєння Місяця, так і для Землі, що сприятиме розвитку вітчизняної територіальної та виробничої інфраструктури.

Методи та засоби, методика та методологія досліджень. Проєкт є міждисциплінарним, оскільки поєднує проблеми в галузі архітектури, будівельних конструкцій, матеріалознавства, цифрового моделювання та обчислень, адитивного виробництва, робототехніки, машинобудування та аерокосмічної техніки. З огляду на це, методологія проведення дослідження передбачає комплексний підхід, який полягає в таких етапах: аналіз завдань проєкту, пошук «прогалин», вивчення та формування розуміння проблеми за окремими дисциплінами; розроблення відповідних робочих концепцій, теорій, методів кожної дисципліни та інтеграція отриманих рішень в єдине ціле.

Для виконання завдань проєкту будуть використовуватися методи системного аналізу, розроблятися методи математичного і числового моделювання будівель із використанням сучасної обчислювальної техніки та ліцензійного програмного забезпечення; стандартні методи експериментальних досліджень у лабораторних умовах; методи раціонального проєктування для пошуку найкращого конструктивно-технологічного рішення будівлі. За відсутності стандартних методик досліджень автори, розроблять нові або вдосконалені методи числового моделювання фізико-технічних параметрів елементів та систем, методи проведення натурних та модельних експериментів.

Для виконання проєкту, аби підтвердити базову ідею можливості розроблення вітчизняної інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку будівельних об'єктів, необхідно:

– на основі аналізу та систематизації даних щодо зовнішніх впливів, зумовлених характерними параметрами Місячного середовища (місячний пил та метеорити,

вакуум, гравітація, випромінювання, швидка зміна температури тощо) запропонувати технічні вимоги до архітектурно-конструктивних рішень високофункціональних ресурсоефективних будівельних конструкцій, будівель та споруд місячної бази;

– з урахуванням характеристик середовища експлуатації, технологічних можливостей 3D-друку та його застосування в умовах та з використанням сировинних ресурсів Місяця розробити інноваційну архітектурну концепцію житлового та виробничого середовища та інфраструктури, а також інженерно-технічні рішення для забезпечення автономного функціонування місячної бази;

– для можливості реалізації архітектурної концепції місячної бази необхідно розробити та обґрунтувати високостійкі до екстремальних зовнішніх впливів елементи конструкцій для будівельних об'єктів;

– для забезпечення можливості проведення експериментальних досліджень будівельних матеріалів на основі місячного ґрунту розробити та дослідити моделі складів реголіту;

– розробити склади матеріалів на основі реголіту для технології 3D-друку, дослідити вплив параметрів сумішей (склад, гранулометрія, структура тощо) на цільові властивості;

– розробити технологічну схему перетворення місячного реголіту на будівельний матеріал, придатний для адитивного виробництва (3D-друку) в умовах Місяця, а також дослідити вплив технологічних параметрів процесу (шаблон швидкість сканування) на фізико-механічні властивості отримуваних виробів.

Висновки. Виконання поставлених завдань проєкту спрямоване на дослідження і розроблення будівельних технологій зі створення місячних баз для видобутку корисних копалин, космічних обсерваторій для дослідження космічного простору, дистанційного дослідження Землі з мирною і оборонною метою.

