

УДК 624.074.2:629.78

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.82.881

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУПОЛА-ОБОЛОНКИ МІСЯЧНОГО МОДУЛЯ

САВИЦЬКИЙ М. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ШЕХОРКІНА С. Є.^{2*}, *докт. техн. наук, доц.*,
СОПІЛЬНЯК А. М.³, *канд. техн. наук, доц.*,
ШЛЯХОВ К. В.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
СІРЕНОК К. О.⁵, *студ.*

¹ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

^{2*} Кафедра залізобетонних та 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 та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-54-45, e-mail: artem_sopilnyak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

⁴ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-54-45, e-mail: shliakhov.kostiantyn@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

⁵ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 344-14-39 e-mail: sirenokk@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Сьогодні проблематикою вивчення можливостей будівництва баз та поселень на поверхні Місяця займаються провідні дослідники світу. Для забезпечення захисту екіпажу довготривалих місій необхідна розробка житлових модулів. Ефективним рішенням для будівництва на Місяці стане застосування місцевого ґрунту (реголіту) для виробництва бетону та арматури. Наразі вже є дані щодо фізико-механічних властивостей таких матеріалів, проте відсутні дослідження роботи монолітних несних конструкцій з їх застосуванням. **Мета статті** – оцінення напружено-деформованого стану куполів-оболонки житлових модулів, розташованих на поверхні Місяця, з урахуванням фізико-механічних характеристик будівельних матеріалів із сировини місцевого походження (реголіту) та умов середовища. **Висновки.** З використанням положень мембранної теорії оболонки та скінченноелементного моделювання отримано дані щодо напружено-деформованого стану тонкостінних куполів-оболонки для зведення місячних житлових модулів на 8, 10 та 12 членів екіпажу. На основі отриманих даних щодо внутрішніх зусиль визначено необхідну товщину та площу армування оболонки модуля. Проведено порівняльний аналіз результатів визначення внутрішніх зусиль та конструктивних параметрів розглянутих куполів-оболонки. Установлено, що відхилення величин внутрішніх зусиль біля опорного кільця в меридіональному напрямку, внутрішніх зусиль у зоні верхівки купола, а також площа поперечного перерізу арматури та товщина оболонки для всіх розглянутих варіантів не перевищує 10 %. Виняток становлять дані щодо внутрішніх зусиль біля опорного кільця в кільцевому напрямку від внутрішнього тиску для купола-оболонки на вісьмох членів екіпажу, від усіх типів навантажень для варіанта на 10 та 12 членів екіпажу, що пов'язано з відмінностями обраних методів аналізу.

Ключові слова: купол-оболонка; місячний житловий модуль; реголіт; внутрішні зусилля

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE FOR DOME-SHELL OF LUNAR MODULE

SAVYTSKYI M.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SHEKHORKINA S.Yev.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SOPILNIAK A.M.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SHLIAKHOV K.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SIRENOK K.O.⁵, *Stud.*

¹ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

^{2*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

³ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 452-54-45, e-mail: artem_sopilnyak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

⁴ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 452-54-45, e-mail: shliakhov.kostiantyn@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

⁵ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (099) 344-14-39, e-mail: sirenokk@gmail.com

Abstract. Problem statement. Today, the world's leading researchers are engaged in investigating the possibilities of building bases and settlements on the surface of the Moon. To ensure the protection of the crew for long-duration missions, the development of residential modules is required. An effective solution for construction on the Moon is the use of local soil (regolith) for the production of concrete and reinforcement. For today, there are already data on the physical and mechanical properties of such materials, but the studies of the performance for monolithic load-bearing structures made of them are limited. **The purpose of the article** is to assess the stress-strain state for dome-shells of living modules located on the surface of the Moon, taking into account the physical and mechanical characteristics of building materials from local raw materials (regolith) and environmental conditions. **Conclusions.** Using the membrane theory' methods of shells and finite element modeling, data on the stress-strain state of thin-walled shell domes for the construction of lunar living modules for 8, 10, and 12 crew members were obtained. On the basis of the data obtained on internal forces, the required thickness and reinforcement area for the module' shell were determined. A comparative analysis of the results of determining the internal forces and the structural parameters for the dome-shells considered was carried out. It was established that the deviation of the internal forces values near the support ring in the meridional direction, the internal forces in the area of the dome' top, as well as the cross-sectional reinforcement area and the shell thickness for all considered options do not exceed 10 %. Exceptions are the data on the internal forces near the support in the ring direction caused by the internal pressure for the 8-crew shell dome, and caused by all types of loads for the 10- and 12-crew variant, which is due to differences in the chosen analysis methods.

