УДК 629.7.063.2 https://doi.org/10.15407/itm2023.03.124

Б. В. ЮРКОВ, С. Ю. АСМОЛОВСЬКИЙ

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ НАГРІВУ КСЕНОНУ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОТРАПЛЯННЮ РІДКОЇ ФАЗИ РОБОЧОЇ РЕЧОВИНИ ДО СИСТЕМИ ПОДАЧІ

Дніпровський національний університет імені О. Гончара,
пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Україна, 49010;
e-mail: bohdanyurkov@gmail.com

Серед різноманітних типів двигунних установок найбільш поширеними стають електрореактивні двигунні установки холлівського типу. Це пов’язано з тим, що використання холлівського двигуна дозволяє отримати високі значення характеристик двигунної установки при простоті конструкції у порівнянні з іншими типами двигунних установок. Для електрореактивних двигунних установок холлівського типу основною робочою речовиною є ксенон, оскільки він має досить високу атомну вагу, низьку енергію іонізації і є інертним газом, що дає змогу отримати високі характеристики двигунної установки при простоті її експлуатації. Використання ксенону у якості робочої речовини має особливість у зв’язку з його критичною температурою (289,74 К), що призводить до появи рідкої фази у балоні і, відповідно, стрибкам тиску, що унеможливлює використання системи подачі робочої речовини. Для виключення потрапляння рідкої фази ксенону до ресивера у електрореактивних двигунних установках використовують нагрівачі, що розміщуються на балоні з ксеноном та підтримують його температуру у заданому діапазоні. Проте даний підхід має наступні недоліки: низька теплопровідність композитних балонів погіршує передачу тепла від нагрівачів до ксенону; прогрів всього балона перед запуском двигуна збільшує час підготовки двигунної установки до запуску, а постійне підтримання температури балона призводить до збільшення енергоспоживання двигунною установкою; недоцільність підтримання температури усього запасу ксенону в той час, як за одне включення двигуна витрачається лише декілька грамів ксенону. Проблема, яка вирішувалась в даній роботі, полягає у зміні підходу до нагріву робочої речовини, яка поступає у систему подачі. Аналіз літературних джерел показав, що зазначена проблема є актуальною і має шляхи до удосконалення існуючих методів. Для вирішення зазначеної проблеми були проведені теоретичні розрахунки, які були перевірені експериментальним шляхом. В результаті досліджень було запропоновано методику розрахунку газифікатору, який підтримує температуру робочої речовини, що поступає в ресивер, у діапазоні від 293 К до 298 К, що усуне можливе потрапляння рідкої фази ксенону до ресивера системи подачі. Дослідження дозволяють використовувати запропонований конструктивний елемент (газифікатор), замість нагрівачів балону, що значно знижує споживану потужність і підтримує стабільну роботу системи подачі робочої речовини. Висновки, отримані за результатами досліджень, можуть бути корисними для більшості розробників систем зберігання і подачі електрореактивних двигунних установок.

Ключові слова*: система зберігання робочої речовини, електрореактивна двигунна установка, ксенон, методика розрахунку газифікатора.*

Among the various types of electric propulsion, the Hall thruster type is becoming the most common. This is due to the fact that the use of a Hall thruster makes it possible to obtain high values of the thruster characteristics with a simple design compared to other types of space propulsion systems. For Hall electric propulsion thrusters, the main working substance is xenon because of its fairly high atomic weight, low ionization energy, and unreactiveness, which makes it possible to obtain high thruster characteristics with ease of operation. The use of xenon as a working substance features a peculiarity involving its critical temperature (289.74 K), which gives rise to the liquid phase in the tank and, accordingly, pressure jumps, thus making it impossible to use the xenon feed system. To exclude the ingress of the liquid phase of xenon into the accumulator tank in electric propulsion systems, heaters are placed on the xenon tank to maintain its temperature within a given range. However, this approach has the following disadvantages: the low thermal conductivity of composite tanks impairs heater-to-xenon heat transfer; warming up the whole of the tank before starting the thruster increases the thruster start-up preparation time; the continuous maintenance of the tank temperature increases energy consumption by the propulsion system; and it is impractical to maintain the temperature of the whole of the xenon, while only a few grams of it are consumed for one thruster start-up. The problem that was solved in this work consists in changing the approach to heating the working substance that enters the feed system. The analysis of literary sources showed that this problem is relevant and offers ways to improve existing methods. To solve this problem, theoretical calculations were carried out and verified by experiment. As a result, a method was proposed to calculate the gasifier so that it may maintain the temperature of the working substance entering the accumulator tank within the range from 293 K to 298 K, thus eliminating the possible ingress of the liquid phase of xenon into the accumulator tank of the feed system. This study allows one to use the proposed structural element (gasifier) instead of tank heaters, which significantly reduces power consumption and maintains the stable operation of the working substance feed system. The conclusions drawn from the study may be useful to most developers of storage and feed systems for electric propulsion systems.

