УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2022.02.123

О. С. ПАЛІЙ

КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ЇХНЬОЮ РЕАЛІЗАЦІЄЮ НА КОСМІЧНІЙ ІНДУСТРІАЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

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

Мета статті – розробка класифікатора і класифікації технологічних процесів в умовах космічного простору за їхньою реалізацією на космічній індустріальній платформі. В найближчому майбутньому людство може зіткнутися із викликами планетарного масштабу. Насамперед це проблема глобального потепління та проблема обмеженості існуючих земних ресурсів. Одним з очевидних варіантів вирішення цих проблем є індустріалізація спочатку ближнього, а в майбутньому – далекого космосу та небесних тіл. Початковим етапом індустріалізації космосу є створення на орбіті Землі космічних індустріальних платформ. Проблема створення космічної індустріальної платформи є багатогранною і потребує залучення інформації різної спрямованості. В даний час існують роботи, які пов'язані з реалізацією низки технологічних процесів в умовах космічного простору, що досліджуються відповідними вченими та розробниками. Реалізація унікальних технологічних процесів в умовах космічного простору дозволяє отримувати матеріали з якісно новими характеристиками. Розроблено комплекс критеріїв класифікації технологічних процесів в умовах космічного простору, з використанням яких розроблено класифікатор та виконано класифікацію цих процесів за їхньою реалізацією на космічній індустріальній платформі. Проведено аналіз технологічних процесів, що реалізуються в умовах космічного простору, та сформовано комплекс їх параметрів, які необхідно забезпечити на космічній індустріальній платформі. З використанням класифікатора проаналізовано функціональні схеми різних технологічних процесів, які можуть бути реалізованими в умовах ближнього космосу. Функціональні схеми містять основні та допоміжні модулі в залежності від виду технологічного процесу. Показано взаємозв'язок між технологічними та базовими модулями індустріальної платформи. Визначено та показано у вигляді схеми вантажопотік, канали: зв'язку та управління, енергозабезпечення, забезпечення теплового режиму платформи, вентиляції та вакуумування.

Ключові слова: *космос, індустріальна платформа, технологічні процеси, вакуум та невагомість, речовини та матеріали, космічне сміття.*

The purpose of this article is to develop a classifier and classification of technological processes in space to implement them on a space industrial platform. In the nearest future, mankind may face global challenges, first of all, the global warming problem and the problem of limited terrestrial resources. One of the obvious solutions to these problems is the industrialization of near space first and deep space and celestial bodies in the future. The initial stage of space industrialization is the construction of space industrial platforms in Earth orbits. The problem of space industrial platform construction is many-sided and requires various information. Currently, there exist works that are concerned to some extent or anther with the implementation of a number of technological processes in space, which are studied by scientists and developers in the relevant fields. Implemented in space, unique technological processes allow one to obtain materials with qualitatively new characteristics. The article presents a set of criteria for the classification of technological processes in space, a classifier developed on their basis for the classification of the processes in terms of their implementation on a space industrial platform, an analysis of technological processes to be implemented in space, and a set of their parameters to be provided on the platform. Using the classifier, functional diagrams of various technological processes implementable in near space are analyzed. The functional diagrams contain basic and auxiliary modules according to the process type. A relationship between the process and basic parameters of an industrial platform is shown. The freight flow, the communication and control channels, the power supply, and the thermal regime, ventilation, and vacuumizing assurance of the platform are determined and shown schematically.

Keywords: *space industrial platform, technological processes, vacuum and zero gravity, substances and materials, space debris.*

Вступ. В найближчому майбутньому людство може зіткнутися із викликами планетарного масштабу. Насамперед це проблема глобального потепління та проблема обмеженості існуючих земних ресурсів. Одним із очевидних варіантів вирішення цих проблем є індустріалізація спочатку ближнього, а в майбутньому – далекого космосу та небесних тіл. Одним із етапів індустріалізації космосу є створення на орбіті Землі космічних індустріальних платформ (КІП) [1]. На даному етапі розвитку космічної науки і технологій розробка КІП знаходиться на стадії розробки концепції. Із загальної схеми КІП, яку приведено автором в [2], відомо, що КІП складається з несучих констру-

кцій, бортових систем, бортового комплексу керування, бортових сервісних пристроїв, приймальних доків, модулів первинної та вторинної переробки сировини, промислового та складального модулів. Наступним етапом розробки концепції КІП є математичний опис її функціонування, що дозволить виявити взаємозв'язок між параметрами технологічних процесів та параметрами основного та допоміжного технологічного обладнання КІП. Для цього необхідно розробити класифікатор і класифікувати технологічні процеси, які можуть бути реалізованими на КІП.

Постановка задачі. Проблема створення КІП є багатогранною і потребує залучення інформації різної спрямованості. В даний час існують роботи, які пов'язані з реалізацією низки технологічних процесів в умовах космічного простору, що досліджуються відповідними вченими та розробниками.

Центром космічної вакуумної епітаксії Університета Х'юстона, США запропоновано ідею створення напівпровідникових матеріалів в умовах космічного простору, яку успішно реалізовано в проєкті Wake Shield Facility (WSF) [3 – 5]. Головною метою проєкта WSF було створення сприятливих умов, а саме надглибокого вакууму порядку $1{,}33\cdot10^{-9}$ Па на орбіті висотою 300 км. Надглибокий вакуум вдалося досягти за допомогою спеціального молекулярного екрану, який тильною стороною було орієнтовано перпендикулярно до потоку розрідженої атмосфери, що набігає. На лицьовій стороні було створене металеве дзеркало за рахунок полірування екрану із нержавіючої сталі. Після закриття проєкту «Space Shuttle» роботи щодо вдосконалення космічного молекулярного екрану для виробництва напівпровідникових матеріалів в умовах космічного простору методом молекулярно-променевої епітаксії продовжилися сумісно з вченими Інституту фізики напівпровідників ім. А. В. Ржанова під керівництвом Пчелякова О. П. [6 – 10]. Модернізована конструкція молекулярного екрану має такі характеристики:

– рівень і якість вакууму: $(10^{-8} - 10^{-10})$ Па;

– діаметр екрану в розгорнутому стані: до 3 м;

– необхідна температура підкладки для забезпечення атомарно чистої поверхні: 1150 К;