Keywords: *dome-shell; lunar living module; regolith; internal forces*

Постановка проблеми, мета і завдання дослідження. На сьогоднішній день актуальною стала тема освоєння Космосу та найближчих сусідів Землі. Створення нових поселень, космічний туризм, пошуки нових ресурсів та корисних копалин – усе це необхідне для розвитку досліджень космічного простору. Місяць, як найближче до Землі небесне тіло, розглядається як складова частина космічної інфраструктури. Створення місячної бази дозволить проводити більш детальну розвідку ресурсів космічних тіл для видобутку корисних копалин, вивчення ресурсів космічного простору та дистанційне дослідження Землі з мирною і оборонною метою.

Проблематикою вивчення місячного середовища з перспективою будівництва баз та поселень на поверхні Місяця займаються провідні дослідники світу. Наразі запропоновано велику кількість концепцій місячних баз. Одним із нагальних завдань автори називають розроблення житлових

модулів, які забезпечують необхідний захист екіпажу місячних місій.

Згідно з багатьма пропозиціями [1–3], конструкції житлових модулів місячної бази складаються з двох основних частин: внутрішньої герметичної оболонки та зовнішнього захисного покриття. Внутрішня частина забезпечує екіпажу атмосферу під тиском і складається з надувної конструкції, яка виготовляється на Землі, має незначну вагу та об'єм, легко транспортується та монтується. Зовнішня частина складається з монолітної оболонки, яка після зведення покривається шаром місцевого ґрунту реголіту. Оболонка з покриттям забезпечує захист від температурних перепадів, радіаційного випромінювання та метеоритних ударів.

Для економії витрат на транспортування матеріалів із поверхні Землі автори [4] пропонують виготовляти матеріали для зовнішньої монолітної оболонки (бетон та арматуру) безпосередньо на Місяці з

використанням місцевого ґрунту – реголіту. Наразі вже є дані щодо фізико-механічних властивостей таких матеріалів, проте відсутні дослідження роботи монолітних несних конструкцій з їх застосуванням [5–7].

Метою роботи – оцінення напружено-деформованого стану (НДС) куполів-оболонок житлових модулів, розташованих на поверхні Місяця, з урахуванням фізико-механічних характеристик будівельних матеріалів із сировини місцевого походження (реголіту) та умов середовища.

Виклад основного матеріалу. Обрана для аналізу конструктивна схема місячного житлового модуля являє собою тонкостінну оболонку купольної форми. Розміри визначаються виходячи з кількості членів екіпажу та необхідного житлового об'єму. На сьогоднішній день стандарти NASA [8] рекомендують мінімальний житловий об'єм на одну людину близько 20 м^3 , за якого забезпечується ефективність виконання завдань екіпажу протягом не менше чотирьох місяців.

Для житлового модуля в цьому дослідженні прийнято проектний об'єм, який включає в себе як житлові, так і робочі площі для довгострокового проживання в обмеженому просторі, і складає 120 м^3 на людину. Ця величина приблизно дорівнює об'єму на одного члена екіпажу на борту Міжнародної космічної станції [9]. Ефективна висота житлового модуля прийнята 4 м.

З урахуванням розміщення інженерних систем повна висота складатиме 7 м [10]. Площа на одного члена екіпажу становить $34,3 \text{ м}^2$. З урахуванням необхідної площі для обладнання та зберігання речей, яка складає приблизно 20 % від отриманої на одну людину, визначено необхідну площу внутрішнього простору для різного складу екіпажу (табл. 1). Кількість членів екіпажу прийнята за даними авторів [10]. Геометричні параметри місячного житлового модуля наведені на рисунку 1.

