

А. А. Пустовгаров ORCID.org/0009-0007-5456-2972,
д-р техн. наук І. О. Гусарова ORCID.org/0000-0002-2790-7564,
канд. техн. наук К. В. Козіс ORCID.org/0000-0002-3739-9559,
Я. А. Лисенко ORCID.org/0009-0009-4095-4355,
д-р філос. Г. Г. Осіновий ORCID.org/0000-0002-6305-7835

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ КОСМОДРОМУ МІСЯЧНОЇ БАЗИ

Освоєння космосу на початку XXI сторіччя відзначено переходом від досліджень і вивчення Сонячної системи до її колонізації. Головний об'єкт, до якого прикуто увагу, – природний супутник Землі. Короткочасні пілотовані експедиції на сьогодні заплановано в різних країнах. Передбачено поступово забезпечити постійне перебування людей на Місяці, для чого будуть створені місячні бази. Одним з найважливіших завдань під час освоєння Місяця буде забезпечення надійного перевезення людей і вантажів між Землею і Місяцем. Інтенсивність польотів космічних кораблів значно зросте після початку створення місячних поселень і залишиться такою на подальших етапах. Тому, безумовно, космодроми стануть важливими складовими частинами місячних баз. При цьому, крім підготовлених площадок, космодроми повинні мати необхідне обладнання та ресурси. Створення космодрому на Місяці має свої особливості, дослідженню яких присвячено цю статтю. Розглянуто особливості створення космодрому на Місяці з урахуванням незвичності цього завдання, коротко проаналізовано сучасні підходи до його вирішення. Зроблено висновки щодо можливого місця розташування космодрому, показано, який вплив може мати рельєф місячної поверхні на роботи зі створення космодрому, на які чинники слід звернути увагу в першу чергу. Попередньо наведено основні кількісні та якісні показники, що характеризують процес посадки космічного апарата. Надано рекомендації щодо вибору форми та розмірів злітно-посадочних площадок для космічних апаратів. Сформовано можливий варіант структурної схеми місячного космодрому з переліком основних складових елементів і обладнання. Визначено певні обмеження, які потрібно буде взяти до уваги, виявлено сукупність різних чинників, які впливатимуть на проектування космодрому та які необхідно буде враховувати. Проведені роботи можуть стати теоретичною основою для подальшого розвитку концепції місячної бази.

Ключові слова: колонізація Місяця, місячна база, місячний космодром, злітно-посадочна площадка.

The 21st century started with changes in hopes and expectations for space exploration. Plans are being announced to move from researching and studying the solar system to colonizing it. The primary object of attention is the Earth's natural satellite. A return to the Moon is expected in the near future, and various countries are already planning short-term crewed expeditions to the Moon. A gradual establishment of permanent human presence on the Moon is supposed, for which lunar bases will be created. One of the most essential tasks in exploring the Moon will be to ensure the reliable transportation of people and cargo between Earth and the Moon. The intensity of spacecraft flights will increase significantly after the start of lunar base construction, remaining high in subsequent stages. Therefore, it can be expected that spaceports will become essential components of lunar bases. In addition to prepared sites, spaceports must have the necessary equipment and resources. The creation of a spaceport on the Moon has its own peculiarities, which are discussed in this article. The article examines the specificity of spaceport construction on the Moon, considering the unusual nature of this task, and makes a brief analysis of modern approaches to accomplishing it. The article supposes the potential location of the spaceport, outlines the possible impact of lunar surface relief on spaceport construction, and identifies factors of priority concern. The first approximation provides the principal quantitative and qualitative indicators characterizing the spacecraft landing process. Recommendations are given regarding selecting the shape and size of landing pads for spacecraft. A possible structural diagram of a lunar spaceport has been developed, with a list of the primary components and equipment. The article also identifies limitations that need to be taken into account and indicates various factors that will influence the design of the spaceport and, therefore, need to be considered. The work carried out may serve as a theoretical basis for the further development of the lunar base concept.

Keywords: colonization of the Moon, lunar base, lunar spaceport, landing pad.