– робоча температура підкладки, при якій проводиться вирощування плівок на підкладці: 770 К;

– початкова температура джерела молекулярного пучка робочої речовини: 1500 К;

– максимальна споживана потужність: 18 кВт;

– тривалість підготовчого циклу до початку епітаксії: до 0,1 години;

– перпендикулярна орієнтація екрану відносно потоку розрідженої атмосфери, що набігає;

– точність орієнтації екрану: ±5°;

– обертання екрану для можливості повороту на 180° навколо своєї осі для очищення поверхні екрану від продуктів молекулярно-променевої епітаксії атомарним киснем і дегазації сонячним опроміненням;

– наявність герметичного контейнеру, в якому розміщаються і зберігаються зразки з вирощеними на них плівками напівпровідників;

– оптичне покриття екрану виконано з матеріалів з максимальними характеристиками відображення і мінімальними характеристиками поглинання енергії;

– мінімальне власне газовиділення в навколишній простір і, як наслідок, відмова від реактивної системи керування та використання силових гіроскопів-гіродинів та ефекту гравітаційної стабілізації.

Шведська космічна корпорація під керівництвом Lockowandt Chr. розробила і успішно випробувала в умовах мікрогравітації установку рідинно-фазової епітаксії для виробництва карбіду кремнію в умовах мікрогравітації [11]. Установка мала такі характеристики: максимальна температура 2173 К; градієнт температури (0 – 5) К/мм; час нагріву з 1473 К до 2073 К 60 с; час охолодження з 2073 К до 1473 К 100 с; середовище камери: інертний газ з тиском 2,5 Бар; середовище охолоджувача: інертний газ; максимальна споживана потужність обох нагрівачів 3 кВт; потужність нагрівача при досягненні температури 2073 К 900 Вт.

Європейське космічне агентство під керівництвом Reibaldi G. проводило дослідження щодо вирощування кристалів методами зонної плавки та методом Бріджмена [12]. Печі для виплавки розміщено на модулі лабораторії матеріалознавства Міжнародної космічної станції. Зонна плавка забезпечувалася піччю з характеристиками [13]: максимальна температура дифузора гарячого обігрівача 1673 К; максимальний градієнт температури 150 К/см; швидкість технологічного процесу $(10^{-5} - 10^{-2})$ мм/с; наявність обертального магнітного поля з магнітним потоком (0 – 3,5) мТ; максимальна потужність 600 Вт. Плавка методом Бріджмена проводилася в печі з низьким градієнтом температури [13], що має ідентичні характеристики, які відрізняються лише величиною максимального градієнта температури до 40 К/см.

При плавленні кремнію застосовуються різні методи. Для їх розробки проведені експерименти з метою відпрацювання цих методів в умовах космічного простору для поліпшення якості напівпровідникових матеріалів. Такі експерименти було проведено під час космічних місій «SpaceLab-1». При цьому використовувався пристрій з дзеркально-променевим нагріванням, який мав наступні характеристики [14]: тип нагрівача – випромінювання галогенних ламп; максимальна потужність нагрівача 800 Вт, середня – 150 Вт; робоча атмосфера – вакуум; діапазон робочих температур 700 К – 1770 К; швидкість затвердіння $(10^{-4} - 1)$ см/хв; частота обертання підкладки (0 – 20) обертів/хвилину.

Унікальні умови космічного простору дозволяють вирощувати кристали з покращеними характеристиками. Центром дослідження мікрогравітації та матеріалів (Алабамський університет, Натсвіль, США) проводилися дослідження щодо вирощування кристалів із парової фази. Відпрацювання даної технології в у мовах космічного простору проводилося під час місії «SpaceLab-3» (США), де використовувалася піч з наступними характеристиками [15]: тип нагрівача: резистивний; потужність нагрівача 650 Вт; робоча атмосфера – інертний газ або вакуум; діапазон робочих температур 1000 К – 1200 К; градієнт температури 10 К/см.

Умови навколоземного простору сприяли розвитку космічної металургії, а саме способам отримання унікальних сплавів та композиційних матеріалів з покращеними характеристиками, які в наземних умовах неможливо досягти.

В наземних умовах дослідженням технології виплавки металу в вакуумних камерах займаються Лінчевський Б. В., Самарін А. М. та ряд інших вчених [16, 17]. При виплавці в камері забезпечується вакуум порядку

(0,1 – 30) Па, що на 5 порядків менший ніж власний вакуум на навколоземній орбіті висотою від 350 км.

Інститутом перспективних матеріалів Фраунгофера з 1998 року проводяться дослідження технології створення піноме талів в умовах вакууму та невагомості [18 – 20]. Піноме тали отримуються шляхом введення газу в розплав або шляхом використання матеріалів-присадок, які в результаті нагрівання можуть виділяти газ [21, 22]. Технологічне обладнання для виробництва піноме талів має наступний перелік характеристик: температура плавлення – вибирається в залежності від типу матеріалу; магнітне поле до 1,5 Т; густина електричного струму 3 $А/см^2$; склад сплаву; склад газу, що вводиться до розплаву металу; рівень гравітації; рівень тиску при піноутворенні; рівень температури при піноутворенні; склад спінювача.

Ще одним з перспективних напрямків космічної металургії є лиття сфер. Так у роботах [23 – 25] зазначається, що за рахунок перевищення сил поверхневого натягу сили гравітаційного тяжіння стає можливим отримання сфер близьких до ідеальних діаметром до 20 мм. Також у цих роботах [23 – 25] показано, що процес лиття сферичних кульок може виконуватися методом виштовхування з наступною магнітною (або ультразвуковою) підвіскою розплаву. Також в [23 – 25] зазначається, що крім лиття кульок ідеальної форми відкриваються широкі можливості для лиття об'єктів осесиметричної форми, наприклад, для виготовлення оптичних лінз. Технологія лиття товстостінних порожнистих куль може бути використана для виготовлення в умовах космічного простору балонів високого тиску [23 – 25]. Лиття тонкостінних кульок в умовах невагомості дозволяє надавати кулькам підшипників здатність до пружних деформацій, що забезпечить саморегулювання підшипника під дією навантаження та компенсацію відхилень у кутових та осьових розмірах, за різними оцінками збільшить термін функціонування до 8 разів [23 – 25].