Для проведення аналізу прийнято, що для зведення купола-оболонки житлового модуля будуть використовуватись переважно місцеві матеріали. Особливість бетону, що виготовляється на Місяці, полягає в тому, що він не містить води, складається із сірчаного

в'язучого та інертних заповнювачів і наповнювачів на основі реголіту. Фізико-механічні властивості бетону такі [5]: щільність $2\,200 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт Пуассона 0,18; міцність на стиск $24,0..33,8 \text{ МПа}$; міцність на розтяг $2,0..3,7 \text{ МПа}$; модуль пружності $21,4 \times 10^3 \text{ МПа}$.

Таблиця 1

Параметри місячного житлового модуля

| Кількість членів екіпажу | 8 | 10 | 12 |
|------------------------------------------------------------|------|------|------|
| Житловий простір, м^2 | 275 | 343 | 412 |
| Додаткові 20 % для обладнання та складування, м^2 | 55 | 69 | 83 |
| Загальна площа, м^2 | 330 | 412 | 495 |
| Радіус кривизни купола, м | 14,1 | 17,4 | 20,5 |

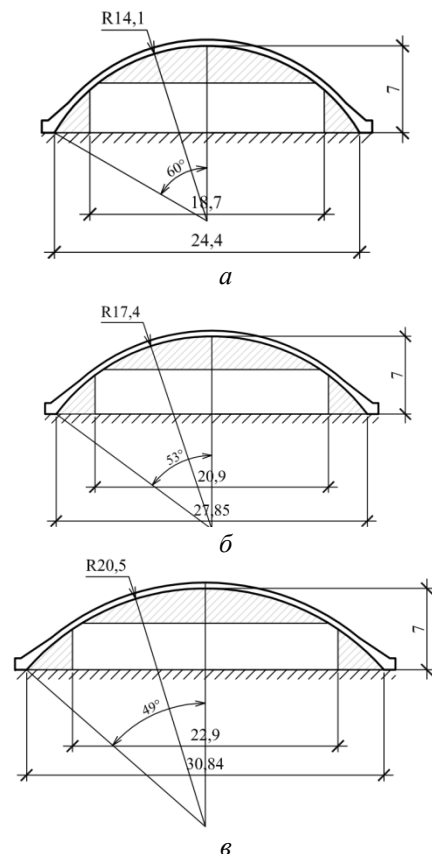


Рис. 1. Геометричні параметри місячного житлового модуля: а – 8 членів екіпажу; б – 10 членів екіпажу; в – 12 членів екіпажу

Армування купола-оболонки здійснюється композитною арматурою, яка має вигляд безперервного ровінгу, отриманого шляхом плавлення та охолодження місячного реголіту. Фізико-механічні властивості композитної арматури

[7]: міцність на розтяг 600...800 МПа; модуль пружності $41..50 \times 10^3$ МПа.

Розрахунок купола-оболонки житлового модуля проводився на статичні навантаження з метою отримання зусиль в елементах купола-оболонки, для подальшого визначення його геометричних та жорсткісних характеристик. Навантаження, які діють на купол-оболонку житлового модуля: власна вага (SW); вага шару з реголіту товщиною 2,5 м для захисту від радіації та падаючих метеоритів (G); внутрішній тиск для забезпечення нормальних умов життєдіяльності всередині модуля (P). Для визначення навантажень враховано гравітаційне прискорення, яке на Місяці становить 1/6 частину від земного, і дорівнює $1,62 \text{ м/с}^2$ [1]. Отримані значення навантажень наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Навантаження на купол-оболонку житлового модуля

| | | | |
|-----------------------------------------------------|------|-----|------|
| Кількість членів екіпажу | 8 | 10 | 12 |
| Власна вага (SW), кН/м^2 | 0,93 | 1,0 | 1,25 |
| Вага захисного шару з реголіту (G), кН/м^2 | 7,3 | | |
| Внутрішній тиск (P), кН/м^2 | 69 | | |

З метою порівняння отриманих результатів та обраних методів розрахунку визначення характеристик НДС виконувалось за двома методами – мембранною теорією оболонок (МТО) та методом скінченних елементів (МСЕ).