Вступ

Ставлення людства до космічного простору останніми роками істотно змінилося. Початок XXI сторіччя відзначено активізацією ринку космічних послуг, на якому впев-

нено заявляють про себе приватні організації, що конкурують з державними, а країни зі звичайним рівнем економіки конкурують з економічними гігантами. Змінилися сподівання й очікування. Наукові програми, які становили міжнародний престиж тієї чи

іншої країни, вже поступаються економічним бізнес-планам. Проголошено плани переходу від досліджень і вивчення Сонячної системи до її колонізації.

Головний об'єкт, до якого прикуто увагу, – природний супутник Землі Місяць. Спочатку, у найближчій перспективі, очікують короточасні пілотовані експедиції, а поступово передбачено забезпечити постійне перебування людей на Місяці, для чого буде створено місячні бази. Дослідження Місяця ще можуть проводити в рамках окремих місій, хоча й об'єднаних загальним результатом, але все ж таки тимчасових і з перервами. А вже колонізація природного супутника Землі вимагатиме постійного перебування людей на його поверхні.

У всьому світі проводять активну роботу з планування колонізації Місяця. Проекти місячних баз є не тільки в США та Китаї, що очікувано [1], а навіть у Швеції [2]. Концептуальний проект місячної бази розробило Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» (м. Дніпро, Україна), яке є інституційним членом Moon Village Association.

Разом з тим порівняння прогнозів і перспективних планів (огляд яких подано, наприклад, у [3]) з реальними досягненнями показує, що певна частина заявлених намірів щодо освоєння Місяця так і залишається намірами через форс-мажорні обставини. Причини їх різні – від скорочення фінансування до відмов техніки під час посадки на Місяць.

Одним з найважливіших завдань під час освоєння Місяця буде забезпечення надійного перевезення людей і вантажів між Землею та Місяцем. Можна прогнозувати, що поступово інтенсивність польотів космічних кораблів зросте після початку створення місячних баз і залишиться значною на подальших етапах. Цей процес викликає необхідність наявності в інфраструктурі місячної бази космодрому для забезпечення посадок і зльотів космічних кораблів на Місяці.

Космодром для використання космічних кораблів Starship, у складі місячної бази Alpha, презентувала корпорація SpaceX у 2017 р. Серйозну увагу розробленню космодромів на Місяці приділяє агентство NASA. Зокрема, на його замовлення фірма ICON створила кілька проектів [4, 5], які досить опрацьовані та дещо деталізовані.

Разом з тим існують проекти космодромів з недостатньо обґрунтованими ідеями та рішеннями. Так, зокрема можна звернути увагу на таке:

– дещо передчасні сподівання на сприятливі умови проведення робіт (нібито на Місяці ідеальний рельєф і відсутні природні перешкоди);

– надмірне використання реголіту для утворення різноманітних насипів, валів, штучних пагорбів тощо (потребує великої кількості машин і витрат енергії та часу для цього);

– надзвичайна поширеність 3D-друку (складається враження, що неможливо й кроку ступити по Місяцю без 3D-принтерів, часто поза увагою залишаються їхня продуктивність і енергоспоживання);

– майже повна відсутність технологічного обладнання для обслуговування космічних кораблів.

Поставлення завдання

Сучасні космічні апарати (КА) під час посадок на Місяць не потребують підготовлених площадок для посадки та зльоту. Ті нечисленні старти з Місяця для повернення КА на Землю відбувалися з посадочних ступенів, які були в ролі стартових споруд. До того ж зараз інтенсивність польотів на Місяць відносно невелика, і посадки здійснюють у різних районах, дуже віддалених один від одного.

Перспективні проекти КА (в першу чергу пілотованих) передбачають багаторазове їх використання, тому не мають окремих посадочних ступенів, але системи їхніх посадочних опор дозволяють посадку на невідготувану поверхню Місяця та старт з неї.

Польоти відбуватимуться у відносно невеликі за площею райони розташування місячних баз, тому космодроми (або злітно-посадочні комплекси) неодмінно стануть важливими складовими частинами місячних баз. При цьому, крім підготовлених площадок, космодроми повинні мати необхідне обладнання та ресурси.

Якщо події в майбутньому розгортатимуться так, як прогнозують експерти, Місяць стане космопортом. Космічні апарати регулярно будуть сідати на поверхню Місяця та злітати з неї, що стане частиною ланцюга

постачання, який обслуговує людські табори, обладнає наукові установки та розвантажує обладнання для позаземних гірничих робіт.

