УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2023.02.064

О. С. ПАЛІЙ

КЛАСИФІКАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОБОЛОНКИ КОСМІЧНОЇ ІНДУСТРІАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; E-mail: jerr_5@ukr.net

Мета статті – визначення функціональних особливостей оболонки космічної індустріальної платформи та їх класифікація. Подальше освоєння космосу обмежене складністю виведення на орбіту космічних об’єктів великих розмірів і мас. На початковому етапі індустріалізації ближнього космосу в космічному просторі можуть бути розміщені космічні індустріальні платформи. Проведено аналіз конфігурацій існуючих орбітальних станцій як прообразу космічних індустріальних платформ і визначено діапазони основних параметрів їх модулів. Конструктивна схема індустріальної платформи суттєво залежить від вимог технологічних процесів, що реалізуються на ній. Формування проєктного вигляду платформи залежить значною мірою від низки критеріїв, що впливають на функціональні особливості платформи та її проєктний вигляд. Розроблено низку критеріїв, що дозволяють сформувати проєктний вигляд індустріальної платформи з урахуванням її функціональних особливостей. Такими є наступні критерії: модульність конструкції, тип каркасу оболонки, спосіб формоутворення оболонки, тип герметизації, наявність та потреби спеціального газового середовища, наявність спеціальних технологічних відсіків, тип орієнтації і стабілізації, тип енергосистеми, тип терморегулювання, наявність мікроклімату, тип попередньої підготовки сировини та її компонентів. З використанням даних критеріїв запропоновано класифікацію функціональних особливостей оболонки індустріальної платформи. Для класифікації виконано декомпозицію космічної індустріальної платформи до рівня елементів конструкції її модулів, яку буде використано при розробці комплексної математичної моделі функціонування платформи. Сформовано комплекс параметрів індустріальних платформ для забезпечення технологічних процесів, що реалізуються на ній. Даний комплекс буде використано при формуванні оболонки космічних індустріальних платформ в залежності від параметрів технологічних процесів. Виконано постановку задачі оптимізації маси космічної індустріальної платформи.

Ключові слова: *космос, індустріальна платформа, оболонка, функціональні особливості, комплекс параметрів.*

The goal of this paper is to identify and classify the functional features of the shell of a space industrial platform. Further space exploration is limited by the difficulty of launching large-sized and massive objects into orbit. At the initial stage of the industrialization of near space, space industrial platforms can be placed therein. The configurations of existing orbital stations as a prototype of space industrial platforms are analyzed, and the ranges of the main parameters of their modules are determined. The structural layout of an industrial platform depends significantly on the technological processes implemented thereon. The configuration of a platform depends largely on a number of criteria that have an effect on its functional features. The paper identifies a number of criteria that have an effect on the functional features and configuration of a platform. They are as follows: structural modularity, the shell frame type, the shell shaping method, the sealing type, the need for a special atmosphere, the need for special process modules, the orientation and stabilization type, the power system type, the thermal control type, the need for a microclimate, and the type of preprocessing of raw materials and their components. Using these criteria, the paper proposes a classification of the functional features of an industrial platform shell. For classification, a space industrial platform is decomposed down to the level of the structural elements of its modules to be used in the development of a comprehensive mathematical model of platform operation. A set of parameters of industrial platforms is formed to ensure the technological processes implemented thereon. The set will be used in platform shell formation according to process parameters. The problem of mass optimization of a space industrial platform is formulated.

Keywords: *space, industrial platform, shell, functional features, set of parameters.*

Вступ. Складність виведення на орбіту космічних об’єктів великих розмірів і мас обмежує подальше освоєння космосу. На початковому етапі індустріалізації ближнього космосу в космічному просторі можуть бути розміщені космічні індустріальні платформи (КІП) [1].

У загальному вигляді КІП містить [2]: основні несучі конструкції, бортові системи, бортовий комплекс управління, бортові сервісні пристрої, прийомні доки, модуль первинної переробки сировини, модуль вторинної переробки сировини, промисловий модуль, складальний модуль.