Для визначення внутрішніх зусиль купольної конструкції згідно з положеннями МТО використані такі залежності [11]. За дії навантаження від ваги захисного шару з реголіту:

$$N1 = -G \cdot rc / (1 + \cos\varphi), \quad (1)$$

$$N2 = -G \cdot rc \cdot \cos\varphi - N1, \quad (2)$$

де $N1$ – внутрішня сила в меридіональному напрямку; $N2$ – внутрішня сила в напрямку обруча; G – вага захисного шару з реголіту; rc – радіус кривизни оболонки; φ – кут, виміряний від осі обертання оболонки.

За дії навантаження від внутрішнього тиску внутрішні зусилля становлять:

$$N1 = N2 = (P \cdot rc) / 2, \quad (3)$$

де P – внутрішній тиск

Реалізація розрахунку за МСЕ виконувалась за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Розрахункова модель купола-оболонки створювалась із застосуванням функції поверхні обертання (сфери) та з використанням скінченних елементів (СЕ) 42 «Універсальний трикутний скінченний елемент оболонки». Опорне кільце створюється стрижневими елементами з використанням СЕ 10 «Універсальний просторовий стержневий скінченний елемент». У моделюванні куполів у ПК ЛІРА-САПР їх товщина попередньо приймалась згідно з даними [3]: для модуля на вісім членів екіпажу 0,26 м; на 10 членів екіпажу – 0,28 м; на 12 членів екіпажу – 0,35 м. Вузлам опорного кільця призначено шарнірний тип закріплення. Загальний вигляд розрахункової моделі купола-оболонки показано на рисунку 2.

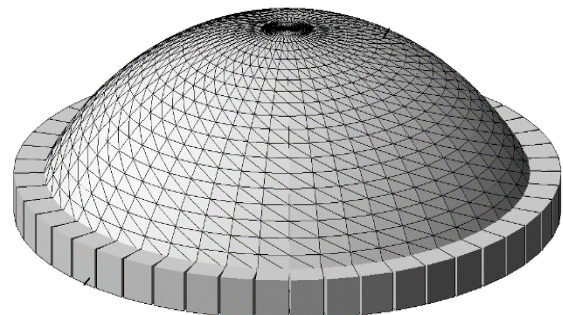


Рис. 2. Загальний вигляд скінченноелементної моделі купола-оболонки

У результаті проведених розрахунків двома методами отримано дані щодо внутрішніх зусиль у куполі-оболонці, які були використані для визначення необхідної товщини та площі армування оболонки.

Необхідну площу поперечного перерізу арматури для армування купола житлового модуля визначимо з умови забезпечення міцності оболонки:

$$Ni \leq ffrg \cdot Afrg, \quad (4)$$

де Ni – внутрішні зусилля в конструкції купола; $ffrg$ – міцність арматури з реголіту; $Afrg$ – площа поперечного перерізу арматури з реголіту.

Таблиця 3

Порівняльні дані для купола-оболонки на 8 членів екіпажу

| Назва показника | | Метод аналізу | | k % |
|----------------------------------------------|-------|---------------|--------|-------|
| | | МТО | МСЕ | |
| Внутрішні зусилля біля опорного кільця, кН/м | N1,SW | -8,74 | -8,5 | 2,75 |
| | N2,SW | 2,2 | 2,02 | 8,18 |
| | N1,G | -68,62 | -66,82 | 2,62 |
| | N2,G | 17,16 | 15,84 | 7,7 |
| | N1,P | 486,45 | 455 | 6,47 |
| | N2,P | 486,45 | -38,48 | 107,9 |
| Внутрішні зусилля біля верхівки купола, кН/м | N1,SW | -6,56 | -6,45 | 1,68 |
| | N2,SW | -6,56 | -6,48 | 1,22 |
| | N1,G | -51,47 | -50,7 | 1,5 |
| | N2,G | -51,47 | -50,7 | 1,5 |
| | N1,P | 486,45 | 491,4 | -1,02 |
| | N2,P | 486,45 | 507 | -4,23 |
| Afgr, см ² (меридіональна) | | 8,11 | 8,2 | -1,11 |
| Afgr, см ² (кільцева) | | 8,11 | 8,5 | -4,81 |
| δshell (оп.кільце), м | | 0,25 | 0,24 | 4 |