23 липня 2024 р. Консорціум інновацій місячної поверхні провів семінар з об'єктів запуску та посадки на Місяць для з'ясування того, як виконувати операції, подібні до аеропорту, на Місяці. Урядові, університетські та приватні фахівці поділилися ідеями щодо проектування, аналізу та будівництва об'єктів запуску та посадки, а також виявили технологічні прогалини в питаннях забезпечення постійної присутності на Місяці [6].

Створення космодрому в дещо незвичних для земних користувачів умовах – на Місяці – має свої особливості, дослідження яких є метою статті.

Місячний космодром, незважаючи на схожість завдань і функцій із земним космодромом, не буде схожим на нього. Природні умови на Місяці, конструкція космічних апаратів і концепція їх використання істотно впливатимуть на склад і вигляд місячного космодрому.

1. Вихідні дані створення космодрому

Особливості створення космодрому пов'язані в першу чергу з рельєфом і природними умовами на Місяці.

1.1. Розташування космодрому

Необхідно зазначити, що проблема розташування тих чи інших інфраструктурних об'єктів на Місяці значно складніша, ніж може здатися на перший погляд.

Принципи обирає місць посадок КА на Місяць еволюціонували починаючи з 1959 р. Спочатку міжпланетну станцію просто намагалися націлити на видиму півкулю Місяця, потім почали обирати місця, цікаві з наукової точки зору. Зараз найважливіше – створити місячну базу якомога ближче до покладів корисних копалин під поверхнею Місяця (наприклад, до водяного льоду). Але міжнародне космічне законодавство все ще недосконале, особливо в плані володіння правами на ділянки поверхні космічних тіл і на корисні копалини в їхніх надрах.

Існує багато проектів місячних баз, розроблених в різних країнах, і вже виникла певна конкуренція, зокрема в районі Півден-

ного полюса Місяця та кратера Шеклтон. Це найпривабливіший регіон природного супутника Землі, досить докладно вивчений. Там дуже сприятливі умови освітлення (що важливо для енергопостачання за допомогою фотоелектричних перетворювачів), більш-менш зручний рельєф для будівництва бази, непогані умови для наукових спостережень, а головне – виявлено потенційно значні запаси льоду.

1.2. Рельєф Місяця

Уся місячна поверхня утворена в результаті еволюції, яка тривала кілька мільярдів років. Сучасні наукові уявлення про еволюцію ландшафтів Місяця висвітлено, серед інших, і в українських джерелах [7–9].

Для розміщення об'єктів і проведення будь-яких робіт на Місяці важливе значення мають знання та відомості про природні перешкоди. Такими перешкодами перш за все будуть кратери та каміння. Тому необхідно виявити кількісний розподіл кратерів і каміння на місячній поверхні залежно від їхніх розмірів, а також необхідно враховувати фізико-механічні характеристики реголіту. Отже, основними чинниками, які треба враховувати під час проектування космодромів на Місяці, є:

- розмір невеликих кратерів;
- щільність розподілу невеликих кратерів на поверхні;
- розмір невеликих каменів;
- щільність розподілу невеликих каменів на поверхні;
- кут нахилу поверхні;
- фізико-механічні характеристики ґрунту.

Найчастіше на поверхні Місяця зустрічаються кратери діаметром до 1 м та каміння поперечником до 0,6 м, які і впливатимуть на планування інженерної підготовки поверхні Місяця під час будівництва космодрому. Створення космодрому на Місяці неможливе без залучення інженерної техніки, яка допомагатиме або прибирати ці перешкоди, або їх уникати. З огляду на приблизні розміри машин і механізмів, які реально доставити на Місяць, а також на розміри їхніх робочих органів (бульдозерних ножів, екскаваторних ковшів і їм подібних) можна припустити, що якраз вищенаведені розміри кратерів і каміння стануть граничними для

застосування машин. Тобто для кратерів і каміння більших розмірів уже треба буде вирішувати, чи засипати якийсь великий кратер, чи обійти його під час, наприклад, прокладання дороги. Занадто велике каміння потрібно буде обходити або руйнувати на менші за розміром уламки. Наявність великих кратерів може збільшити відстань між злітно-посадочними площадками космодрому.