Індустріальна платформа має ряд особливостей, а саме:

– значна маса та габарити конструкції;

– уніфікація основних елементів конструкції, що дозволить скоротити час на заміну елементів у разі їх поломки або для реконфіграції чи модернізації платформи;

– модульний принцип побудови, що забезпечує адаптацію платформи до типу технологій, що розміщуються; тривалий час експлуатації за умов космічного простору, що потребує достатніх бортових запасів робочих речовин та енергії на платформі для забезпечення її надійного функціонування;

– забезпечення відвідуваності платформи операторами у спеціальних випадках, для цього платформа має містити у своєму складі спеціальні відсіки для стикування з пілотованими сервісними космічними апаратами;

– надійна ремонтопридатність, модулі індустріальної платформи необхідно проєктувати таким чином, щоб забезпечити вільний доступ ремонтної бригади до них;

– забезпечення можливості складання та реконфігурації платформи в умовах космічного простору, для цього необхідно провести уніфікацію електричних роз'ємів, місць кріплення та елементів фіксації обладнання;

– наявність необхідного інтерфейсу для обслуговування сервісними космічними системами, для цих цілей необхідно забезпечити модулі, які цього потребують, спеціалізованими доками, що мають у своєму складі системи наведення, стикування і фіксації сервісного апарата.

Найбільш близькими за технічною суттю до КІП є орбітальні станції.

Розробкою орбітальних станцій займалися СРСР та США. В СРСР було створено два типи конструктивних схем орбітальних станцій: «Салют» та «Мир». В США створено та виведено на орбіту орбітальну станцію SkyLab.

Першою в світі орбітальною станцією стала станція «Салют» [3]. Станція «Салют» складалася з перехідного, робочого та агрегатного відсіків. На зовнішній поверхні перехідного герметичного відсіку з агрегатом стикування встановлено комплект сонячних батарей. Робочий відсік виконано у вигляді герметичної оболонки. Обичайки було з'єднано між собою конічним перехідником. Негерметичний агрегатний відсік було призначено для розміщення на ньому коригувальної двигунної установки.

В США успішно реалізовано проєкт орбітальної станції «SkyLab» [3, 4]. Орбітальна станція «SkyLab» складалася з модулів: модуля керування і службових систем «CSM», стикувального модуля-адаптера «MDA», модуля шлюзової камери «AM», основного лабораторного модуля «Saturn Workshop». При розгляді конфігурації станції, яку орієнтовано вертикально, верхнім на металевій фермі розміщено блок «ATM», який містить комплекс астрономічних приладів. Далі йде стикувальний модуль-адаптер «MDA», за ним модуль шлюзової камери «AM». В самому кінці розміщено основний модуль станції «Saturn Workshop». Енергетичний комплекс станції «SkyLab» складався з шести сонячних батарей (СБ): двох основних, що розгорталися від корпусу модуля «Saturn Workshop», і чотирьох допоміжних, які було розміщено хрестоподібно на блоці «ATM».

Першою в світі модульною орбітальною станцією була станція «Мир» [5]. В період з лютого 1986 року по квітень 1996 року було виготовлено, виведено на орбіти та зістиковано 7 основних модулів: модуль керування і службових систем, вузловий модуль, стикувальний відсік, лабораторні модулі «Квант», «Квант-2», «Кристалл», «Спектр», «Природа» [5].

Наступною орбітальною станцією стала Міжнародна космічна станція (МКС) [6, 7]. У створенні МКС приймали участь космічні агентства США, Росії, Европейського союзу та Японії. Станцію поділено на два основних сегменти: російський та американський. Російський сегмент складається з: функціонально-вантажного блока «Заря», службового модуля «Звезда», стикувального відсіку «Пирс», малого дослідницького модуля «Поиск», малого дослідницького модуля «Рассвет». До складу американського сегменту входять: вузлові модулі «Unity», «Harmony» та «Tranquility», шлюзовий модуль «Quest», модуль «Cupola», лабораторний модуль «Destiny», лабораторний модуль Європейського космічного агентства «Columbus», герметичний відсік лабораторного модуля Японського космічного агентства «Kibo», експериментальний вантажний відсік лабораторного модуля Японського космічного агентства «Kibo».