Інститутом космічних і астронавтичних наук JAXA за підтримки Управління пілотованих польотів JAXA проводили дослідження методу електростатичної левітації, який базується на використанні кулонівської сили між зарядженим зразком і навколишніми електродами, результатом досліджень стало створення установки для плавлення тугоплавких металів безтигельним способом за допомогою електростатичної левітації [26], яку було виведено на орбіту та змонтовано на Міжнародній космічній станції [27]. Використання безтигельної перекристалізації (БП) дасть змогу отримати надчисті матеріали з підвищеними електричними, міцнісними, магнітними та оптичними характеристиками. Установка БП мала наступний перелік параметрів: діапазон робочих температур 573 К – 3273 К; тип нагрівача – напівпровідникові лазери; енергетична потужність 550 Вт; поверхневий заряд зразка: $(10 – 50 \cdot 10^{-12})$ Кл. Адгезійне багатошарове лиття в космічному просторі може здійснюватися послідовною заливкою в матрицю матеріалів, що відрізняються не тільки густиною (при цьому не виникне перемішування шарів), але і тим, що не менш важливо, температурою плавлення [14, 28 – 33].

Центром космічних наук і технологій НАСА [34, 35] сумісно з компанією Made In Space [36, 37] в результаті багаторічних досліджень створено в умовах космічного простору оптичне волокно ZBLAN нового покоління, використання якого дозволить зменшити втрати при передаванні сигналу від 10 до 100 раз у порівнянні з аналогічними матеріалами, які виготовляються в наземних умовах. Технологічне обладнання для виготовлення оптичного во-

локна в умовах космічного простору має забезпечити можливість керування нагріванням та охолодженням. Температура кристалізації сировини досягає 370°С – 400°С, що потребує в умовах космічної платформи забезпечення високих вимог до систем енергопостачання щодо енергетичної потужності.

Умови космічного простору дають можливість створювати також унікальну біотехнологічну продукцію (вакцини, біопрепарати тощо). В космічній біотехнології найшов активне застосування процес електрофорезу для очищення біоматеріалів від шкідливих домішок. Це виходить завдяки відсутності в умовах мікрогравітації процесу елетроосмосу при виникненні в результаті електрохімічних реакцій шкідливих конвекційних потоків рідини, присутніх при аналогічному процесі в земних умовах. В рамках Програми комерційного електрофорезу США в космосі створено електрофоретичну установку з характеристиками [38]: діапазон робочих температур 288 К – 305 К; максимальна потужність 600 Вт; загальна потужність 3,6 кВт/годину; напруженість електричного поля (25 – 50) В/см.

В роботах [3 – 38] систематизовано дані щодо експериментів проведених на орбітальних станціях. Однак класифікації цих процесів проведено не було. Таким чином, **метою** даної роботи є класифікація технологічних процесів в умовах космічного простору за їхньою реалізацією на космічній індустріальній платформі та розробка відповідного класифікатора.

Феноменологічний аналіз різноманітних технологічних процесів, що мають бути реалізованими на космічній платформі, дозволив сформувати концептуальний технічний вигляд та структурний склад основних складових космічної платформи. На цій основі запропоновано базову конфігурацію платформи з метою визначення її головних та допоміжних параметрів, рис. 1.

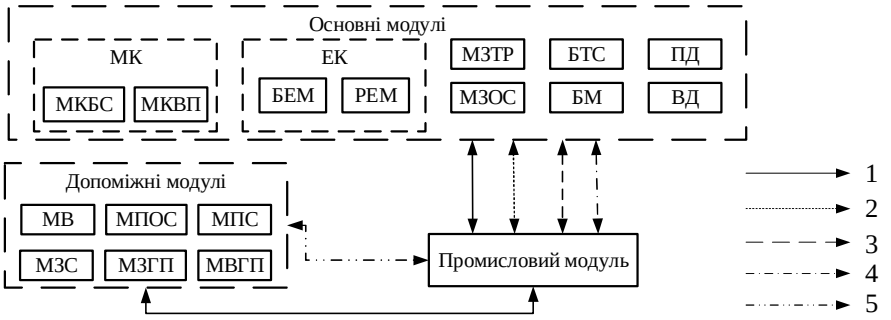


Рис. 1 – Структура базової конфігурації КІП

На рис. 1 показано вантажопотік та канали зв’язку та управління, енергозабезпечення та канал забезпечення теплового режиму, які мають наступні позначення: 1 – вантажопотік; 2 – канал зв’язку та управління; 3 – канал енергозабезпечення; 4 – канал забезпечення теплового режиму; 5 – канал системи вентиляції та вакуумування. Також на рис. 1 приведено основні та допоміжні модулі КІП для забезпечення того чи іншого технологічного процесу.

Основні модулі мають наступне позначення: МБС – модуль бортових систем; МК – модуль керування; МКБС – модуль керування бортовими системами; МКВП – модуль керування виробничим процесом; ЕК – енергетичний комплекс; БЕМ – бортовий енергетичний модуль; РЕМ – розподілений енергетичний модуль; МЗТР – модуль забезпечення теплового режиму; МЗОС –

модуль забезпечення орієнтації і стабілізації; БТС – бортова транспортна система; БМ – бортові маніпулятори; ПД – приймальні доки; ВД – відвантажувальні доки.

Допоміжні модулі позначаються на рис. 1 наступним чином: МВ – модуль вакуумування; МЗС – модуль зберігання сировини; МПОС – модуль первинної обробки сировини; МПС – модуль подачі сировини; МВГП – модуль відвантаження готової продукції; МЗГП – модуль зберігання готової продукції.

Для вироблення вихідних даних для розрахунку проєктних параметрів платформи необхідно об’єднати відповідним чином характеристики технологічних процесів. Для досягнення цієї мети запропоновано реалізувати кластеризацію характеристик технологічних процесів та їх подальшу класифікацію на основі відповідних критеріїв. Критерієм кластеризації було обрано «умови фізичної реалізації технологічного процесу». Для подальшої класифікації запропоновані критерії: «тип агрегатного стану сировини»; «метод кристалізації»; «рухомість температурного поля в камері спрямованої кристалізації»; «тип процесу осадження сировини із пари»; «тип епітаксії»; «форма кінцевої продукції космічної металургії»; «спосіб утворення пор в розплаві».