Keywords*: working substance storage system, electric propulsion system, xenon, gasifier calculation method.*

© Б. В. Юрков, С. Ю. Асмоловський, 2023

Вступ. Система подачі робочої речовини (СПРР) є важливою частиною електрореактивної двигунної установки (ЕРДУ). Точність і стабільність параметрів, а також надійність СПРР, гарантують подачу необхідної кількості робочої речовини (РР) із заданою точністю в анодний блок і катод електрореактивного двигуна, що забезпечує необхідні режими роботи двигуна і необхідні параметри ЕРДУ в цілому.

Електрореактивні двигуни загалом прихильні до використання робочої речовини з високою молекулярною масою і низьким потенціалом іонізації (табл.1). Перші електрореактивні двигуни використовували ртуть або цезій, які були в значній мірі виведені з практичних розробок через їх токсичність і схильність забруднювати космічний апарат (КА). Сьогодні більшість електрореактивних двигунів використовують інертний газ, який набагато простіший у використанні. У порівнянні з іншими видами двигунів, електрореактивні двигуни мають один з найбільших показників питомого імпульсу, але мають обмежену величину тяги до співвідношення потужності. Завдяки високому питомому імпульсу заощаджується масова витрата робочої речовини, але високі вимоги до енергозбереження та енергоживлення на борту космічного апарата в свою чергу піднімають масу необхідної енергосистеми [1].

Для ЕРДУ основним робочим тілом є ксенон [2], оскільки він має досить високу атомну вагу, низьку енергію іонізації і є інертним газом, що дає змогу отримати високі характеристики двигунної установки при простоті її експлуатації. Але внаслідок малої кількості виробництва ксенону і широкої сфери його застосування, ксенон має досить високу вартість, що відображається на вартості відпрацювання й експлуатації ЕРДУ на ксеноні [3].

Таблиця 1 – Порівняння властивостей робочих речовин.

Характеристики	Ar	Kr	Xe	Cs	Hg
Атомна вага	40	83,8	131,3	132,9	200,6
Потенціал іонізації, В	15,76	14	12,13	3,89	10,43
$P_{крит}$, атм.	48	54,2	58,2	-	-
$T_{крит}$, ˚С	-122	-62,6	+16,6	+28,5	-38,7
Токсичність	ні	ні	ні	так	так
Хімічна активність	ні	ні	ні	так	так

Одним із найбільших недоліків ксенону, як робочої речовини для ЕРДУ, є його низька критична температура (289,74 К), що призводить до появи рідкої фази у балоні. Потрапляння рідкої фази ксенону до ресивера призведе до різкого підвищення тиску в ньому й виходу тиску за встановлені межі. Тому в складі СПРР повинен бути нагрівальний елемент для підтримування температури РР, що поступає в ресивер, у діапазоні від 293 К до 298 К, що усуне можливе потрапляння рідкої фази ксенону до ресивера.

У якості такого нагрівального елемента у ЕРДУ використовуються нагрівачі балону, які підтримують температуру баку вище ніж 293 К [4]. Цей метод є надійним, але має суттєвий недолік, а саме необхідність нагріву всього об’єму робочої речовини, що є суттєво енерговитратним [5].

Запропоновано використовувати нагрів лише об’єму газу, якій потрапляє до ресивера. Таким чином необхідно встановити так званий газифікатор, який конструктивно являє собою трубку із тонкоплівковим нагрівачем, що приклеєно на зовнішню поверхню трубки.

Задачами цієї роботи є формування методики розрахунку параметрів газифікатора, формування підходу до використання газифікатора у ЕРДУ та експериментальна перевірка роботи газифікатора у складі системи подачі робочої речовини.

Запропонована методика розрахунку газифікатора. Методика розрахунку газифікатора була сформована на матеріалах книги [6]. Для розрахунку газифікатора необхідні дані по значенню тиску у балоні, максимальній масовій витраті робочої речовини у ресивер, масовій витраті з ресивера на двигун і робочому діапазону температур ЕРДУ.