З описаного вище можна зробити висновок, що існуючі орбітальні станції мають у своєму складі: модуль керування і службових систем, функціонально-вантажний модуль, шлюзовий відсік, вузловий модуль, лабораторний модуль. Проведено аналіз конфігурацій існуючих орбітальних станцій і визначено діапазони основних параметрів їх модулів, результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри модулів орбітальних станцій [3 – 7]

Модуль станції	Початкова маса, т	Довжина по корпусу, м	Максимальний діаметр, м
Модуль керування і службових систем	4,989 – 20,295	1,4 – 13,11	3,96 – 4,35
Функціонально-вантажний блок	4,685 – 20,26	6,4 – 12,99	4,1 – 4,57
Шлюзовий відсік	1,36 – 6,064	1,8 – 5,5	2,04 – 6,55
Вузловий модуль	1,183 – 13,508	1,8 – 6,1	1,9 – 6,55
Лабораторний модуль	1,2 – 35,38	3,9 – 14,66	2,9 – 4,5

Свої особливості має задача формоутворення базової космічної індустріальної платформи для реалізації на ній різних технологічних процесів. Оскільки можливості ракет-носіїв щодо габаритів і мас корисного навантаження, що виводиться на орбіту, є обмеженими, постає питання, яким чином реалізувати процес збирання великогабаритної космічної індустріальної платформи. Граничні маса та габарити КІП, що залежать від можливостей ракети-носія, використовують в якості обмежень у процесі проєктування.

Оболонка індустріальної платформи в конструктивному відношенні являє собою обладнання загального призначення, що дозволяє розміщувати різноманітне технологічне обладнання для реалізації різних технологічних процесів. Обладнання може кріпитися або безпосередньо до платформи, або до її навісних елементів. Корпус базової платформи має у своєму складі силовий каркас (у вигляді рами, набору стрингерів, шпангоутів тощо), до якого кріпляться силові поверхні (обшивка, панелі тощо). Навісні елементи можуть виконуватися у вигляді панелей, кронштейнів або рам.

Частина приладів платформи для свого функціонування не потребує безпосереднього контакту з космічним простором. Це можуть бути прилади радіотелеметричної системи, хімічні батареї, електронні блоки бортового комплексу управління, спеціалізоване технологічне обладнання. Ці прилади для свого нормального функціонування потребують забезпечення певного мікроклімату середовища, в якому вони розміщуватимуться.

Відомо, що при функціонуванні на космічну техніку впливають фактори космічного простору [8], до яких відносяться: вакуум, атомарний кисень, космічна радіація, теплові потоки, фрагменти космічного сміття. Для забезпечення мікроклімату таке обладнання відділяють від відкритого простору спеціальною оболонкою чи екраном.

Вплив вакууму та атомарного кисню на полімерний матеріал конструкції базової платформи призводить до винесення маси з поверхні конструкції, що з часом може вплинути на її механічні характеристики. Вакуум та мікрогравітація призводять до відсутності конвекції теплових потоків, що призводить до шкідливого перепаду температур матеріалу елементів конструкції на сонячній та тіньовій її сторонах.

Базова платформа може містити герметичні та негерметичні відсіки для розміщення бортового або технологічного обладнання. Герметизацію відсіків забезпечують розміщенням обладнання під спеціалізованою оболонкою або екраном. Розглядаючи орбітальні станції як прообрази космічних систем майбутнього, наприклад, космічних індустріальних платформ, слід зазначити важливу роль наступництва проєктів та актуальність універсальних технологій.

Конструктивна схема КІП суттєво залежить від вимог технологічних процесів, що реалізуються на ній: Формування проєктного вигляду КІП залежить значною мірою від низки критеріїв, що випливають з функціональних особливостей платформи. Такими є такі критерії: модульність конструкції, тип каркасу оболонки, спосіб формоутворення оболонки, тип герметизації, наявність та потреби спеціального газового середовища, наявність спеціальних технологічних відсіків, тип орієнтації і стабілізації, тип енергосистеми, тип терморегулювання, наявність мікроклімату, тип попередньої підготовки сировини та її компонентів. З використанням даних критеріїв запропоновано класифікацію функціональних особливостей оболонки КІП, структуру якої наведено на рис. 1.