За критерієм «умови фізичної реалізації технологічного процесу» запропонована низка кластерів виробництв:

– напівпровідникові матеріали;
– космічна металургія;
– оптичні матеріали;
– високочисті біологічні речовини;
– сировина з космічного сміття.

Напівпровідникові матеріали. Кластер виробництва напівпровідникових матеріалів за критерієм «тип агрегатного стану сировини» ділиться на класи: розплав та газ.

Отримання напівпровідників із розплаву є найбільш розповсюдженим технологічним процесом отримання монокристалів. Розплавлення заготовки або її частини пов’язане зі значними витратами енергії. Даний технологічний процес за критерієм «метод кристалізації» ділиться на класи: безтигельна зонна перекристалізація, спрямована кристалізація.

Процес безтигельної зонної перекристалізації використовується при плавленні тугоплавких сплавів, температура плавлення яких більша або дорівнює температурі плавлення основних матеріалів для виготовлення тигля. Особливістю даного технологічного процесу є те, що на КІП необхідне одночасне використання індуктивних і електромагнітних пристроїв нагрівання, що в свою чергу призведе до збільшення енергозатрат, тому що в пристрої індуктивного нагрівання (ПІН) необхідно забезпечувати діапазон температур 700 К – 1700 К, а в пристрої електромагнітного нагрівання (ПЕМН): 1700 К – 3000 К. Діапазон споживання енергії складає 600 Вт/с – 900 Вт/с. При плавленні магнітних матеріалів левітацію зразка можна забезпечити електромагнітними пристроями, які одночасно виконують функцію і нагрівача. Що стосується плавлення немагнітних матеріалів, то в цьому випадку левітація забезпечується за допомогою спеціальних акустичних засобів. При реалізації цього технологічного процесу використовуються основні модулі КІП (рис. 1) та наступний перелік допоміжних модулів: ПІН; ПЕМН; модуль подачі розплаву з камери індуктивного до камери електромагнітного нагрівання; пристрій забезпечення левітації розплаву.

Ще одним способом отримання напівпровідникових матеріалів із розплаву є спрямована кристалізація. Даний технологічний процес є найбільш простим для реалізації, тому що кристалізація відбувається в температурному полі внаслідок повільного переміщення тигля відносно нагрівача. За критерієм «рухомість температурного поля в камері спрямованої кристалізації» ділиться на підгрупи: зі стаціонарним температурним полем та з рухомим температурним полем.

Отримання напівпровідникових матеріалів із розплаву зі стаціонарним температурним полем – метод Бріджмена–Стокбаргера – характеризується переміщенням ампули з заготовкою відносно зони з градієнтом температур, при цьому ріст кристалу може йти як від гострого кінця заготовки, так і від монокристалічної затравки. Ампула виготовляється із хімічно пасивного матеріалу. При реалізації цього технологічного процесу використовуються основні модулі КІП (рис. 1) та наступний перелік допоміжних модулів: ПІН; модуль вакуумування; пристрій забезпечення обертання камери. Діапазон робочих температур в ПІН 700 К – 1700 К; діапазон споживання енергії 150 Вт – 800 Вт.

Метод з регульованими температурними характеристиками печі більш переважний, тому що на відміну від методу Бріджмена–Стокбаргера та методу безтигельної зонної перекристалізації, в яких існують шкідливі вібропереванта-ження внаслідок роботи приводу переміщення. Реалізація цього процесу на КІП аналогічна реалізації технологічного процесу зі стаціонарним полем, відрізняється лише використанням пристрою переміщення нагрівального елемента.

Ще одним способом виробництва напівпровідникових матеріалів є отримання їх із пари. Реалізація даного способу в наземних умовах має суттєві обмеження в наслідок його чутливості до конвекції, що призводить до неконтрольованого росту кристалу. В умовах космічного простору відсутня конвекція теплових потоків і ефективність даного процесу значно збільшується. Виробництво напівпровідників із парової фази за критерієм «тип процесу осадження сировини із пари» ділиться на: фізичне і хімічне осадження сировини з пари.

Фізичне осадження напівпровідникових матеріалів із парової фази характеризується використанням різних методів, пов’язаних із осадженням у вакуумі. Спочатку сировина трансформується в пару, потім випарена речовина осаджується на об’єкті-одержувачі покриття товщиною від декількох атомів близько 0,0001 мкм до 100 мкм. При реалізації цього технологічного процесу на КІП використовуються її основні модулі (рис. 1) та додаткові допоміжні модулі: модуль вакуумування, пристрій розплавлення сировини; пристрій нагрівання підкладки, пристрій обертання підкладки.

Процес отримання напівпровідників із пари за допомогою хімічного осадження використовується для отримання високочистих твердих матеріалів. У цьому процесі підкладка поміщається в пари однієї або кількох речовин, які, вступаючи у взаємні реакції та/або розкладаючись, формують на поверхні підкладки шар необхідної речовини. Побічно часто утворюється також газоподібні продукти реакції, що виносяться з камери осадження потоком газуносія. Для реалізації цього технологічного процесу використовуються основні модулі КІП (рис. 1) та додаткові допоміжні модулі: пристрій нагрівання мішені з затравним матеріалом, пристрій подачі інертного газу до камери; пристрій нагрівання підкладки.

Отримали розвиток епітаксіальні методи отримання тонких шарів напівпровідникових матеріалів, коли на підкладці вирощуються тонкі орієнтовані шари. Дані методи дозволяють легко отримувати багатошарові структури. За

критерієм «тип епітаксії» епітаксійні методи отримання напівпровідникових матеріалів поділяються на: молекулярно-променеву і рідинну епітаксію.

Метод молекулярно-променевої епітаксії є удосконаленням способу отримання металевих плівок шляхом вакуумного випаровування та осадження. У цьому методі атоми і молекули, що спочатку потрапляють на чисту поверхню кристала, адсорбуються і десорбуються, а молекули можуть дисоціювати. При правильно вибраних температурі підкладки та відношенні інтенсивностей падаючих пучків на поверхні з адсорбованих атомів утворюється суцільна монокристалічна плівка, яка має заданий хімічний склад, і росте шар за шаром. Для реалізації цього процесу використовуються основні модулі КІП (рис. 1) та наступні допоміжні модулі: пристрій іонізації сировини; молекулярний екран; пристрій обертання молекулярного екрану; пристрій нагрівання підкладки. Процес молекулярно-променевої епітаксії чутливий до навіть малих змін у складі зовнішньої атмосфери КІП, що не дозволяє використовувати реактивні двигуни для орієнтації і стабілізації платформи. Під час технологічного процесу необхідно забезпечувати наступні характеристики: температура зразка, споживна енергія.