Оскільки РР при протіканні через газифікатор змінює свій агрегатний стан, розділимо газифікатор по довжині на дві ділянки:

- ділянка кипіння ксенону;
- ділянка перегріву парів ксенону.

Тоді сумарний тепловий потік Q_G (Вт), необхідний для випаровування й перегріву парів ксенону, можна визначити за формулою

$$Q_G = Q_b + Q_o \, , \tag{1}$$

де Q_b – необхідний тепловий потік для випаровування рідкого ксенону, Вт; Q_o – необхідний тепловий потік для перегріву парів ксенону, Вт.

Потужність, що необхідна для випаровування рідкого ксенону, визначатиметься за формулою

$$Q_b = \dot{m}_m \quad \cdot r \, , \tag{2}$$

де $\dot{m}_m$ – максимальна масова витрата РР через газифікатор, кг/с; r – теплота пароутворення ксенону, Дж/кг.

Потужність, що необхідна для перегріву парів ксенону, визначатиметься за формулою

$$Q_o = \dot{m}_m \quad \cdot C_p \ \cdot (T_{X\ 2} - T_{X\ 1}) \, , \tag{3}$$

де C_p – питома теплоємність парів ксенону для середньої температури на ділянці, Дж/(кг·К); $T_{X\ 1}$ – температура РР на вході до газифікатора, К; $T_{X\ 2}$ – температура РР на виході з газифікатора, К.

Довжину трубки газифікатора l_Σ (м) визначатиметься за формулою

$$l_\Sigma = l_b + l_o \, , \tag{4}$$

де l_b – довжина ділянки газифікатора, що необхідна для випаровування рідкого ксенону, м; l_o – довжина ділянки газифікатора, що необхідна для перегріву парів ксенону, м.

Довжину ділянок можна визначити з рівняння Ньютона–Ріхмана

$$l_b = \frac{Q_b}{\propto_b \cdot \pi \cdot d \cdot (T_w - T_X \ \ )} \ ; \tag{5}$$

$$l_o = \frac{Q_o}{\propto_o \cdot \pi \cdot d \cdot (T_w - T_{X\epsilon} \ )} \, , \tag{6}$$

де $\propto_b$ и $\propto_o$ – коефіцієнт тепловіддачі на ділянках кипіння й перегріву парів ксенону, Вт/(м^2·К); d – внутрішній діаметр трубки, м; T_w – температура стінки газифікатора, К; T_X – температура ксенону на ділянці, К.

Температура ксенону на ділянці визначатиметься за формулою

$$T_X \quad = T_w - \Delta T_{l} \quad , \tag{7}$$

де ΔT_{l} – температурний напір, К.

Температурний напір визначатиметься за формулою

$$\Delta T_{l} \quad = \frac{T_{X\ 2} - T_{X\ 1}}{\ln \frac{T_w - T_{X\ 1}}{T_w - T_{X\ 2}}} . \tag{8}$$

На ділянці кипіння температура ксенону постійна, тому для ділянки кипіння $T_{X} \quad = T_{X\ 1}$.

Коефіцієнт тепловіддачі визначатиметься:

– для ділянки кипіння

$$\propto_b = 0{,}62 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda''^3 \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g \cdot r^*}{\nu'' \cdot d \cdot (T_w - T_{X\ 1})}} \; ; \tag{9}$$

– для ділянки перегріву парів ксенону

$$\propto_o = \frac{\mathrm{Nu} \cdot \lambda}{d} , \tag{10}$$

де λ'' – коефіцієнт теплопровідності парової фази ксенону, Вт/(м·К); ρ' – густина рідкої фази ксенону, кг/м^3; ρ'' – густина парової фази ксенону, кг/м^3; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; r^* – ефективна теплота газового переходу, Дж/кг; ν'' – кінематична в’язкість парової фази ксенону, м^2/с; Nu – число Нуссельта на ділянці перегріву парів ксенону; λ – коефіцієнт теплопровідності ксенону на ділянці перегріву парів ксенону, Вт/(м·К).

Ефективна теплота газового переходу визначатиметься за формулою

$$r^* = r + 0{,}5 \cdot C_p'' \cdot (t_w - t_{X\ 1}) , \tag{11}$$

де C_p'' – питома теплоємність парів ксенону на ділянці кипіння, Дж/(кг·К).