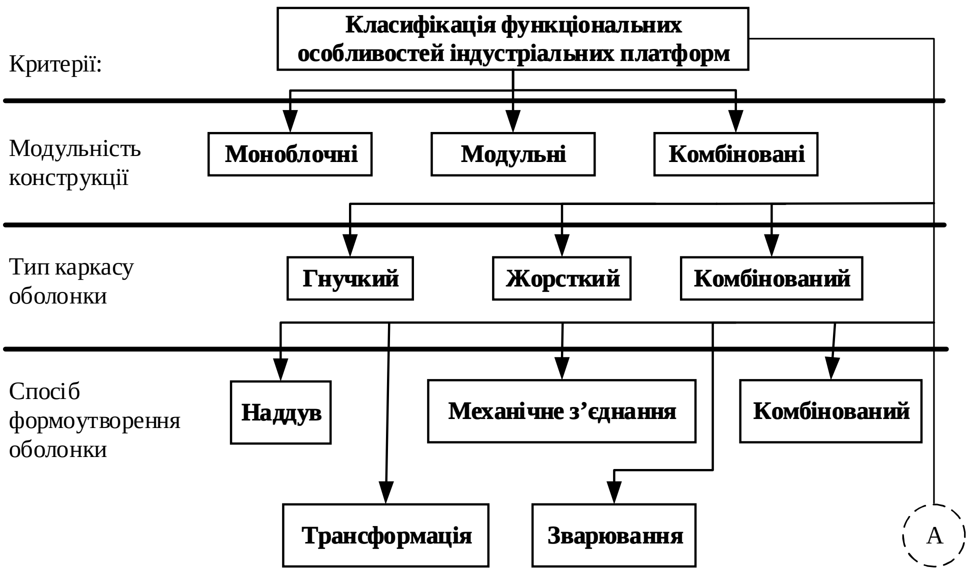

Рис. 1 – Структура класифікації функціональних особливостей КІП

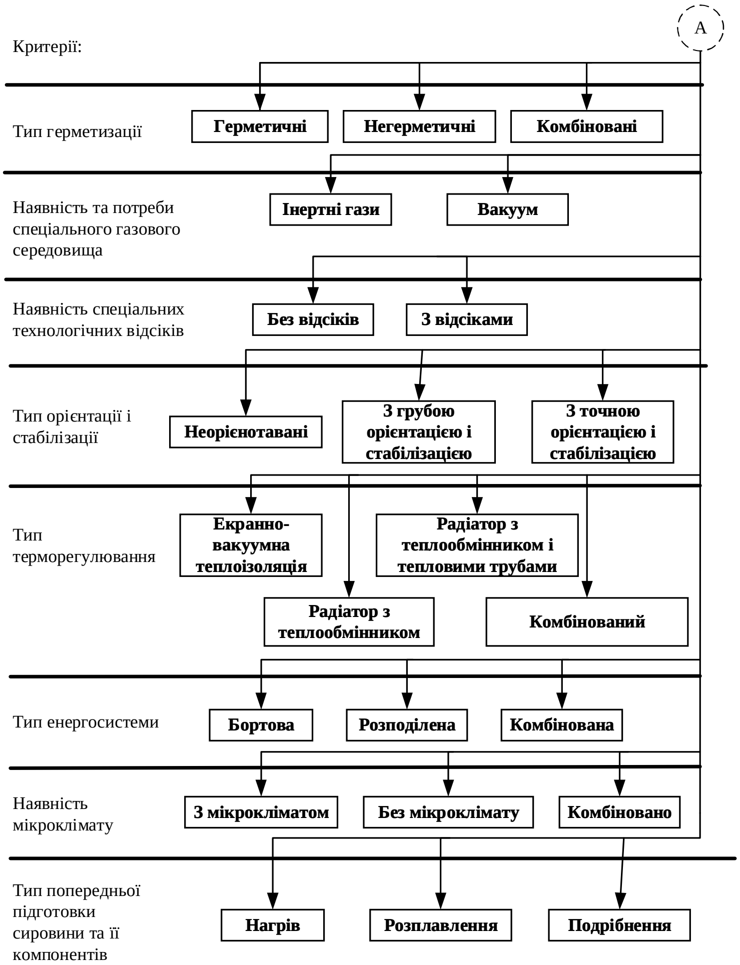

Рис. 1, аркуш 2

Моноблочна конфігурація КІП характеризується розміщенням всіх складових платформи для забезпечення технологічного процесу під однією оболонкою. Вона характеризується набором параметрів: маса $m_{об}$, габаритні характеристики (довжина $l_{об}$, ширина (діаметр) $d_{об}$, висота $h_{об}$), товщина матеріалу оболонки $\delta_{об}$, густина матеріалу $\rho_{об}$. На відміну від моноблочної, модульна конфігурація складається з набору модулів, таким чином маса платформи буде визначатися як $\sum_{i=1}^{n} m_{об_i}$, де i – номер модуля платформи, n – кількість модулів платформи.

Гнучкий каркас виконується надувним із полімерного або композитного матеріалу і має характеристики: маса $m_{ГК}$, довжина $l_{ГК}$, діаметр $d_{ГК}$, товщина $\delta_{ГК}$, густина матеріалу $\rho_{ГК}$, маса системи наддуву $m_{СН}^{ГК}$, внутрішній тиск $p_{вн}^{ГК}$, маса газу для наддуву $m_{Г}^{ГК}$. Жорсткий каркас має такі характеристики: маса $m_{ЖК}$, довжина $l_{ЖК}$, площа перерізу $S_{П}^{ЖК}$, товщина $\delta_{ЖК}$, густина матеріалу $\rho_{ЖК}$.

Формування надувних КІП проводиться за рахунок наддуву і набір їх параметрів розширюється параметрами системи наддуву, а саме: маса системи зберігання і подачі газу до оболонки $m_{ПГ}$, маса системи керування тиском $m_{СКТ}$, внутрішній тиск надувної платформи $p_{вн}^{НП}$. Трансформація КІП забезпечується використанням спеціалізованих агрегатів з такими характеристиками: енергетична потужність $P_{П}^{АТ}$, маса $m_{АТ}$, об'єм $V_{АТ}$. КІП, що збираються, характеризуються використанням додаткових елементів з'єднання і фіксації модулів (ЕЗ), які мають такі характеристики: кількість елементів $n_{ЕЗ}$, маса елемента $m_{ЕЗ}$, площа поверхні елемента $S_{П}^{ЕЗ}$, товщина матеріалу $\delta_{ЕЗ}$, густина матеріалу $\rho_{ЕЗ}$.

При використанні герметичних модулів КІП герметизація забезпечується за допомогою спеціалізованого агрегатного обладнання. Параметри системи наддуву герметичних систем аналогічні надувним. Корпус модуля в цьому випадку виконується з матеріалів підвищеної міцності, які здатні витримати заданий внутрішній тиск.

Якщо технологічний процес потребує використання додаткових газів, КІП комплектується допоміжним обладнанням з відповідними системами зберігання і подачі цих газів до технологічного обладнання. Це обладнання має такі характеристики: тип газу, параметри газу (маса $m_{Г}^{ДО}$, тиск газу $P_{вн}^{ДО}$).

При формуванні модулів платформи з відсіками, вони матимуть додаткові характеристики (форма відсіку, яка залежить від форми модуля, площа перерізу відсіку $S_{П}^{В}$, довжина відсіку $l_{В}$, площа повної поверхні перехідної зони відсіку $S_{ПЗ}^{В}$, характеристики допоміжного обладнання: габарити рами для кріплення запірної арматури (довжина $l_{Р}$, ширина (діаметр) $d_{Р}$, висота $h_{Р}$), маса рами $m_{Р}$, товщина матеріалу $\delta_{Р}$, густина матеріалу $\rho_{Р}$, габарити запірної арматури (довжина $l_{ЗА}$, ширина (діаметр) $d_{ЗА}$, висота $h_{ЗА}$), маса запірної арматури $m_{ЗА}$, товщина матеріалу $\delta_{ЗА}$, густина матеріалу $\rho_{ЗА}$.

