УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2020.04.082

А. М. АКСЮТЕНКО, Ю. П. ЄФИМОВ, Р. А. КАНЦЕРОВА, М. В. ПЕТРУШЕНКО, Т. Г. СМІЛА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПОНУВАННЯ ЗАПОВНЮВАЧІВ НЕГЕРМЕТИЧНИХ ВІДСІКІВ НА ГУСТИНУ ПОТОКІВ ГАЗОВИДІЛЕННЯ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лєшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: smelaya.t.g@nas.gov.ua

Останнім часом для здешевлення космічних проєктів при складанні малогабаритних космічних апаратів (МКА) нерідко використовують компоненти і матеріали індустріального і комерційного рівня якості. Це може позначитися на надійності та якості роботи МКА і встановленого на ньому устаткування. Високим чинником ризику, зокрема, є непередбачуваність експлуатаційних характеристик таких компонентів і матеріалів, яка викликана потоками газовиділення ненормованої густини. Ця обставина посилюється труднощами числового моделювання складної внутрішньої геометрії реальних негерметичних МКА. Найбільш ефективний спосіб вирішення проблеми – дослідження за допомогою лабораторних випробувань.

Метою роботи є розробка експериментальної системи, що дозволяє досліджувати залежність процесів дегазації внутрішніх поверхонь МКА від геометрії заповнення негерметичного відсіку платами радіоелектронної апаратури та різноманітними конструкційними матеріалами. Теоретичною базою для проведення експериментів є диференційна реалізація методу накопичення, що дозволяє розмежувати густину потоків газовиділення певним чином скомпонованих зразків та елементів внутрішніх поверхонь модуля.

Для відтворення характерних конструктивних особливостей малогабаритних нано- і пікосупутників доопрацьовані моделі негерметичних відсіків (НГВ), на основі яких створено спеціальний лабораторний модуль (ЛМ). Для цього модернізовано вузол синхронного управління відкачуванням відсіків, розроблено пристрій позиціонування пластинчатих заповнювачів НГВ, організовано реєстрацію газодинамічних параметрів внутрішньої власної атмосфери НГВ, підготовлено автоматизовану систему управління експериментом. ЛМ інтегровано в автоматизовану вимірювальну систему лабораторного стенду вакуумної аеродинамічної установки ВАУ-2М Інститута технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України. Випробування створеної експериментальної системи показали задовільну працездатність як окремих компонентів, так і конструкції в цілому.

Отримана система дозволяє: досліджувати процес газовиділення з поверхонь різних компонентів і матеріалів; оцінювати густину потоків продуктів газовиділення при різних компоновках апаратури і її елементів; досліджувати динаміку витікання продуктів внутрішньої власної атмосфери через калібровані діафрагми, які імітують витікання власної внутрішньої атмосфери через ненормовані зазори НГВ.

Ключові слова: *малогабаритні космічні апарати, моделі негерметичних відсіків, заповнювачі, плати радіоелектронної апаратури, компонування, пласкі канали, дегазація, власна внутрішня атмосфера, густина потоку газовиділення.*

In recent years, components and materials of industrial and commercial quality have been in frequent use in the assembly of small spacecraft to reduce the cost of space projects. This may affect spacecraft and onboard equipment reliability and performance quality. In particular, a high risk may arise from unpredictable performance characteristics of components and materials of this type caused by outgassing flows of unregulated density. The situation is aggravated by difficulties in numerical simulation of the complex internal geometry of actual nonhermetic small spacecraft. The most efficient way to resolve this problem is to conduct laboratory tests.

This paper presents an experimental system for studying the dependence of degassing processes on the geometry of arrangement of electronics boards and various structural materials in a nonhermetic module. The theoretic basis for experiments is a differential realization of the accumulation method, which allows one to differentiate the density of degassing flows from particularly arranged specimens and elements of the module's inner surface.

To reproduce the design features of nonhermetic nano- and picosatellites, models of nonhermetic modules were refined, and a special laboratory module was made on their basis. For this purpose, a unit of synchronous module evacuation control was updated, equipment was developed for positioning plate-type fillers of nonhermetic modules, the recording of gas-dynamic parameters of a nonhermetic module's own internal atmosphere was provided, and an automated experiment control system was prepared. The laboratory module was integrated into the automated measuring system of the VAU-2M vacuum aerodynamic installation of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine. The experimental system developed was tested to show a satisfactory operability of both its components and the system as a whole.

The system developed allows one to study outgassing from the surface of various components and materials, to measure the density of outgassing flows for various equipment arrangements, and to study the dynamics of outflow of the products of the own internal atmosphere through calibrated orifices, which simulate the outflow of the own internal atmosphere of a nonhermetic module through its unregulated clearances.

Техн. механіка. – 2020. – № 4.

Keywords: *small spacecraft, nonhermetic module models, fillers, electronics plates, arrangement, flat channels, outgassing, own internal atmosphere, outgassing flow density.*

В наш час спостерігається стійка тенденція зростання кількості запусків малогабаритних космічних апаратів (МКА) негерметичного виконання, у тому числі класів мікро-, нано- і пікосупутників. З метою максимального здешевлення розробки й реалізації МКА в їх конструкціях знаходять застосування компоненти і матеріали індустріального і комерційного рівня якості з ненормованою густиною потоків газовиділення. Часто основними заповнювачами відсіків МКА є виключно плати радіоелектронної апаратури (РЕА) [1]. Вони мають значну кількість пласких каналів (ПКЛ), утворених поверхнями різних електронних Surface Mounted Device (SMD) компонентів, змонтованих за технологією поверхневого монтажу. Аналогічні ПКЛ утворюють безпосередньо плати РЕА, що монтуються у відсіках МКА з використанням схеми "етажеркового" компонування [1]. Крім того, в МКА знаходять застосування шаруваті конструкції у вигляді сонячних і стільникових панелей і багатошарові матеріали типу екранно-вакуумної теплоізоляції, які також є ПКЛ [2].

Наявність великої кількості ПКЛ з різноманітною (часто невизначеною) геометрією ускладнює використання розрахункових методів оцінки густини потоків газовиділення (ГПГ) і значень параметрів власної атмосфери (ВА) МКА.

Власна атмосфера космічних апаратів (КА) і її вплив на обладнання, апаратуру і окремі компоненти системно вивчаються з 70-х років минулого сторіччя [3 – 7].

Роботи, присвячені лабораторним, числовим і натурним експериментам по дослідженню ВА та її впливу на поверхневі властивості апаратурних систем і устаткування, регулярно публікуються в спеціалізованих виданнях [8 – 15].

На початковому етапі освоєння космосу основні зусилля були зосереджені на вдосконаленні технологій і створенні спеціальних матеріалів, що витримують специфічні навантаження і умови, які виникають при виведенні обладнання на орбіту й у відкритий космос. Особлива увага приділялася компонентам, призначеним для роботи в негерметичних відсіках. Вони проходили випробування і подальшу сертифікацію, а отримані експлуатаційні характеристики фіксувалися в спеціальних довідниках [16].