Узявши для зразка ділянку місячної поверхні розмірами $1\,000 \times 1\,000$ м, можна обчислити, що кількість кратерів діаметром від 0,3 до 1 м (з кроком 0,1 м) на ній буде понад два мільйони (рис. 1), а їхня площа дорівнюватиме майже половині площі ділянки. Об'єм западин кратерів становитиме понад $8\,500\text{ м}^3$, а маса реголіту в кільцевих валах – близько $35\,500$ т.

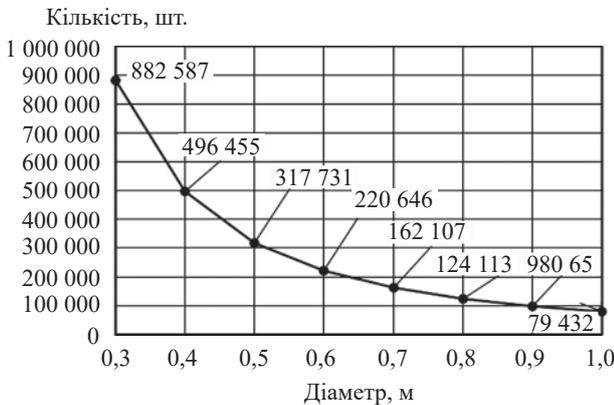


Рис. 1. Розподіл кратерів за їхнім діаметром

Звичайно, зі збільшенням діаметрів кратерів їх кількість значно зменшується. Так, кратерів діаметром 50 м буде всього 31 на 1 км^2 , а діаметром 100 м – 7 або 8.

Кількість каменів розмірами від 0,1 до 1,0 м (з кроком 0,1 м) становитиме близько 90 000 загальною масою понад 1 000 т (рис. 2).

Зрозуміло, що засипати кратери та прибирати каміння потрібно буде лише там, де знаходитимуться злітно-посадочні площадки або дороги, та все одно витрати енергії, часу та ресурсу машин будуть значними.

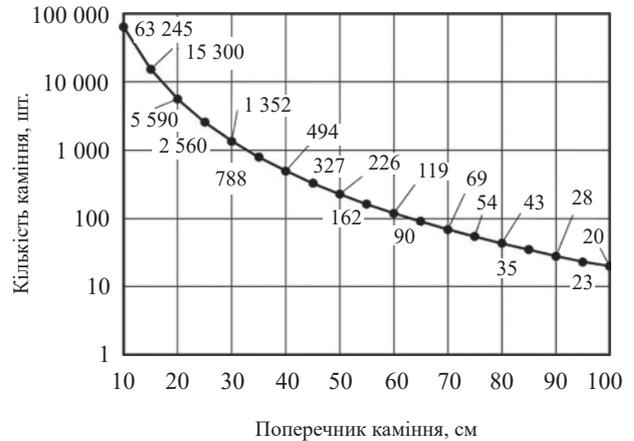


Рис. 2. Розподіл каміння за їхнім поперечником

Кут нахилу місячної поверхні теж може стати несприятливим під час обладнання злітно-посадочних площадок. У цьому випадку є кілька можливостей:

- незначний нахил можна вирівняти штучним покриттям площадки (що збільшить витрати матеріалів, часу, енергії, ресурсу машин);

- нахилом площадки можна взагалі знехтувати (у дозволених межах кількох кутів градусів, рис. 3), особливо якщо це буде площадка з низькою інтенсивністю використання, для якої нераціонально витратити матеріал покриття, буде достатньо просто вирівняти поверхню;

- можна знайти горизонтальну ділянку поверхні трохи далі від запланованого місця (за що, можливо, доведеться заплатити більшою довжиною під'їзної дороги).