При формуванні модулів платформи з терморегулюванням, вони матимуть додаткові характеристики. Так при використанні пасивної системи терморегулювання модуль оснащується екранно-вакуумною теплоізоляцією з характеристиками: маса теплоізоляції $m_{Т\square}$, площа поверхні $S_{П}^{Т\square}$, товщина $\delta_{Т\square}$, густина матеріалу $\rho_{Т\square}$, коефіцієнт поглинання матеріалу $\alpha_{Т\square}$, коефіцієнт випромінювання матеріалу $\varepsilon_{Т\square}$. При використанні активної системи терморегулювання з радіатором і теплообмінником комплекс параметрів модуля розширюється наступними параметрами: маса системи забезпечення теплового режиму $m_{ЗТР}$, маса радіатора $m_{Р}^{ЗТР}$, маса теплообмінника $m_{Т}^{ЗТР}$, коефіцієнт теплопровідності матеріалу радіатора $k_{Р}^{ЗТР}$ і теплообмінника $k_{ТО}^{ЗТР}$, габарити радіатора (довжина $l_{Р}^{ЗТР}$, ширина (діаметр) $d_{Р}^{ЗТР}$, висота $h_{Р}^{ЗТР}$) і теплообмінника (довжина $l_{ТО}^{ЗТР}$, ширина (діаметр) $d_{ТО}^{ЗТР}$, висота $h_{ТО}^{ЗТР}$), густина матеріалу радіатора $\delta_{Р}^{ЗТР}$ і теплообмінника $\delta_{ТО}^{ЗТР}$. При використанні системи терморегулювання з тепловими трубами окрім радіатора і теплообмінника використовуються труби, заповнені холодоагентом. Таким чином комплекс параметрів КІП розширюється наступним переліком: маса теплових труб $m_{ТТ}^{ЗТР}$, маса холодоагенту $m_{Х}^{ЗТР}$, кількість теплових труб $n_{ТТ}^{ЗТР}$, габаритні характеристики труб: (довжина $l_{ТТ}^{ЗТР}$ та діаметр $d_{ТТ}^{ЗТР}$), внутрішній тиск в трубах $p_{вн}^{ТТ}$, швидкість потоку холодоагента υ_X^{TT} , маса обладнання для циркуляції холодноагента $m_{ОЦХ}$, потужність цього обладнання $P_{ОЦХ}$.

Індустріальна платформа з мікрокліматом оснащується спеціальним обладнанням для його забезпечення. До складу якого, окрім обладнання для герметизації, входять системи вентиляції і газовідведення. У цьому випадку комплекс параметрів КІП розширюється додатковим набором: маса системи вентиляції і газовідведення $m_{ВГВ}$, внутрішні температура модуля $T_{вн}$ та вологість $\varphi_{вн}$.