Зважаючи на вищенаведене, у

розробленні житлового модуля і життєдіяльності і виробничого процесу, проектуванні конструкцій необхідно розроблення конструктивних рішень враховувати повний життєвий цикл об'єктів будівель і споруд, дослідження місячної бази: проектування об'єктів із характеристик місячного ґрунту як функціональними зв'язками, місячні умови будівельного матеріалу, розроблення експлуатації в моделюванні параметрів складів будівельних сумішей, забезпечення безпечних і комфортних умов відпрацювання технології зведення об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Erik Seedhouse Lunar Outpost. The Challenges of Establishing a Human Settlement on the Moon. Springer Praxis Books. 2009. 300 p. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-09747-3_5.
2. Jablonski Alexander M., Ogden Kelly A. Technical Requirements for Lunar Structures. *Journal of Aerospace Engineering*. 2008. Vol. 21 (2). Pp. 72–90. doi:10.1061/(asce)0893-1321(2008)21:2(72).
3. Belvin W., Watson J., Singhal S. Structural concepts and materials for lunar exploration habitats. In Space 2006. 2006. P. 7338. URL : <https://doi.org/10.2514/6.2006-7338>
4. Schreiner Samuel S., Setterfield Timothy P., Roberson Daniel R., Putbese Benjamin, Kotowick Kyle, Vanegas Morris D., Curry Mike, Geiger Lynn M., Barmore David, Foley Jordan J., LaTour Paul A., Hoffman Jeffrey A., Head James W. An overnight habitat for expanding lunar surface exploration. *Acta Astronautica*. 2015. Vol. 112. Pp. 158–170. doi:10.1016/j.actaastro.2015.03.012
5. Peter Eckart The Lunar Base Handbook. An Introduction to Lunar Base Design, Development, and Operations. 2006. 820 p.
6. De Kestelier X., Dini E., Cesaretti G., Colla V., Pambaguian L. Lunar Outpost Design. 2015. URL : https://www.fosterandpartners.com/media/2634652/lunar_outpost_design_foster_and_partners.pdf
7. Meurisse A., Makaya A., Willsch C., Sperl M. Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronautica*. 2018. doi:10.1016/j.actaastro.2018.06.063.
8. Space technologies : present and future. Presentations theses. *7-th International conference*. Dnipro, 21-24 May, 2019. P. 195.
9. Игнатова А. М., Игнатов М. Н. Использование ресурсов реголита для освоения лунной поверхности. *Международный журнал экспериментального образования*. 2013. № 11-2. С. 101–110.
10. Литвиненко Ю. М., Остапенко С. О., Рогозинський А. А., Солонін Ю. М. Ручна версія 3D-друкування. 2019. *Science and innovation*. Вип. 15 (5). С. 78–83. URL : <http://scinneng.org.ua/sites/default/files/pdf/2019/N5/Lytvynenko.pdf>
11. Методология создания устойчивых экопоселений в Украине : коллективная монография. Под. общ. ред. д. т. н., проф. Н. В. Савицкого. Днипро : ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ТОВ «Роял Принт», 2017. 305 с.
12. Nikolaïenko S., Kulikov P., Pshinko O., Savytskyi M., Radkevych A., Unchik S., Dukat S., Yurchenko Ye., Babenko M. Sustainable housing and human settlement : monograph. General editorship by Savytskyi M. V. Dnipro–Bratislava : SHEE “Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture” – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. 263 p.
13. Нікіфорова Т. Д., Савицький М. В. Загальні методологічні підходи, положення і принципи проектування конструкцій заглиблених житлових будівель. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2016. Вып. 91. С. 97–106. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmmit_2016_91_15
14. Savytskyi M., Babenko M., Savytskyi O. Energy security of a low-rise residential ecobuilding "ZERO ENERGY" on the basis of solar energy. Sustainable housing and human settlement : monograph. SHEE "Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture" – Slovak University of Technology in Bratislava. Dnipro – Bratislava, 2018. Pp. 51–60.
15. Савицький М. В., Шатов С. В., Євсєєв Є. О. Організаційно-технологічні рішення виготовлення ґрунтоблоків. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Вып. 87. 2016. С. 106–111. URL : smm.pgasa.dp.ua/article/download/72445/67514
16. Шатов С. В., Савицький Н. В., Карлушин С. А. Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов для разработки стартапов. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. Вып. 99. 2017. С. 194–200. URL : smm.pgasa.dp.ua/article/download/104935/100068
17. Єлісєєва М. О., Бабенко М. М., Савицький М. В., Стоун К., Піпа В. В. Глинисті ґрунти Придніпровського регіону для ґрунтобетону. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. 2017. Вып. 99. С. 71–77. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2017_99_11

18. Савицький М., Конопляник О., Мислицька А., Лясота О. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D-друку будівельних конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 2. С. 59–68. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/201966>

19. Савицький М., Іванцов С., Нікіфорова Т., Зінкевич О., Халаф І. Напружено-деформований стан конструктивних елементів будівель, що зводяться за технологією 3D-друку. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 3. С. 80–88. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/208324>.

20. Шатов С. В., Савицький М. В., Марченко І. О. Удосконалення обладнання 3D-друку об'єктів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 6. С. 90–101. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/192233>.

21. Савицький М., Айріх Ш., Халаф І. З. та ін. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів : колективна монографія. За заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О. М., 2019. 233 с.

22. Savytskyi Mykola, Shatov Sergii, Konoplianiuk Oleksander, Ivantsov Serhii, Khalaf Ibrahim Zaidan. Development of 3D printing technology : materials, structural elements, equipment. Proceedings of the enviBUILD 2019. Edited by Hraška Jozef. Sciendo, 2020. Pp. 147–152. URL : <https://doi.org/10.2478/9788395669699-024>

23. Shekhorkina S., Savytskyi M., Nikiforova T., Shliakhov K., Myslytska A. Design of the composite timber-reinforced concrete bending elements considering nonlinear behaviour of the connection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5 (107). 2020. Pp. 14–21.

24. Andrianov I. V., Awrejcewicz J., Danishevs'kyi V. V., Ivankov A. O. Asymptotic Methods in the Theory of Plates with Mixed Boundary Conditions. Chichester, West Sussex: Wiley, 2014. 272 p. URL : <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118725190.subjectCd-CE80.html>.