З освоєнням технологій негерметичного виконання КА в їх ВА поряд із зовнішньою з'являється ще й внутрішня область. У загальному випадку, ВА складається з частинок, що оточують МКА (власна зовнішня атмосфера – ВЗА) і частинок, що формують атмосферу в його внутрішніх негерметичних корпусах або відсіках (внутрішня власна атмосфера – ВВА). Тобто, ВА є сукупністю частинок внутрішнього і зовнішнього середовища, що формується всередині негерметичних відсіків і навколо МКА. Ці два середовища взаємодіють між собою через ненормовані зазори (або при необхідності через калібровані отвори), що зв'язують внутрішні порожнини негерметичних відсіків із зовнішнім простором, що оточує КА (навколооб'єктове або навколосупутникове середовище, яке являє собою ВЗА, яка взаємодіє з потоком частинок, що набігають, та з електромагнітним випромінюванням різної природи). В процесі дегазації конструкційних матеріалів (КМ) та вузлів МКА, співвідношення газодинамічних параметрів і хімічний склад ВВА і ВЗА змінюються. Вони визначаються сорбційно-десорбціоними характеристиками КМ, параметрами орбіти, конструкцією апарату, зовнішніми та внутрішніми умовами формування ВА для кожного конкретного МКА.

Треба відзначити, що переважну більшість публікацій присвячено власній зовнішній атмосфері (ВЗА) КА. В даний час для дослідження її формування, як правило, застосовуються числові моделі [11, 17 – 19] з наступною верифікацією при натурних експериментах [8].

У роботах [9, 20] досліджується вплив конструкційно-компоновочної схеми КА зі стаціонарними плазмовими двигунами на параметри ВА, що формується. Аналіз робиться на підставі результатів, отриманих за допомогою числової (математичної) моделі.

Здешевлення проєктування та реалізації МКА (перш за все класів нано- та пікосупутників) за рахунок використання несертифікованих для застосування в космосі матеріалів і компонент створює передумови для ненормованого газовиділення з поверхонь елементів, в тому числі заповнювачів його внутрішніх порожнин негерметичних відсіків і непрогнозовано впливає на газодинамічні параметри ВВА. У цьому контексті цікаво оцінити вплив компонування апаратури і її елементів, розташованих в негерметичному відсіку, на значення густини потоків газовиділення з протилежних поверхонь, які утворюють пласкі канали. Зазначені фактори в кінцевому підсумку впливають на формування ВВА і інтенсивність витоку її продуктів через ненормовані зазори негерметичних відсіків (НГВ). Зробити це найзручніше за допомогою лабораторного експерименту.

Метою роботи є створення експериментальної установки для оцінки впливу геометрії компонування заповнювачів НГВ МКА на густину потоків продуктів газовиділення.

Для досягнення зазначеної мети необхідно створити спеціалізований лабораторний модуль (ЛМ), який містить НГВ з пластинчастими заповнювачами, що утворюють систему пласких каналів. Невід'ємними елементами ЛМ є: моделі НГВ, вузол синхронного управління відкачуванням відсіків, пристрої позиціонування пластинчастих заповнювачів (ПППЗ) НГВ, засоби реєстрації газодинамічних параметрів ВВА НГВ, компоненти автоматизованої системи управління експериментом (АСУЕ).

1. Експериментальна установка. Дослідження з використанням ЛМ можуть бути реалізовані на вакуумній аеродинамічній установці (ВАУ-2М) Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України [21]. При роботі в статичному режимі (без використання індукційного плазмового прискорювача) вакуум створюється двома паромастильними дифузійними агрегатами типу Н-8-ВА. Установка забезпечена зовнішніми вакуумметрами типу ВІТ і ВМТ001 для реєстрації тиску й відповідними манометричними перетворювачами типу ПМІ-2 (іонізаційний), ПМТ-2 (тепловий) і ПММ-32 (іонізаційний магніторозрядний), ПМТ-6 (тепловий). Показання тиску вакуумметрів можуть реєструватися АСУЕ. Оптимальний тиск у великій вакуумній камері (ВК) становить 1,33 10^{-3} Па. Час його досягнення становить не менше 3-х годин (при старті форвакуумного відкачування з атмосферного тиску). Граничний тиск – 6,67 10^{-4} Па. Час виходу на граничний тиск (при старті з атмосферного) – не менше 16 годин безперервного високовакуумного відкачування. У великій ВК можуть проводитися як попередні експерименти по дегазації експериментального оснащення, узгодження густини потоків газовиділення моделей негерметичних відсіків в процесі дегазації, так і серії базових експериментів.

Для реалізації ЛМ використовуються конструктивні елементи, вже описані в роботах [22 – 25], і нові пристрої. ЛМ являє собою автономну систему, адаптовану для роботи в вакуумній установці, яка відповідає вимогам експерименту, що проводиться.

2. Застосований метод. Фіксація густини потоків внутрішнього газовиділення реалізується за допомогою методу накопичення, що дозволяє реєструвати дані з максимальною чутливістю. Перевагою методу є те, що при розрахунках використовуються дані, отримані експериментальним шляхом. До недоліків можна віднести: дискретність вхідних параметрів; зміну умов дегазації при проведенні вимірювань; можливі спотворення значень, що реєструються, при багаторазовому підвищенні тиску в досліджуваних порожнинах. Це особливо актуально при наявності в продуктах дегазації летких речовин, що конденсуються.

Метод заснований на оцінці зміни тиску всередині порожнини постійного об’єму (вимірювального об’єкта – ВО, він же НГВ), за контрольовані періоди часу $\Delta t = t_2 - t_1$. Тут t_1 відповідає моменту від’єднання порожнини V_{BO} від вакуумного об’єму ВК (припинення вакуумної відкачки, НГВ закриті), а t_2 – моменту її приєднання до вакуумного об’єму ВК (відновлення вакуумної відкачки в результаті відкриття відкачних каналів НГВ) [23, 25]. Фіксуються: тиск P_{1BO} – до від’єднання порожнини від об’єму ВК і P_{2BO} – через час Δt після її від’єднання. В ізольованій (герметичній) порожнині з постійним об’ємом V_{BO} внаслідок газовиділення з її внутрішніх поверхонь Q_{BO} тиск збільшиться на $\Delta P_{BO} = P_{2BO} - P_{1BO}$ і:

$$Q_{BO} = \frac{V_{BO} \cdot \Delta P_{BO}}{\Delta t} = V_{BO}\frac{dP}{dt}.$$

Вираз для розрахунку швидкості питомого газовиділення з внутрішніх поверхонь вимірювального об’єкта має вигляд:

$$q_{BO} = \frac{V_{BO}\Delta P_{BO}}{\sum\limits_{i=0}^{n-1} S_{iBO} \cdot \Delta t},$$

де $\sum\limits_{i=0}^{n-1} S_{iBO}$ – сумарна площа поверхонь елементів внутрішньої порожнини вимірювального об’єкта (без досліджуваних зразків), м^2.

При наявності досліджуваних матеріалів (ДМ) всередині порожнини ВО сумарна густина потоку газовиділення системи буде дорівнювати:

$$Q_{BOДМ} = \frac{(V_{BO} - V_{ДМ}) \cdot \Delta P_{BO}}{\Delta t} = (V_{BO} - V_{ДМ})\frac{dP}{dt},$$

де $V_{ДМ}$ – об’єм зразка досліджуваного матеріалу, м^3.