Число Нуссельта на ділянці перегріву парів ксенону визначатиметься в залежності від режиму течії ксенону:

– при ламінарному режимі течії для випадку, коли $\mathrm{Re} < 2300$ і $l/d \leq 0{,}67 \cdot \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}_X^{5/6}$

$$\mathrm{Nu} = 1{,}4 \cdot \left(\mathrm{Re} \cdot \frac{d}{l}\right)^{0{,}4} \cdot \mathrm{Pr}_X^{0{,}3} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_X}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0{,}2} \; ; \tag{12}$$

– при ламінарному режимі течії для випадку, коли $\mathrm{Re} < 2300$ і $l/d > 0{,}67 \cdot \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}_X^{5/6}$

$$\mathrm{Nu} = 4 \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_X}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0{,}2} \; ; \tag{13}$$

при перехідному режимі течії, коли $2300 < \mathrm{Re} < 10000$ [7]

$$\mathrm{Nu} = K \cdot \mathrm{Pr}_X^{0{,}4} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_X}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0{,}2} \cdot \varepsilon_l \; ; \tag{14}$$

– при турбулентному режимі течії, коли $\mathrm{Re} > 10000$

$$\mathrm{Nu} = 0{,}021 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}_X^{0{,}4} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_X}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0{,}2} \cdot \varepsilon_l\,, \tag{15}$$

де Re – число Рейнольдса; Pr_X і Pr_w – число Прандтля при середній температурі ксенону і стінки, Вт/(м·К); K – коефіцієнт, що залежить від числа Рейнольдса, визначається по таблиці 2; ε_l – коефіцієнт, що враховує зміну середнього коефіцієнту тепловіддачі по довжині трубки, дорівнює:

– при $l/d > 50$ – $\varepsilon_l = 1$;

– при $l/d \leq 50$ – $\varepsilon_l \approx 1 + 2 \cdot d/l$ [7] або більш точніше може бути визначено по таблиці 3.

Таблиця 2– Залежність коефіцієнту K від числа Рейнольдса [7]

Re	***K***	**Re**	***K***	**Re**	***K***
2300	3,6	4000	12,2	7000	24
2500	4,9	4500	14,5	8000	27
3000	7,5	5000	16,5	9000	30
3500	10	6000	20	10000	33

Таблиця 3– Залежність коефіцієнту ε_l при турбулентному режимі течії [6]

Re	$\boldsymbol{l/d}$								
	1	**2**	**3**	**10**	**15**	**20**	**30**	**40**	**50**
1·10⁴	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
2·10⁴	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
5·10⁴	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
1·10⁵	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
1·10⁶	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

Число Рейнольдса визначається за формулою

$$\mathrm{Re} = \frac{4 \cdot \dot{m}_m}{\pi \cdot d \cdot \eta}\,, \tag{16}$$

де η – динамічна в’язкість, Па·с.

Число Прандтля визначається за формулою $\mathrm{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$. (17)

Потужність нагрівача газифікатора Q_H (Вт) визначатиметься за формулою

$$\mathrm{Q}_H = \frac{\mathrm{Q}_G + \mathrm{Q}_{r}}{\eta_H}\,, \tag{18}$$

де Q_{r} – потужність, що втрачається на випромінення з поверхні газифікатора, Вт; η_H – ККД нагрівання, враховує втрати при передачі тепла від нагрівача до РР.

Приймаємо $\eta_H = 0{,}8$.

Потужність, що втрачається на випромінення з поверхні газифікатора, буде визначатися за формулою

$$\mathrm{Q}_{r} = \mathrm{C}_0 \cdot \left[\left(\frac{T_H}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_e}{100}\right)^4\right] \cdot \varphi \cdot F_H \cdot \varepsilon^*\,, \tag{19}$$

де C_0 – коефіцієнт випромінення абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5{,}67$ Вт/(м^2·К^4); T_H –температура поверхні газифікатора. Приймаємо $T_H = T_w$; T_e – температура зовнішнього середовища, К; φ – кутовий коефіцієнт випромінювання. Приймаємо $\varphi = 1$; F_H – площа поверхні газифікатора, м^2; ε^* – приведена ступінь чорноти.

Приведено ступінь чорноти визначатиметься за формулою

$$\varepsilon^* = \frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_H} + \dfrac{F_H}{F_{e\imath}} \cdot \left(\dfrac{1}{\varepsilon_e} - 1\right)}, \tag{20}$$

де ε_H – ступінь чорноти поверхні газифікатора. Приймаємо $\varepsilon_H = 0{,}3$; ε_e – ступінь чорноти поверхні конструкції КА у місці розташування газифікатора. Приймаємо $\varepsilon_e = 0{,}5$; $\frac{F_H}{F_e}$ – відношення поверхні газифікатора до поверхні оточуючої конструкції КА. Приймаємо $\frac{F_H}{F_{e\imath}} = 0{,}001$.