Метод епітаксії з рідкої фази заснований на нарощуванні монокристалічного шару напівпровідника з розплаву або розчину-розплаву, насиченого напівпровідниковим матеріалом. Напівпровідник пітаксійно кристалізується на поверхні підкладки, що занурюється в розплав, при його охолодженні. У методі епітаксії з рідкої фази напівпровідникову підкладку занурюють у розплав, насичений напівпровідниковим матеріалом, а сам розплав починають охолоджувати повільно. При охолодженні розплаву відбувається його пересичення, у результаті на підкладку осаджується шар напівпровідникового матеріалу. Як розчинник при приготуванні розчину-розплаву зазвичай використовують алюміній або галій. Для реалізації цього процесу використовуються основні модулі КІП (рис. 1) та наступні допоміжні: пристрій реалізації рідинно-фазової епітаксії, пристрій подачі метал-органічних з’єднань, пристрій переміщення підкладки.

Космічна металургія. Кластер виробництва космічної металургії за критерієм «форма кінцевої продукції космічної металургії», має наступні класи: лиття куль; лиття порожніх куль змінної товщини; адгезійне багатошарове лиття; піонометали.

Лиття куль в умовах космічного простору дозволить створити вироби зі значно покращеними характеристиками, при реалізації цього технологічного процесу використовується конфігурація КІП для реалізації безтигельної зонної перекристалізації.

При литті порожніх куль змінної товщини використовується технологія лиття куль з введенням всередину газу і одночасного забору розплаву, при реалізації цього процесу на КІП використовуються основні і допоміжні модулі для безтигельної перекристалізації, додатково використовуються наступні допоміжні модулі: пристрій введення газу в розплав; пристрій забору розплаву; пристрій електромагнітного нагрівання і левітації; ПЕМН; ПЗЛ – пристрій забезпечення левітації.

Умови космічного простору дозволяють створювати унікальні багатошарові матеріали за допомогою адгезійного лиття, де можуть поєднуватися шари полімерів і металів, що в земних умовах неможливо реалізувати. Для реалізації цього процесу використовується конфігурація КІП для процесу спря-

мованої кристалізації зі стаціонарним температурним полем, за винятком того, що пристрій подачі сировини виконано з можливістю подачі декількох видів сировини, в залежності від кількості та типу матеріалу шарів.

Піноме тали зазвичай виробляють шляхом упорскування газу або домішування піноутворювача в розплавлений метал. Розплави можуть бути спінені в результаті утворення у матеріалі бульбашок газу. Виробництво піноме талів за критерієм «спосіб утворення пор в розплаві» можна поділити на наступні групи: введення газу в розплав та введення піноутворювача в розплав.

Для реалізації процесу виробництва піноме талів з введенням газу у розплав використовується конфігурація КІП для процесу спрямованої кристалізації зі стаціонарним температурним полем, за винятком того, що додатково використовується допоміжний пристрій подачі газу в розплав.

Для реалізації процесу виробництва піноме талів з введенням піноутворювача в розплав використовується конфігурація КІП для процесу спрямованої кристалізації зі стаціонарним температурним полем, за винятком того, що додатково використовується допоміжний пристрій подачі піноутворювача на початковій стадії процесу.

Оптичні матеріали. Для реалізації виробництва оптичних матеріалів використовується структура КІП для спрямованої кристалізації зі стаціонарним температурним полем, додатково використовується наступний допоміжний модуль – пристрій протяжки розплаву матеріалу.

Високочисті біологічні речовини. В практиці космічної біотехнології активно використовуються методи електрофорезу для високоякісного розділення та очистки біологічних речовин. Для реалізації електрофоретичної очистки біопрепаратів на КІП використовуються її основні модулі (згідно рис. 1) та допоміжний модуль для електрофоретичної очистки. В загальному вигляді електрофоретична установка космічного базування включає в себе: електрофоретичну установку, високовольтне джерело живлення, систему охолодження, блоки температурного контролю, керування та комутації, вимірювання швидкостей. На КІП необхідно забезпечити наступні характеристики: температура; енергетична потужність; напруженість електричного поля.

Сировина з космічного сміття. В даний час на космічних орбітах за різними оцінками знаходиться близько 7000 тонн космічних об’єктів [39], що містять у своїх конструкціях дорогі матеріали. За відомими оцінками, вартість виведення одного кілограма маси на високу орбіту може перевищувати 10 тис. доларів. У зв’язку з викладеним в роботах [40, 41] пропонується розглянути існуюче космічне сміття (КС) як один з видів ресурсів ближнього космосу. Передбачається, що частина КС може бути складована і перероблена прямо на орбіті. Запропонований погляд на КС призводить до необхідності його утилізації для подальшого використання. Запропоновано спосіб переробки фрагментів космічного сміття (ФКС) в сировину для подальшого використання [42]. Спосіб реалізується наступним чином: після захоплення ФКС розміщується на спеціалізованому стапелі для фіксації та транспортування; за допомогою бортової рухової установки сервісного космічного апарата (СКА) виконується орбітальний маневр зі зближення з КІП; після стикування СКА та КІП, ФКС за допомогою дистанційно керованого маніпулятора поміщається на стапель, який міститься в приймальних доках, де здійснюється його первинна дефрагментація. Далі ФКС переміщуються у відповідні модулі

первинної переробки, де ФКС ідентифікуються, сортуються, піддаються подальшій дефрагментації до заданих габаритів, далі останні переміщуються в модуль вторинної переробки, де відбувається їх переробка. На початковій стадії може бути використане техногенне космічне сміття, що базується на низьких навколоземних орбітах.

Функціональну схему реалізації процесу отримання сировини із космічного сміття на КІП наведено на рис. 2.