Для коректної оцінки ГПГ безпосередньо з поверхні досліджуваного матеріалу необхідно врахувати сумарну густину потоку газовиділення самого ВО, що експоненційно змінюється підчас експерименту. Для цього використаємо метод накопичення в диференційній реалізації [3]. Він дозволяє врахувати зміни ГПГ під час експерименту за рахунок одночасної реєстрації тих самих параметрів на другому контрольному досліджуваному об’єкті з характеристиками, тотожними першому ВО. Для нього повинні виконуватись умови:

$$Q_{BO1} \approx Q_{BO2},\; q_{SBO1} \approx q_{SBO2},\; \sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO1} \approx \sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO2},\; V_{BO1} \approx V_{BO2},$$

де всі параметри вимірюються для внутрішніх порожнин, а індекси *BO1* і *BO2* відповідають першому і другому ВО: Q_{BO1} и Q_{BO2} – сумарна густина потоку газовиділення, Па·м/с^2; q_{SBO1} и q_{SBO2} – питома густина потоку газовиділення, Па/(м·с^2); $\sum_{i=0}^{n-1} S_{i\text{BO}1}$ и $\sum_{i=0}^{n-1} S_{i\text{BO}2}$ – сумарна площа поверхонь елементів, м^2; V_{BO1} и V_{BO2} – об’єми, м^3.

Якщо у внутрішню порожнину одного з двох ВО, наприклад у ВО1, помістити досліджуваний матеріал (ДМ) (вузол, компонент, зразок) з сумарною площею поверхонь $\sum_{i=0}^{n-1} S_{iДМ}$ і об’ємом $V_{ДМ}$, їх тотожність порушиться:

$$Q_{BO1} + Q_{ДМ} > Q_{BO2},\; q_{SBO1} + q_{SДМ} > q_{SBO2},$$
$$\sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO1} + \sum_{i=0}^{n-1} S_{iДМ} > \sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO2}, V_{BO1} - V_{ДМ} < V_{BO2},$$

де $Q_{ДМ}$ – густина потоку частинок газовиділення з поверхонь ДМ, Па·м/с^2; $q_{SДМ}$ – питома густина потоку газовиділення ДМ, віднесена до його площі поверхні, Па/(м·с^2).

Для першого вимірювального об’єкта зміна тиску $\Delta P_{BO1} = P_{2BO1} - P_{1BO1}$ і:

$$Q_{BO1} = \frac{V_{BO1}\Delta P_{BO1}}{\Delta t} = \frac{V_{BO1}dP}{dt},$$

$$q_{SBO1} = \frac{V_{BO1}\Delta P_{BO1}}{\sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO1} \cdot \Delta t},$$

де P_{1BO1} і P_{2BO1} – тиск всередині порожнини першого ВО до її від’єднання від об’єму ВК і через час Δt після цього, Па.

Аналогічно, для другого вимірювального об’єкта $\Delta P_{BO2} = P_{2BO2} - P_{1BO2}$ і:

$$Q_{BO2} = \frac{V_{BO2}\Delta P_{BO2}}{\Delta t} = \frac{V_{BO2}dP}{dt},$$

$$q_{SBO2} = \frac{V_{BO2}\Delta P_{BO2}}{\sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO2} \cdot \Delta t},$$

де P_{1BO2} і P_{2BO2} – тиск всередині порожнини другого ВО до її від’єднання від об’єму ВК і через час Δt після цього, Па.

Для експериментів по оцінці впливу геометрії пласких каналів на значення тиску ВВА і ГПГ в порожнинах двох вимірювальних об’єктів з встановленими ідентичними ПППЗ умова їх тотожності матиме такий вигляд (тут і далі індекси *ВО1* і *ВО2* вже відповідають порожнинам НГВ1 і НГВ2 із встановленими в них модулями ПППЗ1 і ПППЗ2 з тотожними об’ємами, площами поверхонь і ГПГ):

$$Q_{BO1} \approx Q_{BO2},\ q_{SBO1} \approx q_{SBO2},\ \sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO1} \approx \sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO2},\ V_{BO1} \approx V_{BO2},$$

а при розміщенні у внутрішній порожнині першого ВО ДМ:

$$Q_{BO1} + Q_{ДМ} > Q_{BO2},\ q_{SBO1} + q_{SДМ} > q_{SBO2},$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO1} + \sum_{i=0}^{n-1} S_{iДМ} > \sum_{i=0}^{n-1} S_{iBO2},\ V_{BO1} - V_{BO2} = V_{ДМ}.$$

Через те, що густина потоку частинок з першого ВО збільшилася за рахунок додаткової ГПГ з ДМ, сумарна густину потоку:

$$Q_{BO1ДМ} = Q_{BO1} + Q_{ДМ} = (P_{2BO1ДМ} - P_{1BO1ДМ}) \cdot V_{BO1} / \Delta t,$$

де $P_{1BO1ДМ}$ – тиск в першому ВО з ДМ в момент перекриття відкачного каналу, а $P_{2BO1ДМ}$ – тиск в тому самому ВО в момент часу t_2. Виходячи з умов тотожності вимірювальних об’єктів ($Q_{BO1} = Q_{BO2}$):

$$Q_{BO1ДМ} - Q_{ДМ} = Q_{BO2}.$$

Таким чином, можна визначити ГПГ з поверхонь досліджуваного матеріалу:

$$Q_{ДМ} = Q_{BO1ДМ} - Q_{BO2} = \frac{V_{BO1}\left(P_{2BO1ДМ} - P_{1BO1ДМ}\right)}{\Delta t} - \frac{V_{BO2}\left(P_{2BO2} - P_{1BO2}\right)}{\Delta t}.$$

У разі виникнення труднощів при визначенні сумарної площі поверхні ДМ $\sum_{i=0}^{n-1} S_{iДМ}$ (однотипні зразки зі складними рельєфними багаторівневими поверхнями) значення питомого газовиділення можна орієнтовно оцінювати з відношення до його маси $m_{ДМ}$:

$$q_{mДМ} = \frac{Q_{ДМ}}{m_{ДМ}}.$$

Припускається, що в режимі перекриття відкачного каналу обох НГВ натікання в їх внутрішні порожнини з боку ВК дуже мале. Оскільки зростання тиску, що реєструється ГПГ, носить експонентний характер, оцінки ГПГ будуть коректними при умові, якщо значення зміни тиску ΔP віднести до початкової лінійної області зростання реєстрованих тисків. Крім того, для порожніх НГВ і для КМ з низькою ГПГ значення ΔP можуть спотворюватися співмірними за величиною флуктуаціями в каналах реєстрації тиску і паспортними похибками застосовуваної апаратури (наприклад, для ВІТ 2 вони складають ±30 %) [22].

Наведені співвідношення для експериментів з ЛМ справедливі при наступних припущеннях і умовах:

– процеси в ЛМ близькі до квазістаціонарних;

– в ЛМ реалізується молекулярний режим течії продуктів газовиділення;

– усереднений масовий склад залишкової атмосфери вакуумної камери і продуктів газовиділення з внутрішніх поверхонь ЛМ в процесі експериментів не змінюється;

– усереднена молекулярна маса залишкової атмосфери ВК і продуктів дегазації з внутрішніх поверхонь ЛМ близька до молекулярної масі повітря і дорівнює 29;

– іонізаційні датчики тиску, що використовуються, мають близькі усереднені коефіцієнти чутливості як для повітря, так і для суміші продуктів дегазації.