Тривалість попереднього термостатування газифікатора $t_{p\imath\ h}$ (с) визначатиметься за формулою

$$t_{p\imath\ h} = \frac{E_b + E_o + E_c}{Q_G}, \tag{21}$$

де E_b – енергія, що необхідна для випаровування рідкого ксенону, Дж; E_o – енергія, що необхідна для перегріву парів ксенону, Дж; E_c – енергія, що необхідна для прогріву конструкції газифікатора, Дж.

Потрібні затрати енергії визначатимуться за формулами:

$$E_b = M_X \cdot r\,; \tag{22}$$

$$E_o = M_X \cdot C_p \cdot (T_{X\ 2} - T_{X\ 1})\,; \tag{23}$$

$$E_c = M_c \cdot C_c \cdot (T_w - T_{X\ 1})\,, \tag{24}$$

де M_X , $M_{X\epsilon}$ – маса ксенону, що знаходиться у внутрішній порожнині кожної з ділянок газифікатора, кг; M_c – маса конструкції газифікатора, кг; C_c – питома теплоємність конструкції газифікатора, Дж/(кг·К).

Маса ксенону, що знаходиться у внутрішній порожнині кожної з ділянок газифікатора, визначатиметься за формулами

$$M_X = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_b \cdot \rho_{X\epsilon}\,; \tag{25}$$

$$M_X = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_o \cdot \rho_X\,, \tag{26}$$

де ρ_X , ρ_X – середня густина ксенону для кожної ділянки, кг/м^3.

Середнє значення енергоспоживання газифікатора під час роботи двигуна Q_A (Вт) можна оцінити за наступною формулою

$$Q_A = \frac{\left(Q_H + \dfrac{Q_{rc} \cdot \dot{m}_m}{\eta_H \cdot \dot{m}_T}\right)}{1 + \dfrac{\dot{m}_m}{\dot{m}_T}}, \tag{27}$$

де $\dot{m}_T$ – масова витрата РР на двигун, кг/с.

Використовуючи формули (1) – (27), можна визначити основні параметри газифікатора (необхідна довжини трубки газифікатора, потрібна потужність нагрівача, тривалість термостатування газифікатора в безвитратному режимі, значення середнього енергоспоживання газифікатора під час роботи двигуна), необхідні для розробки його конструкції та впливу на роботу та енергоспоживання ЕРДУ.

Запропонована методика використання газифікатора в ЕРДУ. Коли в балоні відсутня рідка фаза ксенону, газифікатор може бути не задіяний. На рисунку 1 наведено графік фазового стану ксенону, а на рисунку 2 наведено зміщену лінію розподілу фаз з урахуванням похибок датчиків тиску й температури та коефіцієнтом запасу, по якій буде визначатися наявність рідкої фази ксенону в балоні і яка має бути закладена в логіку управління.

Відповідно до вище наведеного, запропонована методика використання газифікатора, що представлена на рисунку 3.

При використанні інших газів (аргон, криптон) у якості робочої речовини, газифікатор може бути виключений зі складу ЕРДУ. У зв’язку з тим, що критична температура аргону і криптону значно нижче за робочі температури ЕРДУ, вони не будуть переходити у рідку фазу. Якщо буде використовуватись суміш цих газів з ксеноном, тоді газифікатор буде необхідний.