Таблиця 4

Порівняльні дані для купола-оболонки на 10 членів екіпажу

| Назва показника | | Метод аналізу | | k % |
|----------------------------------------------|--------|---------------|---------|--------|
| | | МТО | МСЕ | |
| Внутрішні зусилля біля опорного кільця, кН/м | N1, SW | -10,86 | -10,612 | 2,28 |
| | N2, SW | 0,39 | 0,874 | -124,1 |
| | N1, G | -79,29 | -77,56 | 2,18 |
| | N2, G | 2,83 | 6,384 | -125,6 |
| | N1, P | 600,3 | 557,2 | 7,18 |
| | N2, P | 600,3 | 2,1 | 99,6 |
| Внутрішні зусилля біля верхівки купола, кН/м | N1, SW | -8,7 | -8,57 | 1,49 |
| | N2, SW | -8,7 | -8,57 | 1,49 |
| | N1, G | -63,51 | -62,44 | 1,69 |
| | N2, G | -63,51 | -62,72 | 1,24 |
| | N1, P | 600,3 | 604,8 | -0,75 |
| | N2, P | 600,3 | 621,6 | -3,55 |
| Afgr, см ² (меридіональна) | | 10,0 | 10,0 | 0 |
| Afgr, см ² (кільцева) | | 10,0 | 10,4 | 4 |
| δshell, м | | 0,3 | 0,28 | 6,67 |

Для запобігання утворенню тріщин та забезпечення герметичності купола-оболонки необхідний розрахунок стійкості до тріщин, який виконується за формулою:

$$N_i \leq N_{crc} = flct \cdot A_c + \sigma_{fgr} \cdot A_{fgr}, \quad (5)$$

де N_i – внутрішнє зусилля в конструкції купола; N_{crc} – граничне зусилля до утворення тріщин; $flct$ – міцність бетону з реголіту на розрив; A_c – площа поперечного перерізу купола-оболонки; A_{fgr} – площа поперечного перетину арматури з реголіту; σ_{fgr} – напруження в арматурі з реголіту, що відповідають утворенню тріщин у бетоні, які можна отримати через величину граничних деформацій бетону з реголіту за розтягу:

$$\sigma_{fgr} = E_{fgr} \cdot \epsilon_{lctu}, \quad (6)$$

де E_{fgr} – модуль пружності арматури з реголіту; ϵ_{lctu} – гранична деформація бетону з реголіту за розтягу.

Гранична деформація бетону з реголіту прийнята як для звичайного бетону:

$$\epsilon_{lctu} = 2flct \cdot Elc, \quad (7)$$

де $flct$ – міцність місячного бетону на розрив; Elc – модуль пружності місячного бетону.

Виходячи з вищенаведених формул (4–7), товщина оболонки місячного житлового модуля (δ_{shell}) визначається таким чином:

$$\delta_{shell} = N_i / flct - 2A_{fgr} \cdot E_{fgr} / Elc. \quad (8)$$

За комплексом отриманих даних виконано порівняльний аналіз результатів визначення внутрішніх зусиль та конструктивних параметрів розглянутих куполів-оболонки. У таблицях 3–5 наведено значення внутрішніх зусиль у меридіональному (N1, і) та в кільцевому (N2, і) напрямках у зоні опорного кільця та верхівки купола (індекс «і» позначає тип навантаження згідно з табл. 2), площа поперечного перерізу арматури (A_{fgr}) в меридіональному та кільцевому напрямках і товщина оболонки (δ_{shell}), а також відсоток відхилення результатів (k %), отриманих згідно з положеннями МТО та МСЕ.