Максимальні значення тиску в моделях відсіків, які короткочасно можна допустити в ході експериментів, обмежені верхньою межею 0,133 Па вимірювань датчиків ПМІ-2 і рівнем їх сигналів (які, як правило, не перевищують 1000 мВ), що виключає обмеження реєстрованих значень в підсилювачі постійного струму вакуумметра ВІТ-2. Тобто, максимальний короткочасний тиск, що може реєструватися в порожнинах НГВ для будь-яких експериментів, обмежується величиною 0,133 Па.

3. Модель негерметичного відсіку. В якості базових складових моделей НГВ використовувались конструктивні елементи контейнерів, що розглядалися в роботах [3, 4, 24, 26]. Моделі відсіків реалізовувалися відповідно до вимог, вироблених при відпрацюванні різних варіантів конструкцій і створених раніше макетних зразків. Аналіз конструктивних особливостей малогабаритних нано- та пікосупутніков [1] дозволив сформувати базові вимоги до моделей відсіків. При їх модернізації враховувалися:

– форма корпусу МКА;

– геометричні розміри корпусу МКА;

– модульність МКА;

– наявність вузлів для кріплення датчиків газодинамічних параметрів (ГДП) та елементи їх кріплення;

– наявність пристосувань для різних схем компонування заповнювачів в порожнині відсіку і пристрої для подачі газів в його об’єм;

– можливість сполучення з пристроєм дистанційного синхронного управління відкачуванням негерметичних відсіків;

– можливість реалізації диференційної схеми реєстрації газодинамічних параметрів ВВА.

На основі аналізу компонувальних схем МКА останнього десятиліття для реалізації корпусу НГВ обрано конструкцію з кубічною формою, яка є окремим випадком паралелепіпеда – найбільш поширеним форм-фактором серед реальних МКА негерметичного виконання [1].

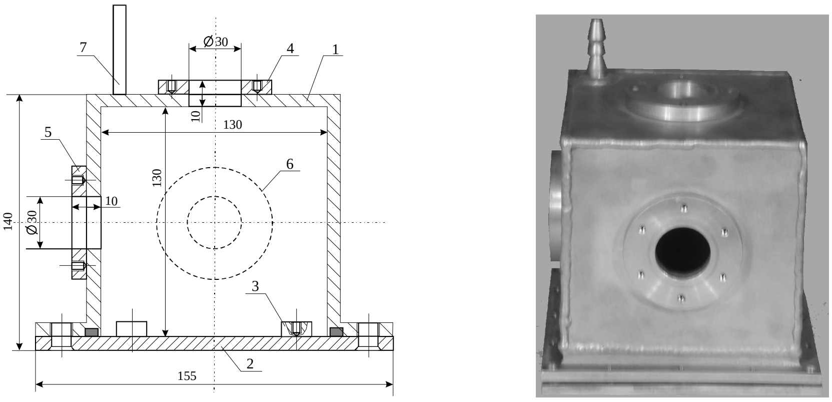
Розміри корпусу НГВ (довжина ребра – 130 мм) обиралися з міркувань максимального наближення до геометрії поширених реальних МКА класу наносупутників стандарту CubeSat (довжина ребра їх однонюнітового корпусу складає – 100 мм). Це створює можливість розміщувати в їх внутрішніх об'ємах повнорозмірні штатні фемто-, піко- і наносупутники для допольотних випробувань. При цьому можна збільшувати довжину моделі НГВ за рахунок монтажу додаткових модулів різних типорозмірів (+ 1U, + 2U тощо).

Для дослідження процесів масопереносу і мінімізації похибок вимірювань при проведенні циклічних (з періодичною зміною значень тиску від граничного вакууму до атмосферного) експериментів перевагу віддано диференційному методу реєстрації ГДП. Сутність його конструктивної реалізації полягає в застосуванні двох ідентичних НГВ і комплектів вимірювачів експериментальних параметрів [3]. При цьому повинно бути забезпечено синхронне управління перекриттям/відкриттям відкачних каналів в обох моделях відсіків.

Конструктивні особливості моделей НГВ забезпечують два варіанти формування ВВА: за рахунок газовиділення заповнювачів відсіку (електронні плати, модулі, вузли, листові КМ та ін.) і за рахунок зовнішнього контрольованого напуску газів у внутрішній об'єм.

Моделі НГВ виготовлені з алюмінієвих сплавів виходячи з мінімальної швидкості питомого газовиділення ($\approx 3{,}9\cdot 10^{-6}\,\text{м}^3\cdot\text{Па}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$), легкості механічної обробки та зварюваності [27 – 30].

Можливі два конструктивні варіанти моделі відсіку. Перший – базовий одномодульний корпус відсіку (рис. 1). Він складається з суцільнозварного алюмінієвого короба 1 кубічної форми. По периметру нижньої відкритої межі короба приварений квадратний фланець з отворами під гвинтове кріплення. На ньому монтується прямокутна пластина 2, яка виконує роль нижньої кришки-основи, що герметизує внутрішню порожнину моделі відсіку. На внутрішній поверхні кришки корпусу розташовані чотири втулки 3 з різьбовими отворами, в які можуть укручуватися спеціальні стійки. На них монтуються досліджувані або штатні пластинчасті зразки матеріалів, плати РЕА та інше.



а) б)

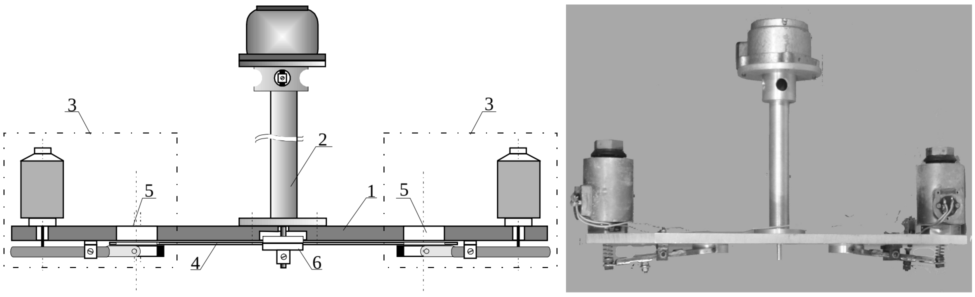
1 – суцільнозварний алюмінієвий короб; 2 – нижня кришка-основа корпусу; 3 – втулки з різьбовими отворами для укручування спеціальних стійок, на які монтуються зразки, що випробуються; 4 – 6 – фланці з різьбовими отворами для монтажу додаткових датчиків і приєднання відсіку до пристрою синхронного управління відкачуванням; 7 – алюмінієвий патрубок для зовнішньої подачі газу з системи напуску у внутрішню порожнину моделі відсіку [26]

а) – схема конструкції; б) – загальний вигляд

Рис. 1 – Модель базового відсіку

Другий варіант конструкції передбачає доповнення базового відсіку другим одиничним модулем, утворюючи видовжений відсік форми 2U. Додатковий корпусний модуль являє собою суцільнозварний алюмінієвий короб. Він ідентичний базовому, але без додаткових деталей.