Реалізація енергоємних технологічних процесів потребує значних запасів електроенергії на борту КІП. В загальному вигляді платформа оснащується бортовою енергетичною системою, яка забезпечує функціонування основних бортових систем (керування, орієнтації і стабілізації, терморегулювання, двигунних установок тощо). Коли потужності бортової енергетичної системи стає недостатньо, платформа оснащується розподіленою енергетичною системою. Розподілена система містить угруповання енергетичних космічних апаратів, які рухаються на більш високих і компланарних до КІП орбітах. Основною функцією енергетичних космічних апаратів є накопичення енергії на борту, перетворення її в надвисокочастотний (НВЧ) енергетичний промінь і випромінювання його за допомогою бортового антенного пристрою у напрямку космічного апарата-приймача. На апараті-приймачі енергетичний НВЧ промінь перетворюється в електричну енергію, накопичується і при необхідності далі перетворюється знову у НВЧ промінь і передається до КІП. Антенний пристрій, який розміщено на індустріальній платформі, приймає НВЧ промінь, далі за допомогою допоміжних систем НВЧ енергія перетворюється в електричну і проводиться заряд бортових пристроїв зберігання електричної енергії (акумуляторних батарей, суперконденсаторів тощо). Ємність пристроїв зберігання електричної енергії визначається потужністю енергоємного технологічного процесу. Комплекс параметрів КІП розширюється наступним переліком: площа бортових сонячних батарей КІП $S_{СБ}^{КІП}$, потужність бортових сонячних батарей $P_{СБ}^{КІП}$, ємність бортових пристроїв зберігання електричної енергії КІП $Q_{ПЗЕ}^{КІП}$, площа апертури бортового антенного пристрою КІП $A_r^{КІП}$, маса пристрою перетворення НВЧ енергії в електричну $m_{НЕ}^{КІП}$, площа апертури енергетичного космічного апарата-передавача (ЕКА) $A_t^{ЕКА}$, площа бортових сонячних батарей ЕКА $S_{СБ}^{ЕКА}$, потужність бортових сонячних батарей ЕКА $P_{СБ}^{ЕКА}$, маса пристрою перетворення електричної енергії в НВЧ енергію ЕКА $m_{ЕН}^{ЕКА}$, ємність бортових пристроїв зберігання електричної енергії ЕКА $Q_{ПЗЕ}^{ЕКА}$, площа апертури енергетичного космічного апарата-приймача (ПКА) $A_r^{ПКА}$, площа бортових сонячних батарей ПКА $S_{СБ}^{ПКА}$, потужність бортових сонячних батарей ПКА $P_{СБ}^{ПКА}$, маса пристрою перетворення НВЧ енергії в електричну енергію ПКА $m_{НЕ}^{ПКА}$, маса пристрою перетворення електричної енергії в НВЧ енергію ПКА $m_{ЕН}^{ПКА}$, ємність бортових пристроїв зберігання електричної енергії ПКА $Q_{ПЗЕ}^{ПКА}$.

При реалізації технологічних процесів, які потребують попередню обробку сировини (нагрів, розплавлення, подрібнення), КІП оснащується відповідним обладнанням, яке має такі характеристики: маса обладнання для нагріву m_{OH}, для розплавлення m_{OP} та для подрібнення $m_{OП}$ сировини, потужність обладнання попередньої обробки сировини $P_{OПO}$.

При проєктуванні космічних систем виділяють такі напрямки оптимізації проєктних характеристик маси і габаритів КІП і її модулів [9]:

– зниження маси платформи та її модулів;

– зниження габаритів платформи за рахунок оптимізації її компонувальної схеми.

Також при оптимізації параметрів КІП можлива комбінація перелічених вище напрямків.

При виборі першого напрямку, необхідно виконати декомпозицію індустріальної платформи до рівня елементів конструкції її модулів. Кожен вектор параметрів *i*-го модуля платформи для реалізації на ній *j*-го технологічного процеса (ТП) можна представити як

$$\begin{aligned} P_1^1 &= [h_1, h_2, h_3, \ldots h_n], \\ P_2^1 &= [h_1, h_2, h_3, \ldots h_k], \\ P_1^2 &= [h_1, h_2, h_3, \ldots h_l], \\ P_j^i &= [h_1, h_2, h_3, \ldots h_j], \end{aligned} \tag{1}$$

де P_j^i – вектор параметрів *i*-го модуля платформи в залежності від *j*-го типу ТП; n, k, l, j – кількість параметрів *i*-го модуля платформи в залежності від *j*-го типу ТП.

В свою чергу маса КІП залежить від параметрів кожного модуля і технологічного процесу. Цю залежність можна описати таким чином

$$M_{КІП} = \begin{vmatrix} m_1^1(P_1^1), m_2^1(P_2^1) \ldots m_j^1(P_j^1) \\ m_1^2(P_1^2), m_2^2(P_2^2) \ldots m_j^2(P_j^2) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ m_1^i(P_1^i), m_2^i(P_2^i) \ldots m_j^i(P_j^i) \end{vmatrix},$$

де $M_{КІП}$ – вектор-матриця залежності мас *i*-х модулів від вектору параметрів *j*-го ТП; $m_j^i(P_j^i)$ – залежність маси *i*-го модуля платформи від вектору параметрів *j*-го ТП.