Таблиця 5

**Порівняльні дані для купола-оболонки
на 12 членів екіпажу**

| Назва показника | | Метод аналізу | | k % |
|----------------------------------------------|--------|---------------|--------|--------|
| | | МТО | МСЕ | |
| Внутрішні зусилля біля опорного кільця, кН/м | N1, SW | -15,48 | -14,84 | 4,13 |
| | N2, SW | -1,33 | 1,53 | 215,04 |
| | N1, G | -90,37 | -86,45 | 4,34 |
| | N2, G | -7,8 | 8,89 | 213,97 |
| | N1, P | 707,25 | 714 | -0,95 |
| | N2, P | 707,25 | -21,91 | 103,1 |
| Внутрішні зусилля біля верхівки купола, кН/м | N1, SW | -12,8 | -12,64 | 1,25 |
| | N2, SW | -12,8 | -12,64 | 1,25 |
| | N1,G | -74,83 | -73,85 | 1,31 |
| | N2,G | -74,83 | -73,85 | 1,31 |
| | N1,P | 707,25 | 644 | 8,94 |
| | N2,P | 707,25 | 738,5 | -4,42 |
| Afgr, см ² (меридіональна) | | 11,79 | 12,0 | -1,88 |
| Afgr, см ² (кільцева) | | 11,79 | 12,3 | -4,33 |
| δshell, м | | 0,35 | 0,36 | 2,86 |

Висновки.

Наведено результати аналізу НДС та конструктивних параметрів тонкостінних куполів-оболонки для зведення житлових модулів на поверхні Місяця на 8, 10 та 12 членів екіпажу. Дослідження виконувалося із застосуванням двох методів (мембранної теорії оболонки та скінченних елементів) з урахуванням фізико-механічних характеристик будівельних матеріалів (бетону та арматури) із сировини місцевого

походження (реголіту) та умов Місячного середовища. На основі отриманих даних щодо внутрішніх зусиль в куполі-оболонці визначено необхідну товщину та площу армування оболонки.

Проведено порівняльний аналіз результатів визначення внутрішніх зусиль та конструктивних параметрів розглянутих куполів-оболонки. Установлено, що для всіх розглянутих варіантів куполів-оболонки місячних житлових модулів відхилення величин внутрішніх зусиль біля опорного кільця в меридіональному напрямку, внутрішніх зусиль у зоні верхівки купола, а також площа поперечного перерізу арматури та товщина оболонки не перевищує 10 %. Виняток становлять дані щодо внутрішніх зусиль біля опорного кільця в кільцевому напрямку від внутрішнього тиску для купола-оболонки на вісьмох членів екіпажу, від усіх типів навантажень для варіанта на 10 та 12 членів екіпажу.

Істотне відхилення результатів у зоні переходу від оболонки до опорного кільця може бути викликане відмінністю підходів обраних методів аналізу, а саме тим, що у мембранній теорії оболонки розв'язок отримується для двовимірної задачі, тоді як для аналізу методом скінченних елементів використано тривимірну модель. Також на відмінності отриманих результатів можуть впливати недосконалості моделювання купола-оболонки в ПК ЛІРА-САПР в зоні переходу від основної оболонки до опорного кільця, що свідчить про необхідність удосконалення методики створення розрахункової моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Ruess F., Schaenzlin J., Benaroya H. Structural Design of a Lunar Habitat. *Journal of Aerospace Engineering*. 2006. Vol. 19 (3). Pp. 133–157. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(2006\)19:3\(133\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(2006)19:3(133)) (дата звернення: 26.07.2022).
- 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 (дата звернення: 26.07.2022).
- Savytskyi M. Construction Technologies for the Creation of Living and Industrial Modular Settlement of Lunar Base : monograph. Dnipro : Udovychenko O. M. Private Enterprise, 2021. 91 p.
- Happel J. A. Indigenous Materials for Lunar Construction. ASME. *Appl. Mech. Rev.* 1993. Vol. 46 (6). Pp. 313–325. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3120360> (дата звернення: 26.07.2022).
- Markandeya Raju P., Pranathi S. Lunarcrete – a review. *Proceedings of AARCV 2012 – International Conference on Advances in Architecture and Civil Engineering*. 2012. Vol. 2. Pp. 886–891. URL: https://www.researchgate.net/publication/283048515_Lunarcrete_-_A_Review_Paper_ID_AR84AS (дата звернення: 26.07.2022).