4. Пристрій синхронного управління відкачуванням відсіків. Важливим компонентом ЛМ для дослідження газодинамічних процесів в негерметичних відсіках і оцінки густини потоків газовиділення з внутрішніх поверхонь моделей НГВ є система для дистанційного синхронного управління їх вакуумним відкачуванням, яка представлена на рис. 2. Вона дозволяє реалізувати метод накопичення і є самостійним пристроєм, до якого можуть приєднуватися одна або дві (у разі застосування диференційного методу вимірювань) моделі НГВ. Крім того, даний пристрій може використовуватися для випробувань повнорозмірних штатних модулів КА закритого типу [22], в корпусі яких передбачено спеціальний приєднувальний відкачний отвір-фланець.

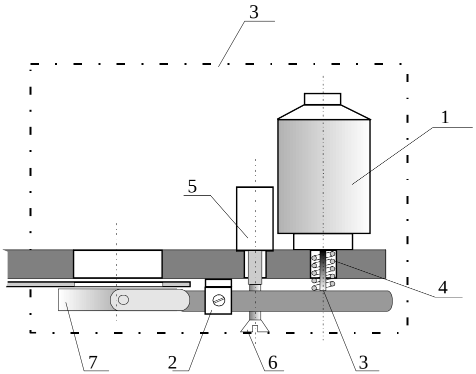


а) б)

1 – основа пристрою; 2 – вузол позиціонування обтюратора; 3 – вузли фіксаторів диска обтюратора; 4 – диск обтюратора; 5 – випускні отвори; 6 – спеціальний дисковий затискач для закріплення диска обтюратора на поворотному валі

а) – схема пристрою; б) – загальний вигляд пристрою

Рис. 2 – Пристрій для синхронного регулювання ступеня негерметичності відсіків



1 – лінійний електромагнітний привід; 2 – важіль; 3 – тросова тяга; 4 – притискна пружина; 5 – кінцевий датчик; 6 – регулювальний гвинт; 7 – кільцевий притискач

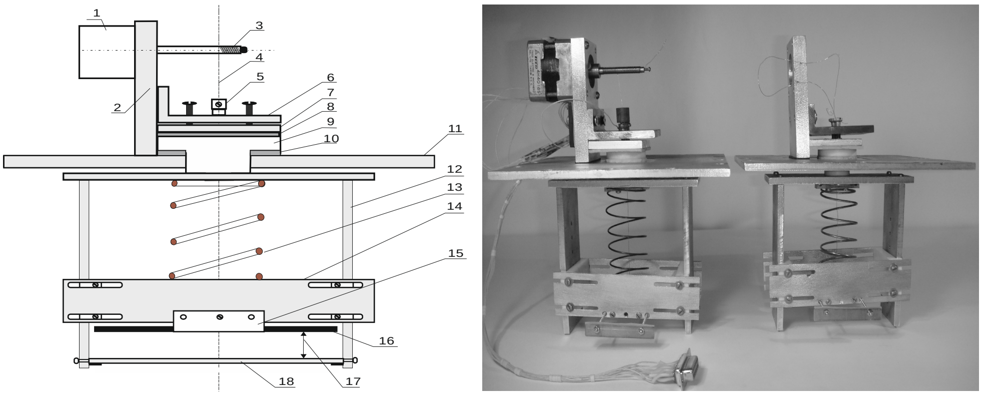
Рис. 3 – Схема вузла фіксації

У даній конструкції ЛМ позиціонування обтюратора здійснюється східчасто поворотом на кут з кроком 45° за допомогою спеціального крокового двигуна (КД).

Для виключення неконтрольованих течій при перекритті відкачних отворів в зонах сполучення поверхні диска обтюратора з їх периферійними поверхнями на базовій пластині і для зниження рівня коливань диска при його позиціонуванні в системі передбачені два симетричних притискних механізма (рис. 3). Пружний важіль з кільцем 7 притискає поверхню диска обтюратора до площини пластини.

5. Пристрій позиціонування пластинчастих заповнювачів НГВ. Пристрій являє собою дистанційний регулятор висоти пласких каналів, утворених заповнювачами НГВ. Заповнювачі можуть мати різні варіанти внутрішнього розташування. Найчастіше зустрічається «етажеркове» компонування [1, 31 – 33]. Його геометричні параметри можуть змінюватися тільки за рахунок вертикального взаємного розташування заповнювачів. Цікавим є питання щодо оцінки можливого впливу відстані між пластинчастими заповнювачами на густину потоків газовиділення з їх протилежних поверхонь та на газодинамічні параметри ВВА, що формуються в негерметичних відсіках. Для експериментального вирішення даного завдання потрібен пристрій з можливістю дистанційного регулювання відстані між пластинчастими заповнювачами, що забезпечить зручний монтаж і зміну пластинчастих зразків КМ різних розмірів безпосередньо в ході експерименту. Він повинен бути адаптований для установки в моделі НГВ [34].

Всі елементи пристрою зосереджені на пластині 11, адаптованій для монтажу на місце знімної кришки-основи НГВ ЛМ (рис. 4) [1, 21]. Основним елементом пристрою є поворотна П-образна рама, що обертається, в якій на певній відстані встановлюються досліджувані зразки (як горизонтально, так і вертикально). Максимальна кількість зразків дорівнює 8. При обертанні рами навколо вертикальної вісі змінюється її орієнтація щодо бічного відкачного отвору в корпусі відсіку. Для моделювання пласких каналів з різною висотою в конструкції ПППЗ на базі стандартного КД передбачено механізм вертикального переміщення одного з пластинчастих зразків. Стартова позиція рухомого зразка фіксується спеціальним контактним датчиком.



а) б)

1 – корпус; 2 – опорна стійка; 3 – барабан; 4 – струна; 5 – датчик-обмежувач; 6 – кронштейн; 7 – притискна пластина; 8 – ущільнювальна пластина; 9 – опора; 10 – ущільнювальна шайба; 11 – кришка-основа; 12 – П-подібна рама; 13 – пружина; 14 – рухома каретка з направляючими і системою кріплення зразків; 15 – утримувач рухомого зразка; 16 – рухомий зразок; 17 – висота плаского каналу; 18 – нерухомий зразок

а) – спрощена схема пристрою;

б) – загальний вигляд модулів ПППЗ1 і ПППЗ2 в зборі

Рис. 4 – Пристрій позиціонування пластинчастих заповнювачів

Запропонована схема ПППЗ дозволяє здійснити:

– моделювання геометрії пласких каналів, регулюючи їх висоту в ході експерименту дистанційно;

– моделювання варіантів «етажеркового» розташування регульованої щільності з різною кількістю встановлених пластин КМ;

– моделювання варіантів «етажеркового» розташування з пакетами пластин КМ в заданому діапазоні поперечних розмірів;

– регулювання орієнтації пакетів «етажеркового» розташування щодо площини зрізу отвору (щілини, каналу), що імітує задану ступінь негерметичності НГВ.