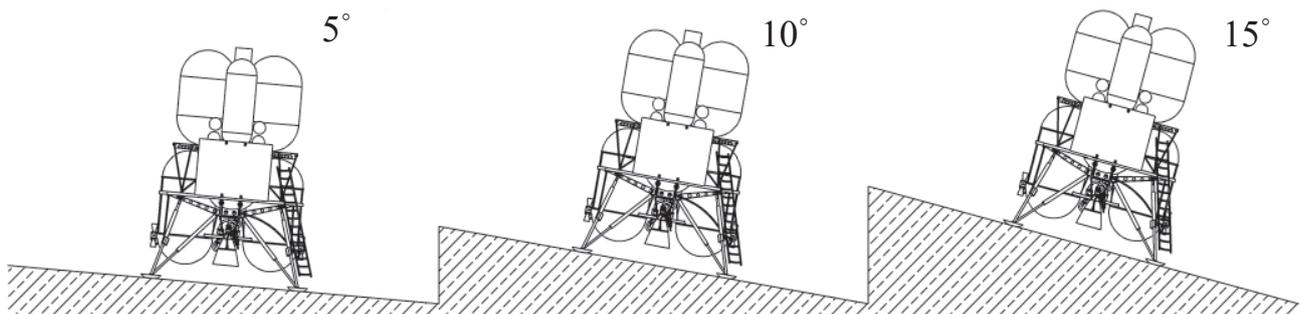


Рис. 3. Умовний космічний апарат на поверхні Місяця з різними кутами нахилу

1.3. Вимоги до космодрому на Місяці

На підставі узагальнених відомостей про здійснені м'які посадки КА на Місяць можна виокремити кількісні та якісні показники, які необхідно враховувати при роботах над місячним космодромом.

Кількісні показники – це, по суті, вихідні дані, що впливатимуть на характеристики злітно-посадочних площадок (їхні розміри, товщину покриття та інше). До них належать:

- градієнт висоти на кінцевому відрізку посадки (у припущенні, що точну посадку здійснюють зі стану короткого зависання КА) – від 4 до 0 м;

- вертикальна складова швидкості – в діапазоні 2...4 м/с;

- горизонтальна складова швидкості – 0...1 м/с;

- нахил поздовжньої осі КА від місцевої гравітаційної вертикалі – $\pm 2^\circ$;

- кут нахилу поверхні Місяця в точці контакту – до 15° ;

- перевантаження в момент контакту – не більші, ніж під час запуску із Землі.

Якісні показники забезпечуватимуть виконання таких вимог:

- обов'язкове збереження стійкого положення КА протягом усього процесу посадки;

- мінімізація ефекту «підстрибування» КА після першого удару об ґрунт (хоча такий ефект може бути зменшений і за рахунок конструкції КА, наприклад, завдяки застосуванню двигунів притискання);

- якомога менше значення ковзання під час посадки на поверхню з нахилом;

- забезпечення такого положення КА на поверхні після посадки, у якому всі системи працюють нормально (у тому числі забезпечення сприятливих умов для старту);

- мінімізація небезпеки виникнення різних аварійних ситуацій під час посадки.

1.4. Інтенсивність польотів

Вигляд і структуру місячного космодрому визначають, у першу чергу, кількістю злітно-посадочних площадок. Ця кількість залежить від того, які саме КА здійснюватимуть посадки на Місяць і зльоти з нього, а також від тривалості перебування КА на площадках.

Під час роботи на ДП «КБ «Південне» над концептуальним проєктом місячної бази було визначено, що найочікуванішими можуть бути такі варіанти перебування:

- нетривале з наступним зльотом (до десяти діб, наприклад, космічні кораблі з короткочасними експедиціями відвідування – з космічними туристами або для заміни персоналу місячної бази);

- тривале з наступним зльотом (кілька десятків діб – космічні кораблі з основними експедиціями);

- епізодичне з наступним зльотом (пілотовані або безпілотні КА, направлені на місячну базу позапланово або в екстрених випадках);

- короткочасне без зльоту (одноразові КА, наприклад транспортні кораблі постачання, які після розвантаження потрібно буде швидко евакуювати з площадки для утилізації або перероблення).

Оскільки одноразові КА не зможуть самостійно залишити площадку, такі КА або необхідно швидко прибирати, або садити їх на допоміжні (не основні) площадки. Ці площадки можуть мати спрощене обладнання для посадки, яке взагалі може бути після посадки перенесено на іншу площадку (тобто певну кількість допоміжних площадок для одноразових КА обслуговувати ме один комплект обладнання).