Маса КІП при різних конфігураціях модулів в залежності від *j*-го ТП може бути представлена як

$$M_1 = \sum_{i=1}^{n} m_1^i,$$
$$M_2 = \sum_{i=1}^{n} m_2^i,$$
$$M_3 = \sum_{i=1}^{n} m_3^i,$$
$$\vdots$$
$$M_j = \sum_{i=1}^{n} m_j^i,$$

де M_j – маса конфігурації КІП для реалізації *j*-го ТП.

Приймаємо, що головним параметром КІП є її повна маса. Таким чином задача оптимізації маси КІП буде мати вигляд

$$\begin{aligned} M_1^{opt} &= \arg\min\left[M_1\right], \\ M_2^{opt} &= \arg\min\left[M_2\right], \\ M_3^{opt} &= \arg\min\left[M_3\right], \\ &\vdots \\ M_j^{opt} &= \arg\min\left[M_j\right], \end{aligned} \tag{2}$$

де M_j^{opt} – оптимальна маса конфігурації КІП для реалізації *j*-го ТП.

Вирішувати оптимізаційну задачу (2) пропонується наступним чином. Спочатку проводиться аналіз технологічних процесів, які реалізуються на КІП, і будуються матриці відповідності параметрів модулів КІП до параметрів технологічних процесів. Далі визначаються вектори параметрів модулів платформи (1) і проводиться оптимізація (2).

Висновки. Розроблено низку критеріїв, що впливають на функціональні особливості платформи та її проєктний вигляд. Такими є критерії: модульність конструкції, тип каркасу оболонки, спосіб формоутворення оболонки, тип герметизації, наявність та потреби спеціального газового середовища, наявність спеціальних технологічних відсіків, тип орієнтації і стабілізації, тип енергосистеми, тип терморегулювання, наявність мікроклімату, тип попередньої підготовки сировини та її компонентів. З використанням даних критеріїв запропоновано класифікацію функціональних особливостей оболонки індустріальної платформи. Для класифікації виконано декомпозицію космічної індустріальної платформи до рівня елементів конструкції її модулів. Сформовано комплекс параметрів індустріальних платформ для забезпечення технологічних процесів, що реалізуються на ній. Даний комплекс буде використано при формуванні оболонки космічних індустріальних платформ в залежності від параметрів технологічних процесів, які будуть реалізовуватися на платформі. Виконано постановку задачі оптимізації маси космічної індустріальної платформи.

1. *Алпатов А. П., Горбулин В. П.* Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы. Вісн. НАН України. 2013. № 12. С. 26–39. https://doi.org/10.15407/visn2013.12.026

2. *Palii O. S.* State of the art in the development of orbital industrial platforms. Teh. meh. 2021. № 3. P. 70–82. https://doi.org/10.15407/itm2021.03.070
3. *Афанасьев И. Б., Батурин Ю. М., Белозерский А. Г. и др.* Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди. Под ред. Ю. М. Батурина. М.: Издательство «РТСофт», 2005. 752 с.
4. *Belew L. F., Stuhlinger E.* Skylab a Guidebook. Periscope Film LLC, 2012. 264 p.
5. *Лисов И.* Земля осталась без «Мира». Последний месяц. Новости космонавтики. 2001. Т. 11, № 5. С. 2–11.
6. International Space Station Overview. European space agensy. URL: https://www.esa.int/esapub/br/br137/Br_137-1.pdf (last accessed 10.01.2023).
7. *Kitmacher G. H.* Reference Guide to the International Space Station: Assembly Complete Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2010. 140 p.
8. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. Под. ред. *М. И. Панасюка, Л. С. Новикова*. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
9. *Куренков В. И., Салмин В. В., Прохоров А. Г.* Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения. Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. унт-та, 2006. 160 с.

Отримано 24.03.2023,
в остаточному варіанті 30.05.2023