Можливості моделювання конструктивних особливостей заповнювачів негерметичних відсіків МКА і умов їх експлуатації можуть бути розширені за рахунок розробки додаткового оснащення для ПППЗ: нагрівачі та охолоджувачі зразків, датчики температури, датчики провідності і діелектричної проникності, кварцові мікроваги тощо.

6. Апробація, налагодження та тестування ПППЗ. Для проведення експериментів за участю пари моделей НГВ необхідні два ідентичних ПППЗ. ПППЗ1 для НГВ1, а ПППЗ2 – для НГВ2, причому для ПППЗ1 потрібен ще й додатковий електропривід. Для цього використовується чотирьохфазний КД (напруга електроживлення – 12 В, струм в кожній фазі – не більше 0,5 А) і КАМАК-модуль управління кроковим двигуном (МУКД). Мінімальний кутовий поворот валу – 1,8^{o}. На рис. 4, б) продемонстровані модулі ПППЗ1 і ПППЗ2 після складання.

Перевіряється роботоспроможність КД, оцінюється наявність мікротечій в НГВ та працездатність ПППЗ1. Тестування КД виконувалося на холостому ході за допомогою стандартного МУКД. Стабільність роботи КД перевірялася у всьому діапазоні тривалості імпульсів і відпрацюванні всіх кроків з використанням реверсного режиму роботи. При тривалій фіксованій зупинці також оцінювалася температура корпусу КД.

Оцінка наявності мікротечій в НГВ з встановленим ПППЗ та їх узгодження для обох пристроїв здійснюється методом надлишкового тиску. У внутрішній порожнині НГВ створюється надлишковий тиск (не більше 40000 Па). Кріпильними і регулювальними гвинтами на ПППЗ здійснюється притиск ущільнюючих елементів для максимального зниження падіння надлишкового тиску в НГВ за рахунок витоків в зонах ущільнень. Проміжком до початку видимого падіння тиску приймаємо десятикратний характерний термін експерименту – 1000 с.

Тестування ПППЗ1 полягає в перевірці точного відпрацювання заданої кількості кроків на доступних швидкісних режимах роботи КД. Контроль точності відпрацювання здійснюється за допомогою кінцевого датчика-обмежувача. Кроки відпрацьовуються шляхом переміщення рухомої каретки (РК) в обох напрямках.

Калібрування системи позиціонування ПППЗ1 здійснюється за допомогою механічного важеля стандартного індикатора мікропереміщень, фіксуючого перше торкання з поверхнею РК при її покроковому опусканні. Після декількох реверсних циклів переміщень РК визначається її середнє лінійне переміщення при повороті валу КД на один кутовий крок.

Зразки заповнювачів, що встановлюються в поворотну П-подібну раму, можуть формувати горизонтальні або вертикальні пакети з однаковим і змінним кроком. У зону П-подібної рами можуть бути підведені електричні провідники для розширення експериментальних можливостей даного пристрою.

Монтаж попередньо підготовлених (знежирених, зневоднених і дегазованих у вакуумній камері) поверхонь пристроїв на моделях НГВ1 і НГВ2 здійснюється безпосередньо перед проведенням експериментів.

7. Реєстратори газодинамічних параметрів ВВА, що формується в порожнинах моделей НГВ. Для відсіків передбачено використання двох видів датчиків – тиску і температури. Серед датчиків тиску перевага віддається стандартним типам манометричних перетворювачів. Використання перетворювачів типу ПМІ-2 забезпечує нормовану похибку ± 50 % для відомого складу залишкової атмосфери вимірювання тиску в порожнині відсіку в діапазоні від 1,33 10^{-1} Па до 1,33 10^{-5} Па при спільній роботі з вакуумметрами типу ВІТ-2 або ВІТ-3. Для реалізації експериментів, які провадяться у більш широкому діапазоні тисків, можуть бути використані іонізаційні датчики інверсно-магнетронного типу ПММ-32. Вони забезпечують таку ж нормовану похибку (як і датчики ПМІ-2) для відомого складу залишкової атмосфери вимірювання тиску в порожнині відсіку, але в діапазоні від 1,33 Па до 10^{-8} Па при спільній роботі з вакуумметрами типу ВМТ-001.

Монтуються датчики на верхній і одній з бічних граней корпусу за допомогою фланців. Невикористаний фланець герметизується заглушкою. У базовому варіанті моделі НГВ встановлений датчик ПМІ-2 в спеціальному утримувачі (аналогічно показаному на рис. 2). На корпусі можуть бути змонтовані два типи датчиків (наприклад, перетворювачі ПММ-32 і ПМТ-6).

Для вимірювання температури використовується плівковий дротяний термометр опору з індивідуальною градуювальною таблицею в діапазоні від -20°С до +30°С з похибкою порядку ± 0,1°С. Він монтується до вільної поверхні будь-якого НГВ ЛМ.

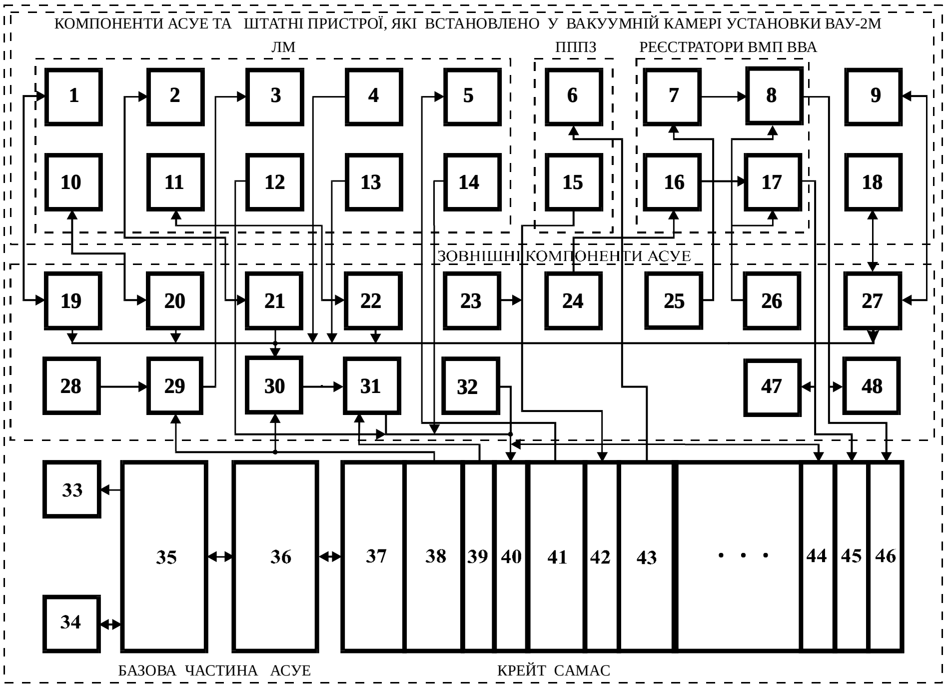
8. Автоматизована система управління експериментом. Для реалізації системи використовуються компоненти, що раніше застосовувались в лабораторних експериментах на установці ВАУ-2М [26]. Спрощена структурна схема АСУЕ при використанні двох моделей негерметичних відсіків, представлена на рис. 5, відображає всі наявні електричні зв’язки. Вона містить також додаткові компоненти, що дозволяють в подальшому модернізувати її та розширити коло досліджуваних задач.