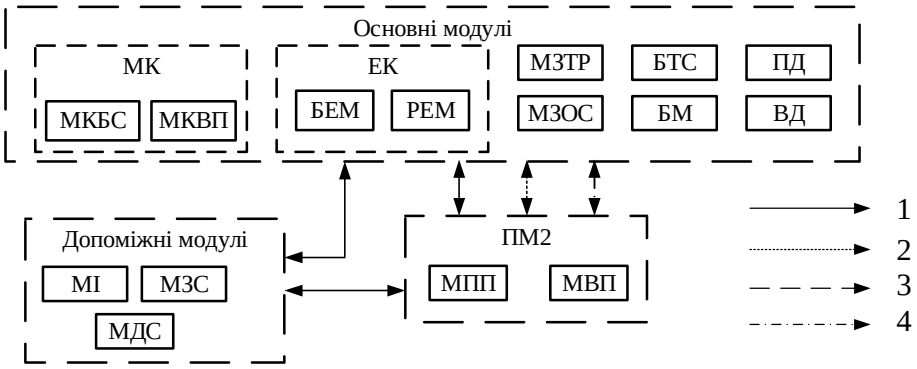
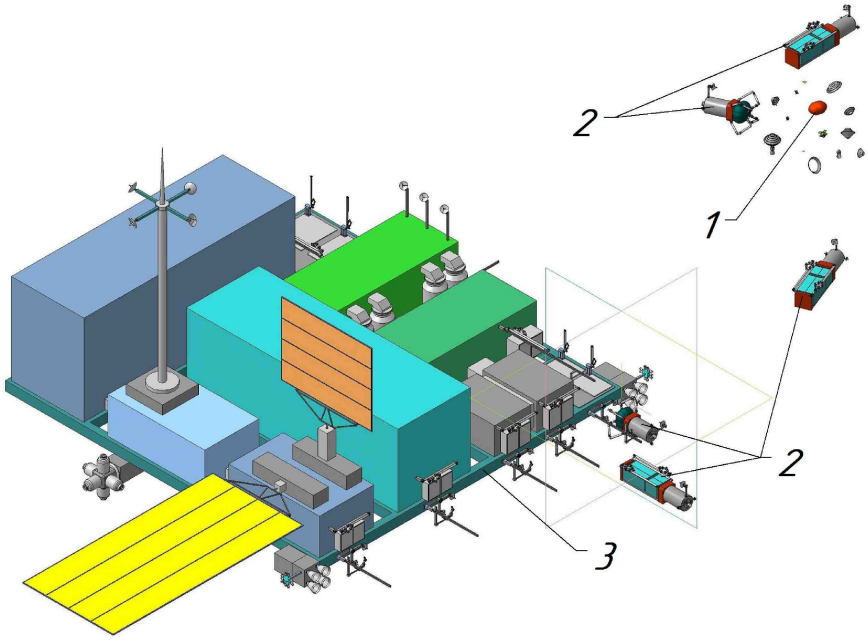


Рис. 2 – Структура базової конфігурації КІП для отримання сировини із космічного сміття

На рис. 2 показано: ПМ2 – промисловий модуль отримання сировини із космічного сміття; МІ – модуль ідентифікації ФКС; МДС – модуль дефрагментації та сортування ФКС; МПП – модуль первинної переробки; МВП – модуль вторинної переробки. Для реалізації цього процесу розроблено тривимірну модель КІП, яку наведено на рис. 3.



1 – ФКС; 2 – СКА; 3 – КІП.

Рис. 3 – Схема переробки ФКС в сировину

Проведено систематизацію даних щодо технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості для реалізації на КІП і сформовано комплекс їх параметрів, який наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Комплекс параметрів технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості

Параметр	Технологічний процес				
	Напівпровідникові матеріали	Космічна металургія	Оптичні матеріали	Високочисті біологічні речовини	Сировина з космічного сміття
Температура зразка, $T_з$, К	300 – 1800	400 – 3300	400 – 600	270 – 350	400 – 3000
Енергетична потужність, $P_{ТП}$, Вт	100 – 900	80 – 2600	80 – 1500	55 – 600	80 – 1500
Тиск в камері, Па	10^{-5} – 10^{-7}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
Напруженість магнітного поля, що діє на зразок, Тл	$0 – 3{,}5 \cdot 10^{-3}$	1,5	–	–	–
Напруженість електричного поля, В/см	–	–	–	25 – 50	–
Градієнт температури, К/см	0 – 350	0 – 600	–	–	–
Температура зберігання продукції, К	–	–	–	278	–

Дані параметри будуть використовуватися в якості вихідних даних для розробки науково-методичного забезпечення проєктування космічних індустріальних платформ.

Виконано класифікацію технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості, загальну структуру якої наведено на рис. 4.