Попередні розрахунки кількості рейсів на Місяць і з Місяця, оцінювання тривалості перебування КА на базі показують, що кількість площадок, імовірно, не буде перевищувати десяти.

Вигляд космодрому залежатиме не тільки від кількості площадок, а й від їх взаємного розташування. При цьому потрібно забезпечити, з одного боку, будівництво космодрому з найменшими витратами часу, енергії та матеріалів, а з другого – оптимальне розташування обладнання для обслуговування КА.

Остаточний вибір взаємного розташування площадок необхідно здійснювати після орієнтовного аналізу інженерної підготовки – обчислення можливих витрат енергії та часу на прибирання каміння, вирівнювання поверхні, часу та матеріалів на прокладення доріг і інші заходи.

1.5. Чинники навколишнього середовища

До чинників середовища належать:

- великі перепади температур – від -249 до $+150$ °С;
- нетиповий для земних умов режим освітлення поверхні, коли день і ніч тривають по 14 земних діб;
- радіаційне й електромагнітне випромінювання;
- космічний вакуум на поверхні Місяця, де тиск становить приблизно 10 нПа;
- ризик метеороїдної загрози;
- низька сила гравітації.

Ще в 1960-ті роки, до першої м'якої посадки КА на Місяць, було зроблено спроби імітувати на Землі місячні умови. У міру вивчення Місяця нагромаджено досить глибокі знання, які дозволяють урахувати всі несприятливі чинники.

Головною відмінністю КА для майбутньої колонізації Місяця стане значно більший ресурс. Тобто місячний космодром, належним чином захищений, повинен буде надавати необхідний захист і космічним апаратам. Інфраструктура місячного космодрому потребуватиме для свого захисту відповідних рішень.

Наприклад, для захисту КА від метеорної небезпеки, прямого сонячного випромінювання, перепадів температур можливе використання тимчасових легких ангарів, які можна встановлювати на площадках, де апарат здійснив посадку (рис. 4).

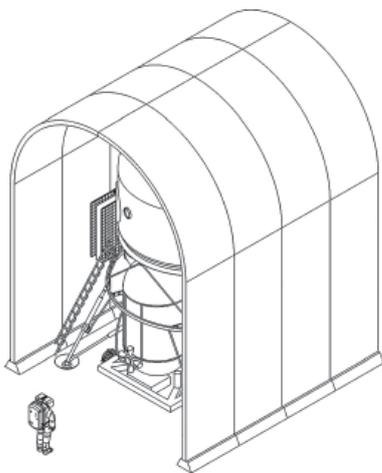


Рис. 4. Космічний апарат у легкому ангарі

Фізико-механічні характеристики ґрунту дозволять здійснювати посадку КА великих

розмірів і мас на площадки без покриття за умови, що площа їхніх посадочних опор буде пропорційна масі та відповідатиме несучій здатності ґрунту. Але треба враховувати утворення великої кількості пилу. Також це стосується прохідності інженерних машин, шасі яких повинні забезпечити їхню маневреність.

1.6. Форма та розміри площадок

Площадки, що забезпечуватимуть зліт і посадку КА, будуть найважливішими елементами космодромів [10].

Можна прийняти, що оскільки посадка та зліт КА на Місяці відбуватимуться вертикально, то простежуватиметься певна аналогія з досвідом використання земних літальних апаратів, зокрема гелікоптерів. Тобто найбільш раціональна геометрична форма площадок – це коло. Розміри площадок (діаметри) залежатимуть від точності наведення КА їхніми власними засобами навігації, а також засобами космодрому. Навіть без наведення з Місяця точність посадки в автоматичному режимі вимірюють уже не сотнями кілометрів, як раніше, а десятками метрів (таблиця).

Точність посадки КА на Місяць

Космічний апарат	Рік	Точність, км
Луна-2	1959	500,0
Eagle (Apollo-11)	1969	20,0
Луна-17	1970	5,0
Chandrayaan-3	2023	2,0
SLIM	2024	0,1

Також розміри площадок потрібно узгоджувати з розмірами космічних апаратів. Проєктовані КА мають тенденцію до збільшення розмірів. Тож відповідно будуть збільшені відстані між їхніми посадочними опорами. Якщо брати за зразок космічний корабель Starship, то діаметр площадки (з урахуванням зон можливих відхилень і безпеки) перевищуватиме 100 м.