Базовим компонентом АСУЕ є крейт САМАС з відповідними модулями, контролером (FK4410) 37 і інтерфейсною платою 36 узгоджувального пристрою, сумісного з ІВМ-подібними ПК 35.

Керуючий ПК дозволяє вводити команди (з клавіатури 34 та додаткових двійково-десяткових ручних пультів 23, 32) й оперативно керувати перебігом експерименту. Для зв’язку ПК з системою САМАС використовується інтерфейсна плата 36 та контролер 37. Модулі САМАС займають 18 позицій, включно з шістьма резервними місцями для можливого розширення. Налагодження та тестування АСУЕ здійснюється через контролер та спеціалізовані модулі (на схемі не показані) для контролю стану системи.

На відсіках НГВ та на робочій камері установки встановлені датчики тиску 1, 2, 10, 11, 18, 27, які з’єднані з відповідними вакуумметрами 19 – 22, 27. Сигнали вакуумметрів передаються на багатоканальний комутатор 30. Комутатор отримує також сигнали від датчиків температури 4, 13, які встановлено на корпусі НГВ та на поверхні ВК. Сигнали з комутатору 30 передаються на цифровий мультиметр (В7-40) 31, де здійснюється їх оцифровування з наступною передачею даних через контролер 37 в управляючий ПК 35. Управління сигналами мультиметра 31 здійснюється через вихідний 39 і вхідний регістри 40. Багатоканальний комутатор 30 керується регістром управління реле (РУР-1) 38.

У разі необхідності реєстрації ВМП, які витікають через випускні отвори НГВ, можуть бути застосовані спеціальні детектори 7, 16, електроживлення яких здійснюється блоками 24, 25. Сигнали детекторів передаються на відповідні підсилювачі 8, 17 з автономним блоком електроживлення 26 і далі спрямовуються на швидкодіючі АЦП 45, 46, де здійснюється їх обробка, яка аналогічна до алгоритму обробки в керованому цифровому мультиметрі 31. При роботі дискового обтюратору в режимі модуляції ВМП ВВА можлива реєстрація сигналів детекторів за допомогою селективних мікровольтметрів 47, 48, що значно підвищує чутливість системи.



1, 10 – датчики (ПМІ-2) тиску в НГВ1 та НГВ2; 2, 11 – магніторозрядні інверсномагнетронні датчики (ПММ-32) тиску в НГВ1 та НГВ2; 3 – лінійний електромагнітний привод кільцевих притискачів; 4, 13 – датчики температури НГВ та ВК; 5 – кроковий електродвигун дискового обтюратора; 6 – кроковий електродвигун ППП3; 7, 16 – детектори ВМП1 та ВМП2; 8, 17 – підсилювачі сигналів детекторів; 9 – реєстратор (ПММ-32) тиску в ВК; 12 – кінцевий датчик фіксатора; 14 – оптоелектронний датчик дискового обтюратора; 15 – датчик-обмежувач ППП31; 18 – датчик тиску (ПМТ-6) в ВК; 19, 20 – стандартні вакуумметри ВІТ; 21, 22, 27 – стандартні вакуумметри ВМТ-001; 23, 32 – двійково-десяткові блоки ручного керування компонентами АСУЕ; 28 – джерело електроживлення Б5-47; 29 – релейний блок; 30 – багатоканальний комутатор; 31 – цифровий мультиметр В7-40; 33 – відеомонітор; 34 – клавіатура; 35 – керуючий ПК; 36 – інтерфейсна плата; 37 – САМАС-контролер FK4410; 38 – модуль регістра управління реле (РУР-1); 39 – вихідний регістр; 40 – вхідний регістр; 41 – модуль управління кроковим двигуном (МУКД) приводу диска обтюратора; 42 – вхідний регістр; 43 – модуль управління кроковим двигуном ППП3; 44 – синхронізатор-таймер; 45, 46 – АЦП для реєстрації сигналів детекторів ВМП; 47, 48 – селективні мікровольтметри.

Рис. 5 – Структурна схема автоматизованої системи управління експериментом для досліджень газодинамічних параметрів в відсіках космічних апаратів

Керування пристроєм синхронного регулювання ступеня негерметичності відсіків реалізується за допомогою регістра управління реле 38 через релейний блок 29. Він підключає джерело електроживлення 28 до лінійного електромагнітного приводу 3, який підіймає кільцеві притискачі, що звільняють диск обтюратора, спрацьовують кінцеві датчики переміщень 12 і подають відповідні сигнали на вхідний регістр 40. Далі запускається МУКД 41 і вал крокового електродвигуна з закріпленим на ньому дисковим обтюратором повертається на заданий кут і диск знову фіксується притискачами. Для реєстрації часу позиціонування диска обтюратора в тому чи іншому положенні використовується таймер 44.

Для поліпшення синхронізації роботи диску обтюратору з каліброваними діафрагмами, за допомогою якого здійснюється керування ступенем негерметичності НГВ (випускні отвори відсіків відкриті/закриті, чи встановлюється діафрагма заданого перерізу, яка імітує витік частинок ВВА через ненормовані зазори), в ЛМ інтегровано пристрій контролю позиціонування диска обтюратора з використанням одноканальних відкритих оптоелектронних датчиків 14. Сигнали з цих датчиків передаються на вхідний регістр 40 та таймер 44, що дозволяє досить точно фіксувати положення обтюратору та час його позиціонування в тій чи іншій позиції.

Висновок. Випробування ЛМ показали задовільну працездатність як окремих його компонентів, так і системи в цілому.

Реалізовану експериментальну систему передбачається використовувати для оцінки густини потоків газовиділення різноманітних конструкційних матеріалів, електронних компонентів і готових вузлів (передусім це відноситься до продукції комерційного та індустріального рівня якості), включно з варіантами компоновок з різними комбінаціями пласких каналів, призначених для експлуатації у внутрішніх порожнинах НГВ МКА.