25. Andrianov I. V., Awrejcewicz J., Danishevskyy V. V. Asymptotical Mechanics of Composites. Modelling Composites without FEM. New-York, Berlin Heidelberg: Springer, 2018. 329 p. URL : <http://www.springer.com/gp/book/9783319657851>

REFERENCES

1. Erik Seedhouse Lunar Outpost. The Challenges of Establishing a Human Settlement on the Moon. Springer Praxis Books. 2009, 300 p. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-09747-3_5.

2. Jablonski Alexander M. and Ogden Kelly A. Technical Requirements for Lunar Structures. Journal of Aerospace Engineering, 2008, no. 21 (2), pp. 72–90. doi:10.1061/(asce)0893-1321(2008)21:2(72).

3. Belvin W., Watson, J. and Singhal S. Structural concepts and materials for lunar exploration habitats. In Space 2006. 2006, p. 7338. URL : <https://doi.org/10.2514/6.2006-7338>

4. Schreiner Samuel S., Setterfield Timothy P., Roberson Daniel R., Putbren Benjamin, Kotowick Kyle, Vanegas Morris D., Curry Mike, Geiger Lynn M., Barmore David, Foley Jordan J., LaTour Paul A., Hoffman Jeffrey A. and Head James W. An overnight habitat for expanding lunar surface exploration. Acta Astronautica. 2015, no. 112, pp. 158–170. doi:10.1016/j.actaastro.2015.03.012.

5. Peter Eckart The Lunar Base Handbook. An Introduction to Lunar Base Design, Development, and Operations. 2006, 820 p.

6. De Kestelier X., Dini E., Cesaretti G., Colla V. and Pambaguian L. Lunar Outpost Design. 2015. URL : https://www.fosterandpartners.com/media/2634652/lunar_outpost_design_foster_and_partners.pdf

7. Meurisse A., Makaya A., Willsch C. and Sperl M. Solar 3D printing of lunar regolith. Acta Astronautica. 2018. doi:10.1016/j.actaastro.2018.06.063.

8. Space technologies : present and future. 7-th International conference. Presentations theses. Dnipro, 21–24 May, 2019, p. 195.

9. Ihnatova A.M. and Ihnatov M.N. *Yspolzovanye resursov reholitya dlia osvoenyia lunnoi poverkhnosti*. [Using of the regolith resources for the development of the lunar surface]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperymentalnoho obrazovanyia* [International Journal of Experimental Education]. 2013, no. 11-2, pp. 101–110. (in Russian)

10. Lytvynenko Yu.M., Ostapenko S.O., Rohozynskyy A.A. and Solonin Yu.M. *Ruchna versiiia 3D-drukuvannia*. [Manual version of 3D printing]. Science and Innovation. 2019, iss. 15 (5), pp. 78–83. URL : <http://scinneng.org.ua/sites/default/files/pdf/2019/N5/Lytvynenko.pdf>. (in Ukrainian)

11. *Metodolohyia sozdanyia ustoichyvykh ekoposelenyi v Ukrainyie : kollektyvnaia monohrafyia. Pod. obshch. red. d. t. n., prof. N.V. Savytskoho* [Methodology for creating sustainable ecovillages in Ukraine : collective monograph]. General ed. by Dr of Tech. Sc., Prof. N.V. Savytsky. SHEI "Prydniprovsk state Academy of Civil Engineering and Architecture". Dnipro : TOV "Roial Pryn", 2017, 305 p. (in Ukrainian)

12. Nikolaienko S., Kulikov P., Pshinko O., Savytskyi M., Radkevych A., Unchik S., Dukat S., Yurchenko Ye. and Babenko M. [Sustainable housing and human settlement : monograph]. General editorship by Savytskyi M.V. Dnipro – Bratislava : SHEI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, 263 p.

13. Nikiforova T.D. and Savytskyi M.V. *Zahalni metodolohichni pidkhody, polozhennia i pryntsyipy proektuvannia konstruksii zahlyblynykh zhytlovykh budivel* [General methodological approaches, provisions and principles of the deep

residential buildings structures design]. *Stroytelstvo. Materialovedenye. Mashynostroenye. Seryia : Ynnovatsyonnye tekhnolohyy zhyznennoho tsykla ob'ektiv zhylyshchno-hrazhdanskoho, promyshlennoho y transportnogo naznacheniya* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering. Series: Innovative Technologies of the Life Cycle of Objects of Housing and Civil, Industrial and Transport Purposes]. 2016, no. 91, pp. 97–106. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmiit_2016_91_15. (in Ukrainian)

14. Savytskyi M., Babenko M. and Savytskyi O. Energy security of a low-rise residential ecobuilding "ZERO ENERGY" on the basis of solar energy. Sustainable housing and human settlement : monograph. SHEI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" – Slovak University of Technology in Bratislava. Dnipro – Bratislava, 2018, pp. 51–60.