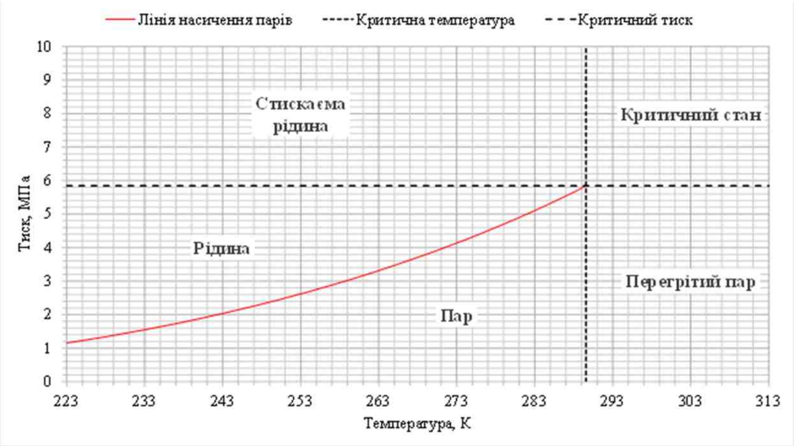


Рис. 1 – Графік газового стану ксенону

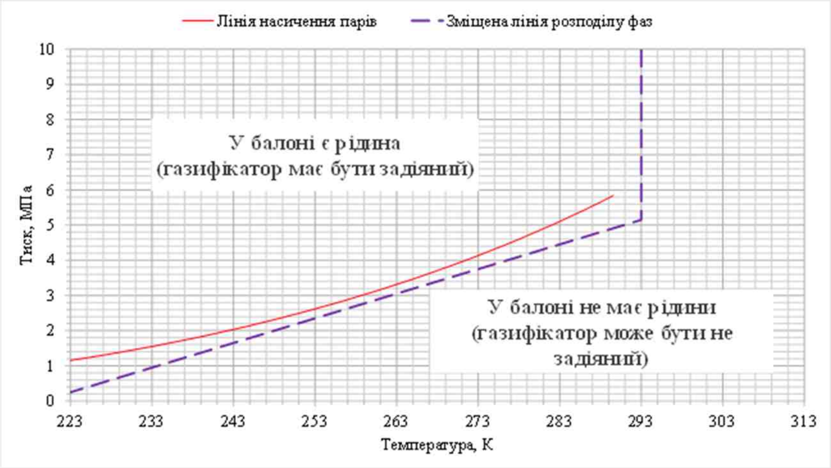
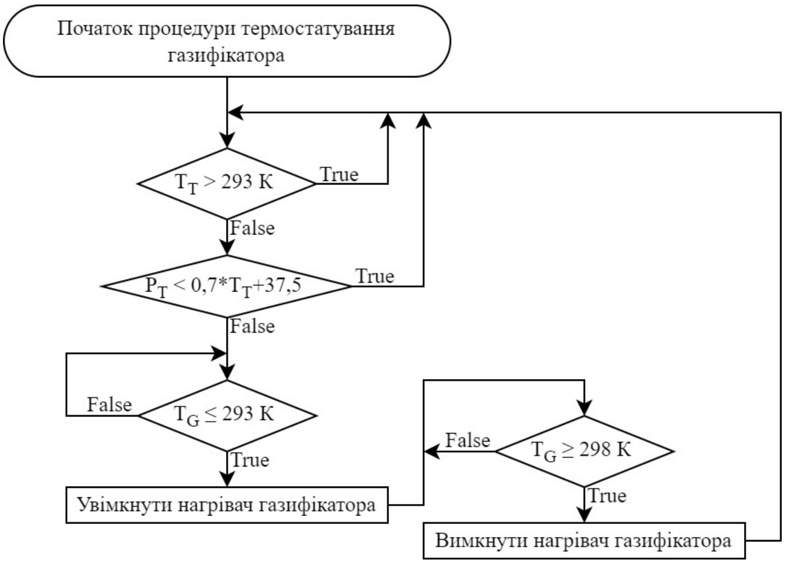


Рис. 2 – Зміщена лінія розподілу фаз ксенону з урахуванням похибок датчиків тиску й температури та коефіцієнтом запасу, яку потрібно закладати у логіку керування



P_T – поточний тиск у балоні (МПа); TG – поточна температура газифікатора (К);
T_T – поточна температура ксенону у балоні (К)

Рис. 3 – Методика роботи газифікатора

Виготовлення і експериментальна перевірка роботи газифікатора. За запропонованою методикою, наведеною вище, було виконано розрахунок газифікатора. Розрахунок проводиться для найгіршого випадку, коли температура ЕРДУ мінімальна. Параметри ксенону на ділянках газифікатора визначаються за даними NIST [8] для відповідних температур на ділянках і тиску у балоні.

За результатами розрахунку, для нагріву з 278 К (задана мінімальна температура ЕРДУ) довжина газифікатора має бути не менше 460 мм, а потужність нагрівача має бути не менше 2 Вт, тоді тривалість попереднього термостатування становитиме ~600 с. У випадку використання загальноприйнятих нагрівачів балону необхідна потужність залежить від розмірів балону та маси робочої речовини в ньому і, зазвичай, становить від 10 Вт до 30 Вт [5]. У якості нагрівача для газифікатора був прийнятий тонкоплівковий нагрівач з потужністю 9,4 Вт (через його наявність у лабораторії). Тому тривалість попереднього термостатування газифікатора становитиме ~140 с.