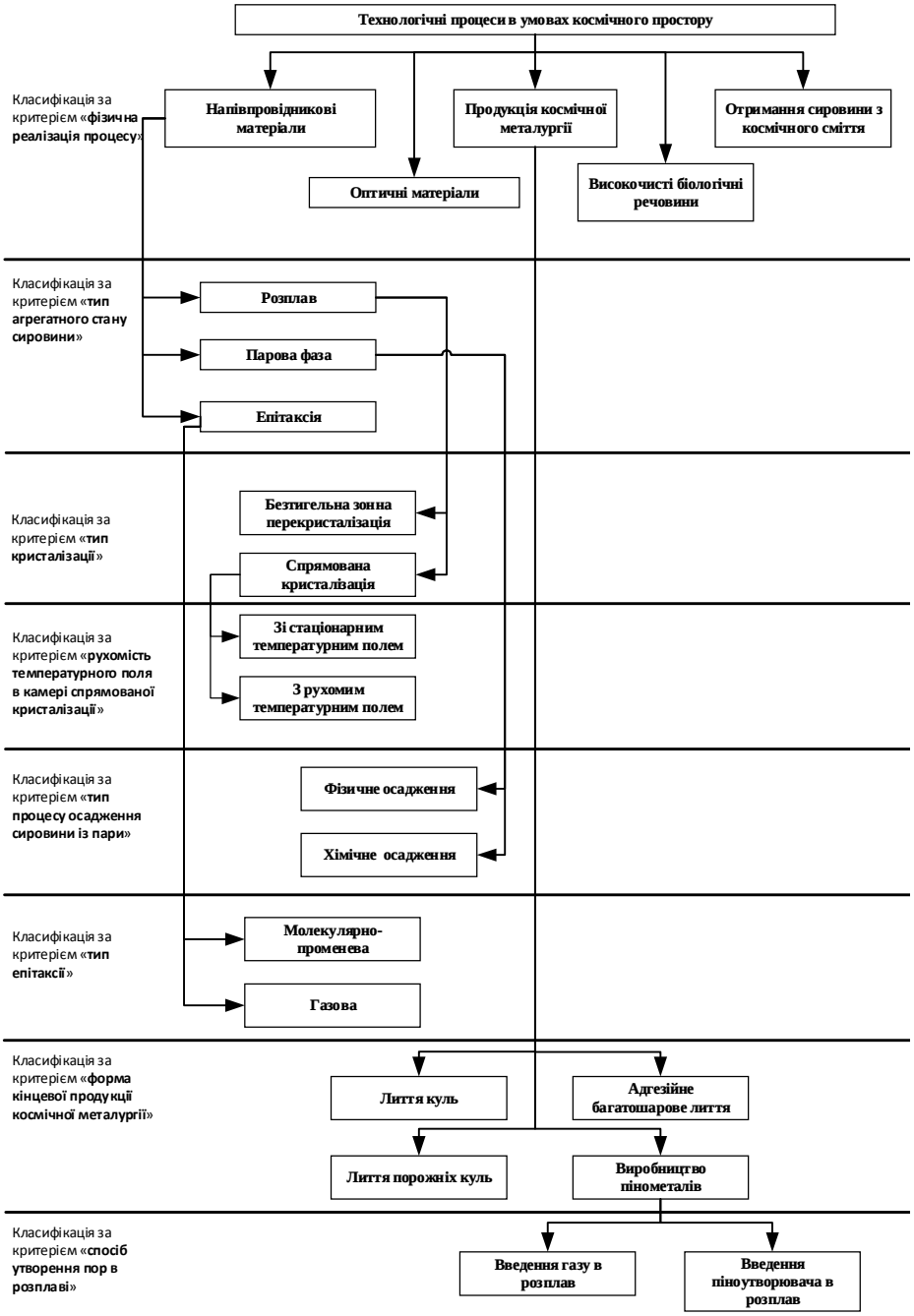


Рис. 4 – Класифікація технологічних процесів в умовах космічного простору для реалізації на космічній індустріальній платформі

Висновок. Реалізація унікальних технологічних процесів в умовах космічного простору дозволяє отримувати матеріали з якісно новими характеристиками. Для реалізації цих процесів на космічній індустріальній платформі необхідно розміщення основного да допоміжного технологічного обладнання. В результаті аналізу технологічних процесів, що реалізуються в умовах космічного простору, сформовано комплекс основних та допоміжних проєктних параметрів. Розроблено комплекс критеріїв класифікації технологічних процесів в умовах космічного простору. Виконано класифікацію технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості для реалізації їх на космічній індустріальній платформі та розроблено відповідний класифікатор. Сформовано концептуальний технічний вигляд та структурний склад основних складових космічної 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. Техн. механіка. 2021. № 3. С. 70–82. https://doi.org/10.15407/itm2021.03.070
3. *Ignatiev A. et al.* Thin Film Microelectronics Materials Production in the Vacuum of Space. Space Technology and Applications International Forum (STAIF-97), Albuquerque, NM, CONF 970115, American Institute of Physics, 1997. P. 685–689. https://doi.org/10.1063/1.47289 (last accessed 20.05.2022).
4. *Ignatiev A., Chu C. W.* Commercial Aspects of Epitaxial Thin Film Growth in Outer Space. The Space Congress Proceedings. URL: https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2123&context=space-congress-proceedings (last accessed 20.05.2022).
5. *Strozier J. A., Sterling M., Schultz J. A., Ignatiev A.* Wake vacuum measurement and analysis for the wake shield facility free flying platform. Vacuum. 2002. Vol. 64. P. 119–144. https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00383-9
6. *Блинов В. В., Владимиров В. М., Кушнарев Н. А. и др.* Выращивание полупроводниковых структур для высокоэффективных солнечных батарей в открытом космосе. Новые материалы и технологии в космической технике. 2020. Т. 1. № 1 (31). С. 45–54. https://doi.org/10.26732/j.st.2020.1.06
7. *Блинов В. В., Владимиров В. М., Кулинич С. Н.* и др. Оборудование для выращивания полупроводниковых гетероструктур в открытом космосе. Новые материалы и технологии в космической технике. 2021. Т. 5. № 2 (36). С. 110–115. https://doi.org/10.26732/j.st.2021.2.06
8. *Пчеляков О. П.* Полупроводниковые вакуумные технологии в космическом пространстве: история, состояние, перспективы. Космическое приборостроение. 2018. Т. 2. № 4 (26). С. 229–235. https://doi.org/10.26732/2618-7957-2018-4-229-235
9. *Бержатый В. И., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И. и др.* Перспективы реализации вакуумных технологий в условиях орбитального полета. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2001. № 9. С. 64–73.
10. Патент РФ на винахід № RU2372259, МПК B64G1/66; B64G4/00. Устройство для выращивания и обработки материалов в космическом пространстве в условиях сверхвысокого вакуума и способ его эксплуатации (варианты). *Блинов В. В., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И., Игнатьев А. и др.* 2008118835/11; заявл. 12.05.2008; опубл. 10.11.2009. Бюл. № 31.
11. *Lockowandt Chr., Yakimova R., Syvaejaervi M., Jznzen E.* High temperature furnace for liquid phase epitaxy of silicon carbide in microgravity. Acta Astronautica. 1999. Vol. 44, No. 1. P. 23–29. https://doi.org/10.1016/S0094-5765(98)00190-8
12. *Reibaldi G.* European facilities for microgravity and life science research and applications. Proceedings of the 2n d European Symposium on the Utilisation of the International Space Station, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. 16-18 November 1998. URL: https://adsabs.harvard.edu/full/1999ESASP.433...55R (last accessed 21.05.2022).
13. Materials Science Laboratory (MSL). Material physics research facility in Destiny. URL: http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/Factsheets/15%20MSL%20LR.pdf (last accessed 21.05.2022).
14. Космическое материаловедение. Введение в научные основы космической технологии: Пер. с англ. Под редакцией *Фойербахера Б., Наумана Р. Й., Хамахера Г.* М.: Мир, 1989. 478 с.
15. *Rosenberger F., Banish M., Duval W. M. B.* Vapor Crystal Growth Technology Development. NASA Technical Memorandum, December, 1991, №103786. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/42814442.pdf (last accessed 25.05.2022).
16. *Личевский Б. В.* Вакуумная металлургия стали и сплавов. Изд-во «Металлургия», 1970. 258 с.
17. *Самарин А. М.* Вакуумная металлургия. Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. 512 с.
18. *Banhart J.* And other Development of advanced foams under microgravity. Proceedings of the First International Symposium on Microgravity Research and Aplications in Physical Sciences and Biotechnology