6. Goulas A., Binner J. G., Engstrøm D. S., Harris R. A., Friel R. J. Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L : Journal of Materials : Design and Applications*. 2019. Vol. 233 (8). Pp. 1629–1644. URL: <https://doi.org/10.1177/1464420718777932> (дата звернення: 26.07.2022).
7. Tucker D., Ethridge E., Toutanji H. Production of Glass Fibers for Reinforcement of Lunar Concrete. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006. AIAA 2006-523. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2006-523> (дата звернення: 26.07.2022).
8. NASA-STD-3000. The Man-System Integration Standards. URL: <https://msis.jsc.nasa.gov/> (дата звернення: 26.07.2022).
9. International Space Station. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html (дата звернення: 26.07.2022).
10. Benaroya H., Bernold L., Chua K. M. Engineering. Design and Construction of Lunar Bases. *Journal of Aerospace Engineering*. 2002. Vol. 15 (2). Pp. 33–45. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(2002\)15:2\(33\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(2002)15:2(33)) (дата звернення: 26.07.2022).
11. Billington D.P. Thin shell concrete structures. McGraw-Hill Book Company, 1990. 373 p.

REFERENCES

1. Ruess F., Schaenzlin J. and Benaroya H. Structural Design of a Lunar Habitat. *Journal of Aerospace Engineering*. 2006, vol. 19 (3), pp. 133–157. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(2006\)19:3\(133\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(2006)19:3(133)) (accessed on: 26.07.2022).
2. 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 (accessed on: 26 July 2022).
3. Savytskyi M. Construction Technologies for the Creation of Living and Industrial Modular Settlement of Lunar Base : monograph. Dnipro : Udovychenko O.M. Private Enterprise, 2021, 91 p.
4. Happel J.A. Indigenous Materials for Lunar Construction. *ASME. Appl. Mech. Rev.* 1993, vol. 46 (6), pp. 313–325. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3120360> (accessed on: 26 July 2022).
5. Markandeya Raju P. and Pranathi S. Lunarcrete – a review. *Proceedings of AARCV 2012 – International Conference on Advances in Architecture and Civil Engineering*. 2012, vol. 2, pp. 886–891. URL: https://www.researchgate.net/publication/283048515_Lunarcrete_-_A_Review_Paper_ID_AR84AS (accessed on: 26 July 2022).
6. Goulas A., Binner J.G., Engstrøm D.S., Harris R.A. and Friel R.J. Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L : Journal of Materials : Design and Applications*. 2019, vol. 233 (8), pp. 1629–1644. URL: <https://doi.org/10.1177/1464420718777932> (accessed on: 26 July 2022).
7. Tucker D., Ethridge E. and Toutanji H. Production of Glass Fibers for Reinforcement of Lunar Concrete. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006, AIAA 2006-523. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2006-523> (accessed on: 26 July 2022).
8. NASA-STD-3000. The Man-System Integration Standards. URL: <https://msis.jsc.nasa.gov/> (accessed on: 26 July 2022).
9. International Space Station. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html (accessed on: 26 July 2022).
10. Benaroya H., Bernold L. and Chua K.M. Engineering, Design and Construction of Lunar Bases. *Journal of Aerospace Engineering*. 2002, vol. 15 (2), pp. 33–45. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(2002\)15:2\(33\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(2002)15:2(33)) (accessed on: 26 July 2022).
11. Billington D.P. Thin shell concrete structures. McGraw-Hill Book Company, 1990, 373 p.

Надійшла до редакції 14.07.2022