Середнє енергоспоживання газифікатора під час роботи двигуна становитиме 0,4 Вт.

Температура газифікатора буде підтримуватися в діапазоні від 295 К до 298 К.

Розрахований за запропонованою методикою газифікатор був виготовлений та використаний у системі подачі робочої речовини (рис. 4).

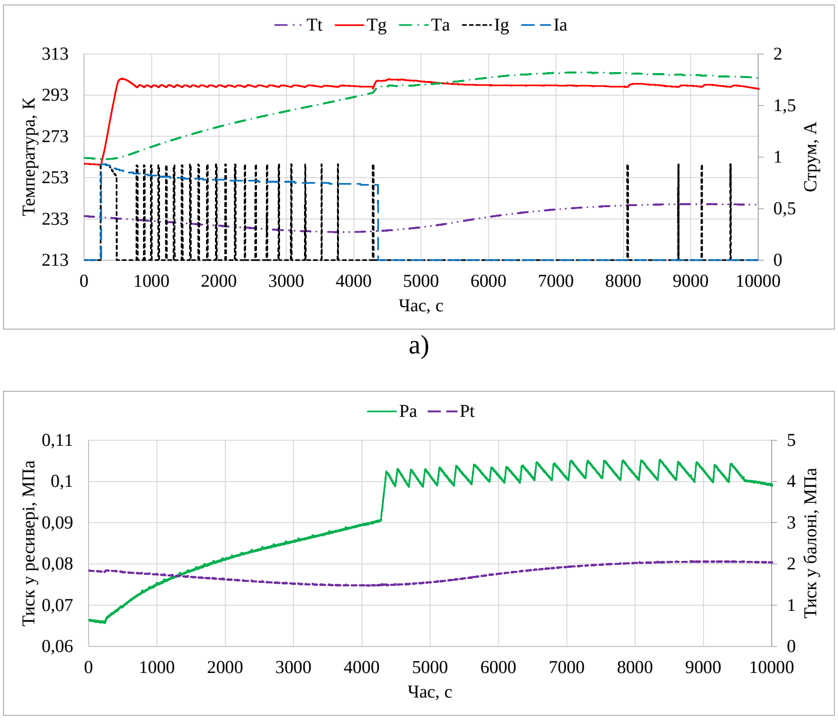
Рис. 4 – Система подачі робочої речовини з розробленим газифікатором

Перевірка відповідності експлуатаційно-технічних характеристик газифікатора у складі системи подачі проводилася у КПІ ім. Ігоря Сікорського. Експериментальний стенд, розташований у КПІ, камера ТВК-2.5 (рис. 5) забезпечує моделювання спільного впливу факторів космічного простору – глибокого вакууму, кріогенних температур, сонячної та земної радіації та високого поглинання теплового випромінювання навколишнім середовищем.

Рис. 5 – Загальний вид експериментального стенду TVK-2.5

Під час випробувань проводилась витримка (3 години) та перевірка працездатності системи при мінімальних та максимальних робочих температурах (з точністю ±0,5К) та 8 термоциклів, під час яких контролювались показники підсистем, масова витрата та перевірялась працездатність газифікатора. Результати продемонстрували успішну роботу газифікатора при мінімальних робочих температурах та стабільність масової витрати РР при зміні температури СПРР.

Результати випробувань приведені на рисунках 6 і 7. Результати випробувань підтвердили ефективність використання газифікатора у складі системи подачі робочої речовини.



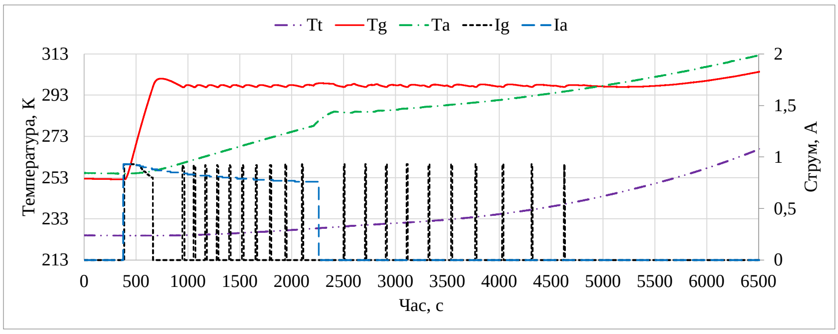
а)