15. Savytskyi M.V., Shatov S.V. and Yevsieiev Ye.O. *Orhanizatsiino-tekhnolohichni rishennia vyhotovlennia hruntoblokiv* [The organizational and technological solutions for the soil blocks manufacture]. *Stroytelstvo. Materialovedenye Mashynostroenye. Seryia : Sozdanye vysokotekhnolohycheskykh ekokompleksiv v Ukrainy na osnove kontseptsyy sbalansyrovannoho (ustoi chyvoho) rozvytyia* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering. Series: Creation of High-tech Eco-complexes in Ukraine Based on the Concept of Balanced (Sustainable) Development]. Dnipro : SHEI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture". 2016, no. 87, pp. 106–111. URL : smm.pgasa.dp.ua/article/download/72445/67514. (in Ukrainian)

16. Shatov S.V., Savytskyi N.V. and Karpushyn S.A. *Obobshchentye ynnovatsyonnykh tekhnolohiy 3D-pechaty stroytelnykh ob'ektiv dlia razrabotky startapov* [Generalization of innovative technologies for 3D printing of construction objects for the startups development]. *Stroytelstvo. Materialovedenye Mashynostroenye* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering]. Dnipro : SHEI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 2017, no. 99, pp. 194–200. URL : smm.pgasa.dp.ua/article/download/104935/100068. (in Russian)

17. Yeliseieva M.O., Babenko M.M., Savytskyi M.V., Kleiton Stoun and Pipa V.V. *Hlynysti grunty Prydniprovskoho rehionu dlia gruntobetonu* [Clay soils of the Dnieper region for soil concrete]. *Stroytelstvo. Materialovedenye. Mashynostroenye. Seryia : Sozdanye vysokotekhnolohycheskykh ekokompleksiv v Ukrainy na osnove kontseptsyy sbalansyrovannoho (ustoi chyvoho) rozvytyia* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering. Series : Creation of High-tech Eco-complexes in Ukraine Based on the Concept of Balanced (Sustainable) Development]. 2017, no. 99, pp. 71–77. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2017_99_11. (in Ukrainian)

18. Savytskyi M., Konoplianyk O., Myslytska A. and Liasota O. *Vyznachennia fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk betoniv dlia 3D-druku budivelnykh konstruksii* [Determination of physical and mechanical characteristics of concrete for 3D-print building structures]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 2, pp. 59–68. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/201966>. (in Ukrainian)

19. Savytskyi M., Ivantsov S., Nikiforova T., Zinkevych O. and Khalaf I. *Napruzhenno-deformovanyi stan konstruktivnykh elementiv budivel, shcho zvodiat'sia za tekhnolohiieiu 3D-druku* [Stress-strain state of structural elements of buildings erected by 3D-printing technology]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 3, pp. 80–88. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/208324>. (in Ukrainian)

20. Shatov S.V., Savytskyi M.V. and Marchenko I.O. *Udoskonalennia obladnannia 3D-druku ob'ektiv* [The improving 3D printing equipment]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 6, pp. 90–101. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/192233>. (in Ukrainian)

21. Savytskyi M., Airikh Sh., Khalaf I.Z. and oth. *Arkhitekturno-konstruktivno-tekhnolohichna systema 3d-druku budivelnykh ob'ektiv : kolektivna monohrafiia* [The architectural-constructive-technological system of the construction objects 3D-printing : collective monograph]. Dnipro : FOP Udovychenko O.M., 2019, 233 p.

22. Savytskyi Mykola, Shatov Sergii, Konoplianiuk Oleksander, Ivantsov Serhii and Khalaf Ibrahim Zaidan. Development of 3D printing technology : materials, structural elements, equipment. Proceedings of the enviBUILD-2019. Edited by Hraška Jozef. Sciendo, 2020, pp. 147–152. URL : <https://doi.org/10.2478/9788395669699-024>

23. Shekhorkina S., Savytskyi M., Nikiforova T., Shliakhov K. and Myslytska A. Design of the composite timber-reinforced concrete bending elements considering nonlinear behaviour of the connection. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, no. 5 (107), pp. 14–21.

24. Andrianov I.V., Awrejcewicz J., Danishevskyy V.V. and Ivankov A.O. Asymptotic Methods in the Theory of Plates with Mixed Boundary Conditions. Chichester, West Sussex: Wiley, 2014, 272 p. URL : <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118725190,subjectCd-CE80.html>

25. Andrianov I.V., Awrejcewicz J. and Danishevskyy V.V. Asymptotical Mechanics of Composites. Modelling Composites without FEM. New-York, Berlin Heidelberg : Springer, 2018, 329 p. URL : <http://www.springer.com/gp/book/9783319657851>

Надійшла до редакції: 11.10.2021.