Взаємне розташування площадок буде зумовлено не тільки рельєфом поверхні, а й міркуваннями безпеки. Відстань між площадками повинна бути достатньою на випадок аварійних посадок, вибухів з розльотом уламків тощо.

1.7. Типи площадок і їхнє обладнання

Злітно-посадочні площадки місячного космодрому відрізнятимуться одна від одної. На підставі проектних оцінок можна виокремити (умовно) такі типи площадок:

- основні;
- допоміжні;
- запасні;
- резервні.

Основними будуть площадки, які використовуватимуть у першу чергу пілотовані КА, а також безпілотні, призначені для відльоту з Місяця. Такі площадки можуть мати спеціальне покриття та повні комплекти обладнання.

Допоміжні будуть потрібні для посадок одноразових апаратів (наприклад, кораблів постачання місячних баз), із цих площадок одноразові КА евакуюватимуть для утилізації або перероблення. Штучне покриття для таких площадок не обов'язкове, а комплект обладнання забезпечуватиме лише посадку.

Запасні – за обладнанням аналогічні основним, але їх не використовують без нагальної потреби.

Резервні – це площадки, на які можуть сідати космічні апарати, перебування яких на Місяці не пов'язане з жорсткими термінами або особливими вимогами до експлуатації.

Отже, площадки повинні мати:

- штучне тверде покриття (як варіант – з переплавленого реголіту);
- посадочне радіотехнічне обладнання (привідні радіомаяки) для забезпечення точної посадки в автоматичному режимі (у тому числі, коли пост керування не функціонуватиме з певних причин);
- посадочне світлотехнічне обладнання (сигнальні та габаритні вогні);
- робоче світлотехнічне обладнання (для проведення операцій на площадках);
- спеціальні знаки (розмітка) для візуальної орієнтації.

2. Структура космодрому

Місячний космодром, незважаючи на схожість завдань і функцій із земним космодромом, не буде схожим на нього. Не тільки

природні умови на Місяці, а й конструкція космічних апаратів і концепція їх використання істотно впливатимуть на склад і вигляд місячного космодрому.

Однією з основних функцій космодрому стане забезпечення польотів КА з Місяця, для чого необхідно буде здійснювати заправлення. Основним типом двигунів ще довго будуть рідинні ракетні двигуни, для яких на Місяці єдина можлива пара компонентів – це рідкі кисень і водень, видобуті з місячної води. Навіть з появою ядерних двигунів для них все одно буде потрібен водень. Отже, кріогенна техніка стане обов'язковою для місячного космодрому.

Також космодром повинен бути автономним від місячної бази (хоча б на деякий час) з міркувань живучості та безпеки, що ставить відповідні вимоги до перебування людей і до енергопостачання.

Орієнтовну структуру місячного космодрому наведено на рис. 5.