б)

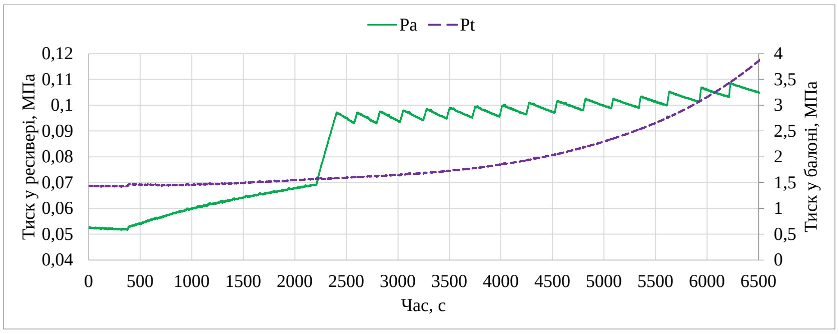
Ia – струм нагрівача ресивера; Ig –струм нагрівача газифікатора; Pa – тиск у ресивері; Pt – тиск у балоні; Ta – температура ресивера; Tg – температура газифікатора; Tt – температура балона

а) Параметри температури і струму; б) Параметри тиску при роботі системи подачі.

Рис. 6 – Результати випробувань газифікатора у складі системи подачі робочої речовини при мінімальній робочій температурі



а)



б)

Ia – струм нагрівача ресивера; Ig –струм нагрівача газифікатора; Pa – тиск у ресивері; Pt – тиск у балоні; Ta – температура ресивера; Tg – температура газифікатора; Tt – температура балона

а) Параметри температури і струму; б) Параметри тиску при роботі системи подачі

Рис. 7 – Результати випробувань газифікатора у складі системи подачі робочої речовини при нагріванні системи імітатором сонячного випромінювання

Висновки. В результаті досліджень було запропоновано методику розрахунку газифікатора, який підтримує температуру робочої речовини, що поступає в ресивер, у необхідному діапазоні і усуває можливе потрапляння рідкої фази ксенону до ресивера системи подачі. Використання запропонованого газифікатора замість нагрівачів балону дозволяє значно (до 15-ти разів) знизити споживчу потужність системи зберігання і подачі робочої речовини. Розрахований за запропонованою методикою газифікатор був успішно протестований, при мінімально допустимих температурах для ЕРДУ, під час термовакуумних випробувань системи подачі, що підтвердило стабільність його характеристик.

1. *Chiasson T. M.* Modeling the Characteristics of Propulsion Systems Providing Less Than 10 N Thrust. 2012. Thesis (S.M.)-Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Aeronautics and Astronautics. URL: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/76096 (дата звернення: 10.08.2023).
2. *Tirila V.-G., Demairé A., Ryan C.-N.* Review of alternative propellants in Hall thrusters. Acta 2. Astronautica. 2023. V. 212. P. 284–306. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.047
3. *Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В.* Инертные газы. Издание. 2. Атомиздат, 1972. 352 с.
4. *Lee E., Lee H., Moon Y., Kang S., Kim Y., Jeong Y., Yoon H., Son M., Amer Mohammad Al Sayegh, Mar Luengo Cerrón.* Development of Robust and Affordable Xenon Feed Unit for Hall Effect Propulsion Systems. Space propulsion, 2018. SP2018_00007. URL: https://www.researchgate.net/publication/325708264_Development_of_Robust_and_Affordable_Xenon_Feed_Unit_for_Hall_Effect_Propulsion_Systems (дата звернення: 11.08.2023).

5. *Soria-Salinas A., Zorzano M.-P., Martín-Torres J., Sánchez-García-Casarrubios J., Pérez-Díaz J.-L., Vakkada-Ramachandran A.* A Xenon Mass Gauging through Heat Transfer Modeling for Electric Propulsion Thrusters. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2007. V. 11, No 1. https://doi.org/10.5281/zenodo.1339694
6. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. Издание второе, стереотип. Москва: «Энергия», 1977. 344 с.
7. *Бухмиров В. В.* Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). Методические указания к выполнению практических и лабораторных работ. URL: https://studfile.net/preview/6812651/ (дата звернення: 11.08.2023).
8. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. URL: https://webbook.nist.gov (дата звернення: 11.08.2023).

Отримано 25.09.2023,
в остаточному варіанті 05.10.2023