1. *Аксютенко А. Н., Канцерова Р. А.* Особливості конструкцій малогабаритних космічних апаратів негерметиного виконання. 11-th Ukrainian Conference on Space Research, August 29 – September 2, 2011, Yevpatoria, Crimea, Ukraine. Kyiv. 2011. С. 123.
2. *Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А.* Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. 572 с.
3. *Аксютенко А. Н., Басс В. П., Бразинский В. И., Доценкуо О. В., Солодовник Л. Л., Тарасов В. Б., Ярмак А. Д.* Экспериментальное и численное исследование газодинамических процессов в негерметичных отсеках космических аппаратов. Техническая механика. 1999. № 2. С. 13–24.
4. *Басс В. П.* Молекулярная газовая динамика и ее приложения в ракетно-космической технике. Київ: Наукова думка. 2008. 269 с.
5. *Акишин А. И., Дунаев Н. М., Константинова В. В.* Собственная атмосфера космических аппаратов и ее влияние на бортовые приборы, и технологию в космосе. Космическое материаловедение и технология. М.: Наука.1977. С. 65–77.
6. *Акишин А. И., Дунаев Н. М., Константинова В. В., Расторгуев В. А., Савченко С. А., Симонов А. Н., Камышков С. А., Конаныкин Л. В., Попов Ю. А., Яшин С. В.* Атмосфера, создаваемая космическим аппаратом, и ее влияние на работоспособность бортовой аппаратуры. Модель космического пространства. Под ред. акад. С. Н. Вернова. М.: НИИЯ ФМГУ.1983. Т. 2. С. 244–309.
7. *Данилкин В. А.* Собственная внешняя атмосфера космических аппаратов и ее влияние на параметры радиосигналов бортовых радиотехнических систем. Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 75–78. https://doi.org/10.1134/S0869864308010058
8. *Тестоедов Н. А. Кочура С. Г. Максимов И. А.* Система мониторинга уровней воздействия космической среды на космические аппараты разработки АО «Информационные спутниковые системы». Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 849–856.
9. *Смирнов В. А., Надирадзе А. Б., Максимов И. А., Хартов В. В., Шатров А. К. и др.* Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на космическом аппарате «Экспресс-АМ». Вестник СибГАУ: Сб. научн. тр. Красноярск: СибГАУ. 2006. Вып. 2(9). С. 46–50.
10. *Надирадзе А. Б., Смирнов В. А., Максимов И. А., Хартов В. В., Тибильдеева В. В.* Экспериментальное исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы на этапе орбитальной эксплуатации космического аппарата. Вестник СибГАУ: Сб. научн. тр. Красноярск: СибГАУ. 2006. Вып. 1(8). С. 91–95.
11. *Надирадзе А .Б., Шапошников В. В., Хартов В. В., Максимов И. А., Иванов В. В., Смирнов В. А.* Моделирование процессов формирования собственной внешней атмосферы и загрязнения поверхности кос-

мических аппаратов. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ. 2007. С. 39–59.

12. *Silver D. M.* Modeling of spacecraft contamination outgassing as a diffusion-controlled process. Proc. Optical System Contamination: Effects, Measurement, Control III (San Diego, US, 18 December 1992). 1992. P. 37–45. https://doi.org/10.1117/12.140750
13. *Hässig M., Altwegg K., Balsiger H., Schläppi B., Berthelier J. J., Fiethe B., Fuselier S. A., De Keyser J. and Rubin M.* Investigation of spacecraft outgassing by sensitive mass spectrometry. Spectroscopy Europe. 2011. Vol. 23. P. 20–23.
14. *Anwar A., Elfiky D., Gamal H., Albona M., Marchetti M*. Outgassing Effect on Spacecraft Structure Materials. International Journal of Astronomy, Astrophysics and Space Science. 2015. Vol. 2, No. 4. P. 34–38.
15. Zilong Jiao, Lixiang Jiang, Jipeng Sun, Jianguo Huang, Yunfei Zhu. Outgassing Environment of Spacecraft: An Overview. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 1–8.
16. *Campbell W. A., Scialdone J. J.* Outgassing data for selecting spacecraft materials. NASA Reference Publication 1124, Revision 3. Washington: NASA, 1993. 436 p.
17. *Надирадзе А .Б., Иванов В. В., Максимов И. А., Хартов В. В., Смирнов В. А.* Математическое моделирование загрязнения внешних поверхностей космических аппаратов выхлопами электроракетных двигателей и компонентами собственной внешней атмосферы. Сборник тезисов IV Международного аэрокосмического конгресса, 18–23 августа 2003 г., Москва. С. 200–201.
18. *Надирадзе А. Б., Шапошников В. В., Лукьянец Р. В., Корсун А. Г., Куршаков М. Ю., Твердохлебова Е. М.* Программа расчёта параметров собственной внешней ионосферы геостационарного космического аппарата, оснащённого электрореактивными двигателями. СВИ-ЭРД. ФАП РКТ. Рег. № 4144. 2010.
19. *Надирадзе А. Б., Чиров А. А., Шапошников В. В., Смирнов В. А., Максимов И. А.* Оценка времени обезгаживания негерметичного приборного отсека космического аппарата. Вестник СибГАУ: Сб. научн. тр. Красноярск: СибГАУ. 2007. Вып. 14. С. 95–98.
20. *Тестоедов Н. А., Смирнов В. А.* Исследование зависимости степени воздействия собственной атмосферы и плазмы, генерируемой стационарными плазменными двигателями, от конструктивно-компоновочной схемы космического аппарата. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 2. С. 24–32.
21. *Абрамовская М. Г., Аксютенко А. Н., Басс В. П., Ефимов Ю. П, Печерица Л. Л., Солодовник Л. Л., Ярмак А. Д.* Экспериментальные исследования в динамике разреженного газа. Техническая механика. 2002. № 2. С. 45–57.
22. *Нусинов М. Д.* Воздействие и моделирование космического вакуума. М.: Машиностроение. 1982. 175 с.
23. *Аксютенко А. Н., Канцерова Р. А.* Лабораторный стенд для исследования газодинамических процессов в моделях негерметичных отсеков космических аппаратов. 10-th Ukrainian Conference on Space Research, August 30 – September 3, 2010, Yevpatoria, Crimea, Ukraine. Kyiv, 2010. С. 74.
24. *Абрамовская М. Г., Аксютенко А. Н., Басс В. П., Ефимов Ю. П.* Лабораторные и натурные эксперименты по изучению газодинамических процессов в окрестности космических аппаратов и на их поверхности. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ. 2007. С. 60–116.
25. *Аксютенко А. Н., Канцерова Р. А.* Лабораторный модуль для исследования процессов формирования собственной атмосферы в моделях отсеков малогабаритных космических аппаратов. Всероссийская конференция «Современные проблемы динамики разреженных газов». Новосибирск, 2013. С. 15–17.
26. *Аксютенко А. Н.* Автоматизированная система для измерения давления разреженного газа в моделях негерметичных отсеков космических аппаратов. Техническая механика. 2004. № 2. С. 50–55.
27. Вакуумная техника: справ. под ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. М.: Машиностроение. 2009. 590 с.
28. Вакуумная техника: справ. под ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение. 1992. 480 с.

29 *Розбери А. Ф. П.* Справочник по вакуумной технике и технологии. М.: Энергия, 1972. 456 с.

30. *Розанов Л. Н.* Вакуумная техника. М.: Высшая школа. 1982. 207 с.
31. *Зуев Д. М., Пятков А. Г., Мовчан П. В., Смирнов Д. В., Костюков А. С.* SIBCUBE – проект студенческого космического аппарата СибГАУ класса CUBESAT. Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 160–166.
32. *Данилкин А. П., Козлов В. А.* Мировые тенденции развития малых спутников. Экономические стратегии. 2016. № 6. С. 136–149.
33. CubeSat. NTUU "KPI" Research laboratory – 2015. URL: http://www.cubesat.org.ua/ua/. Дата обращения: 29.09.2020.
34. *Аксютенко А. Н., Канцерова Р. А.* Пристрій для моделювання деяких особливостей заповнювачів негерметичних відсіків малогабаритних космічних апаратів. 15-th Ukrainian Conference on Space Research, August 24–28, 2015, Odesa, Ukraine. Kyiv, 2015. С. 75.

Отримано 20.10.2020,
в остаточному варіанті 27.11.2020