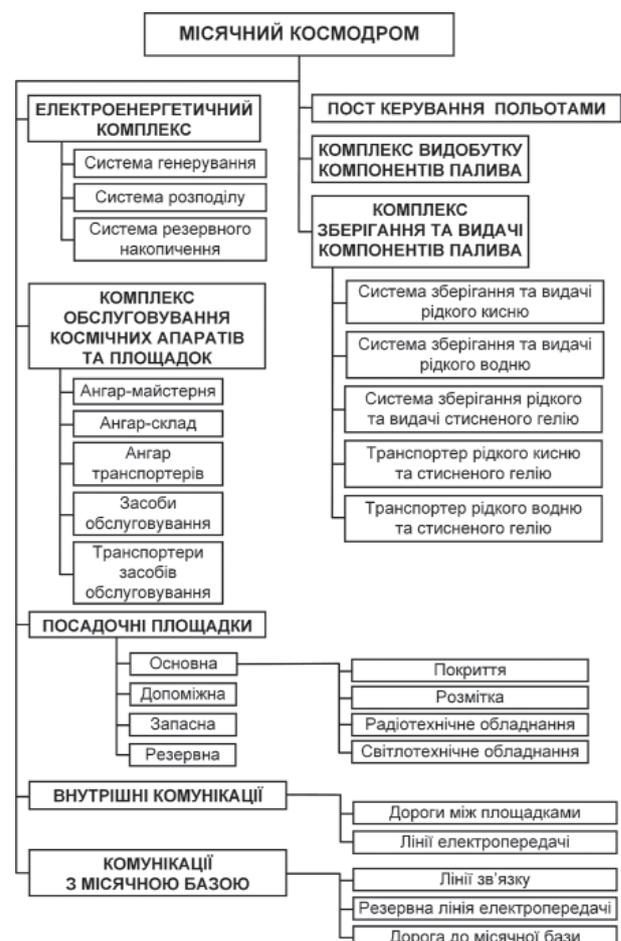


Рис. 5. Структурна схема місячного космодрому

Аналіз результатів

У роботі розглянуто особливості створення космодрому на Місяці з урахуванням незвичності цього завдання, коротко проаналізовано сучасні підходи до його вирішення. Зроблено висновки щодо можливого розташування космодрому, показано, який вплив може мати рельєф місячної поверхні на роботи зі створення космодрому, на які чинники слід звернути увагу в першу чергу. Наведено основні кількісні та якісні показники, що характеризують процес посадки космічного апарата. Подано рекомендації щодо вибору форми та розмірів злітно-посадочних площадок для КА. Сформовано один з варіантів структурної схеми місячного космодрому.

Висновки

Експансія людства потребуватиме зростання кількості космічних польотів, тому очевидний висновок, що будівництво місячних баз і їх функціонування будуть неможливими без космодромів.

Дослідження, проведені на ДП «КБ «Південне», дозволили зробити висновки про можливість створення місячних космодромів і обрати напрями робіт на подальших етапах. Також визначено певні обмеження, які потрібно буде врахувати, виявлено сукупність різних чинників, які впливатимуть на проектування космодрому і які треба буде врахувати.

Проведені роботи можуть стати теоретичною основою для подальшого розвитку концепції місячної бази.

Уже зараз можна стверджувати, що складні природні умови на Місяці: глибокий вакуум, метеорна небезпека, жорстке випромінювання, значні перепади температури, менша сила тяжіння – зроблять створення місячного космодрому інженерним подвигом і однією з найвизначніших справ людського розуму та людських рук.

Список використаної літератури

1. Artemis Plan. NASA's Lunar Exploration Program Overview. September, 2020. 74 p. URL: https://nasa.gov/wp-content/uploads/2020/12/artemis_plan-20200921.pdf
2. Voelcker Ana Carolina. Moon base ad lunam. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2023. 51 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1868224/FULLTEXT01.pdf>
3. Кислюк В. С. Космічні дослідження Місяця: сучасний стан та перспективи (огляд). *Космічна наука і технологія*. 2013. Т. 19. № 3. С. 5–20.
4. Melodie Yashar. ICON's Project Olympus: Lunar Landing Pad Concept Design. URL: <https://www.melodieyashar.com/lunar-landing-pad.html> (дата звернення 21.09.2025).
5. SpaceX Starship at NASA Artemis Base Camp by ICON. <https://www.humanmars.net/search/label/Artemis%20Base%20Camp> (дата звернення 21.09.2025).
6. David L. How can we build landing and launch pads on the moon? 2024. URL: <https://www.space.com/the-moon-building-lunar-landing-launch-sites>.
7. Кирилюк С. М. Природа Місяця: монографія. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т ім. Юрія Федьковича, 2021. 240 с.
8. Кирилюк С. М. Ландшафтні комплекси малих місячних кратерів. *Наук. вісн. Чернівецького університету*: Зб. наук. праць. Вип. 633–634. Географія.
9. Кирилюк С. М., Спатарь К. І. Геолого-геоморфологічні структури видимої півкулі Місяця. *Наук. вісн. Чернівецького університету*: Зб. наук. праць. Вип. 616. Географія. С. 101–112.
10. Стоян Ю. Г., Гиль Н. И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. К.: Наук. думка, 1976. 249 с.

Стаття надійшла 19.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування
03.11.2025

Дата публікації 12.02.2026