held 10-15 September, 2000, Sorrento, Italy. URL: https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?2001ESASP.454..589B&defaultprint=YES&filetype=.pdf (last accessed 20.05.2022).
19. *Garcia-Moreno F., Banhart J.* Metallic foam experiments under microgravity. URL: https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b103_garcia2008.pdf (last accessed 20.05.2022).
20. *Banhart J.* Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science. 2001. Vol. 46. P. 559–632. https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5
21. *Ashby M. F., Evans A. G., Fleck N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W., Wadley H.N.G.* Metal Foams: A Design Guide. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 263 p.
22. *Banhart J.* Metal Foams: Production and Stability. Advanced Engineering Materials. 2006. №. 8(9). P. 781–794. https://doi.org/10.1002/adem.200600071
23. Патент США № US5073317, МПК B29D22/00. Large sphere production method and product. *Brotz G. R.* 384550. Заявл. 24.06.1989 ; опубл. 17.12.1991.
24. Патент США № US5507982, МПК B29C44/06. Method of large sphere production at zero gravity. *Brotz G. R.* 262509. Заявл. 20.07.1994 ; опубл. 16.04.1996.
25. Патент США № US 5693269, МПК B29C39/10. Sphere production process at zero gravity. *Brotz G. R.* 550004. Заявл. 26.10.1995 ; опубл. 02.12.1997.
26. *Tamaru H., Koyama Ch., Saruwatari H., Nakamura Y., Ishikawa T., Takada T.* Status of the Electrostatic Levitation Furnace (ELF) in the ISS-KIBO. Microgravity Science and Technology. 2018. Vol. 30. P. 643–651. https://doi.org/10.1007/s12217-018-9631-8
27. Electrostatic Levitation Furnace – ELF. JAXA. URL: https://iss.jaxa.jp/en/kiboexp/pm/pdf/elf_e_151120-2.pdf (last accessed 25.05.22).
28. *Беляков И. Т.* Технология в космосе. М.: Машиностроение, 1974. 292 с.
29. *Бармин И. В., Горюнов Е. И., Егоров А. В. и др.* Оборудование космического производства; Под общ. ред. *В. П. Бармина*. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
30. *Мелуа А. И.* Старт космической технологии. М.: Наука, 1990. 188 с.
31. *Евич А. Ф.* Индустрия в космосе. М.: Моск. Рабочий, 1978. 224 с.
32. *Sivolella D.* Space Mining and Manufacturing. Springer Nature Switzerland AG, 2019. 207 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30881-0
33. *Skomorohov R., Welch C., Hein A. M.* In-orbit Spacecraft Manufacturing: Near-Term Business Cases Individual Project Report. International Space University. Initiative for Interstellar Studies. 2016. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01363589 (last accessed 20.05.2022).
34. *Cozmuta I., Rasky D. J.* Exotic Optical Fibers and Glasses: Innovative Material Processing Opportunities in Earth's Orbit. New Space. 2017. Vol. 5, № 3. P. 121–140. https://doi.org/10.1089/space.2017.0016
35. *Tucker D. S., Ethridge E. C., Smith G. A., Workman G.* Effects of Gravity on ZBLAN Glass Crystallization. Annals New York Academy of Sciences. 2004. https://doi.org/10.1196/annals.1324.012
36. Patent USA № US10899651, IPC C03B37/02; C03B37/012; C03B37/025; C03B37/027; C03B37/029; C03B37/03; C03B37/07; C03C13/04; C03C25/105; C03C25/106; C03C25/6226; G02B6/02. System and method for manufacturing optical fiber. *Clawson J., White R., Pickslay N., Snyder M., Powers G. Y., Paul-gin N.* US16/045732; fil. 25.07.2018 ; publ. 26.01.2021.
37. Patent USA № US10927032, IPC C03B37/02; B01D29/56; B01D29/60; C03B37/012; C03B37/025; C03B37/027; C03B37/029; C03B37/03; C03B37/07; C03C13/04; C03C25/105; C03C25/106; C03C25/6226; G02B6/02. System and method for manufacturing optical fiber. *Clawson J., White R., Pickslay N., Snyder M., Powers G. Y., Paul-gin N.* US16/045730; fil. 25.07.2018 ; publ. 23.02.2021.
38. *Bauer J., Hymer W. C., Morrison D. R. and other.* Electrophoresis In Space. Advances in Space Biology and Medicine. 1999. Volume 7. P. 163–212. https://doi.org/10.1016/S1569-2574(08)60010-6
39. The Orbital Debris Quarterly News. NASA JSC Houston. 2021. Vol. 25, Iss. 1. P. 11.
40. *Алпатов А. П., Гольдштейн Ю. М.* Баллистический анализ распределения орбит космических аппаратов различного функционального назначения. Техническая механика, 2017. № 2. С. 33–41. https://doi.org/10.15407/itm2017.02.033
41. *Алпатов А.П.* Космический мусор: аспекты проблемы. Технічна механіка. 2018. № 1. С. 30–47. https://doi.org/10.15407/itm2018.01.030
42. Заявка на патент на винахід України № a202201533, МПК B64G 1/00, B64G 1/64, B23K 9/04. Спосіб переробки фрагментів космічного сміття природнього та штучного походження в елементи конструкції об'єктів космічної техніки та космічна індустріальна платформа для його здійснення / *Алпатов А. П., Палій О. С.* a202201533; заявл. 13.05.2022.

Отримано 01.06.2022,
в остаточному варіанті 27.06.00.2022