

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ НАДУВАННЯ ПАЛИВНИХ БАКІВ РАКЕТНИХ ДВИГУННИХ УСТАНОВОК

*Юрій Мітіков*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-603X>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

*Максим Седченко*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0027-0939>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

*Євген Крупкін*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7344-1061>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

### Вступ

Дослідження відноситься до галузі ракетно-космічної техніки і може бути використане для передпускового наддування (ПН) паливних баків рідинних рушійних установок (РУ) ракет-носіїв (РН). Система ПН призначена для забезпечення потрібного тиску компонентів палива на вході в насоси тільки на етапі запуску РУ за допомогою підняття потрібного тиску газу в баках. Слід зазначити, що проміжок часу, протягом якого необхідно мати зазначений підвищений тиск газу в баках, вимірюється одиницями секунд. Його можна порівняти з часом виходу двигуна на режим.

На теперішній час найбільше поширення для наддування паливних баків сучасних РУ РН на етапах ПН і польотного наддування (основного, ОН) знайшов гелій. Достатньо перелічити РН «Зеніт» (Україна); Antares (США, Україна); Atlas-V, Falcon 9 (США); Electron, Zhuque-2 (Китай) та інші [1]. Гелієві системи наддування (СН) мають ряд позитивних сторін, завдяки яким вони застосовуються вже більше п'ятдесяти років. При цьому вони мають велику масу та недостатню надійність [2]. Слід зазначити, що на МБР США та Радянського Союзу гелій на етапах ПН та ПО ніколи не використовувався. Також він не застосовувався і для роботи агрегатів автоматики.

Системи ПН і ОН входять до складу пневмогідролічних РУ РН. Вони є складними наукомісткими технічними системами і займають важливе місце у складі ракетного комплексу. Наприклад, кінцева маса систем наддування може досягати до 7% кінцевої маси ступеня РН [3]. Більш того, після РРД з допалюванням окисного генераторного газу гелієва ПГС є найдорожчою частиною РН [4].

Зараз у світі інтенсивно ведуться роботи із можливістю заміни гелію в системах ОН [5]. Розглядаються парові, рідинні і твердопаливні генераторні системи, системи з так званим самонаддуванням, з використанням робочих тіл наддування з високою працездатністю. Але наукових праць по знаходженню інших інноваційних способів проведення ПН ніж гелієвих, не відомо. Ситуація виглядає досить дивною – для того щоб ввести в баки на етапі ПН 2-3 кг гелію на борту ракети прокладають кілька десятків кілограмів магістралей з агрегатами автоматика. Ще більше ускладнюється космодром та логістика. Тому в перспективі часткова відмова від гелію тільки в системах ОН, не вирішує проблему в цілому, не спрощує старт, не підвищує надійність ракетного комплексу. У ситуації, що склалася, проглядається якась приреченість.

### **МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ**

У 2023 році з'явилася робота [6], в якій обґрунтовано можливість проведення ПН за допомогою введення у вільні об'єми баків теплової енергії (електричної) зі стартової позиції (без акумулятора на борту РН). Метою цих досліджень є спроба розробки алгоритму попереднього розрахунку системи ПН за допомогою введення теплової енергії в вільні об'єми паливних баків.

### **МЕТОДИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ДОСЛІДЖЕННІ**

В дослідженні використовуються методи термодинаміки, закони реального газу і першого закону термодинаміки стосовно до нестационарних процесів.

### **РЕЗУЛЬТАТИ**

Показана реальність і цілеспрямованість запропонованого метода проведення ПН шляхом вводу в вільний об'єм бака теплової енергії (електронагрів). Вирішення технічної задачі підняття тиску газу у вільному об'ємі бака до потрібного рівня досягається шляхом підвищення середньомасової температури газу в цьому об'ємі. Наприклад, потрібний тиск газу в баку окиснювача першого ступеня РН "Зеніт" становить  $3 \cdot 10^5$  Па. Щоб підняти початковий тиск газу в баку з вихідною  $1 \cdot 10^5$  Па треба збільшити його температуру в три рази. При початковій середньомасової температурі газу в баку 95К її треба збільшити до 285К. Це цілком реально та технічно здійснено. Завдання зводиться до визначення реально потрібного теплового потоку до газу

у вільному об'ємі бака з урахуванням теплових втрат у граничні поверхні. В такому разі теплообмін газу в баку описується законами вільної конвекції. Знання потрібного теплового потоку дозволить визначити масу системи ПН (кабелю) задля реалізації поставленого завдання.

Взявши за основу перший закон термодинаміки з урахуванням рівняння стану ідеального газу, можна отримати у загальному вигляді зміну тиску газу в паливному баку, наприклад, з рідким киснем за формулою:

$$\dot{P} = \frac{\bar{k}-1}{V} \left[ \dot{Q}_{\Sigma} + \frac{k}{k-1} R \cdot T \cdot \dot{m}_{He} + \frac{k_s}{k_s-1} R_s \cdot T_s \cdot \dot{m}_s - \frac{\bar{k}}{k-1} P\dot{V} + \frac{\dot{k} \cdot p \cdot V}{(\bar{k}-1)^2} \right]. \quad (1)$$

Розглянемо окремо кожен складову цієї формули:

$V$  – початковий вільний об'єм газу в баку;

$R$  – газова стала газу у початковому вільному об'ємі баку;

$\dot{V} = 0$ , т.к. витрата палива з баку на етапі ПН відсутня і сам компонент при тиску ПН можна вважати нестисливим;

$\bar{k}$  – показник адиабати газу у початковому вільному об'ємі баку, незмінний;

$\dot{m}_{He}$  – в нашому випадку секундна витрата гелію до баку дорівнює нулю;

$\dot{m}_s$  – секундний прихід парів кисню в вільний об'єм бака за рахунок випаровування, в силу слабкості можна знехтувати і прийняти рівним нулю;

$\dot{Q}_{\Sigma} = \dot{Q}_{ел} - (\dot{Q}_ж + \dot{Q}_w)$  – сумарний тепловий потік до газу і від газу в граничні поверхні в баку;

$\dot{Q}_{ел}$  – тепловий потік газу від підведеної електричної енергії;

$\dot{Q}_ж$  – тепловий потік від газу надування до компоненту палива;

$\dot{Q}_w$  – тепловий потік від газу надування до стінок баку.

Теплові потоки до стінок баку і вільної поверхні палива в баку до газу надування можна визначати з відомих апробованих залежностей С.Кутателадзе для тепловіддачі при природній конвекції в паливних баках  $Nu = f(Gr, Pr)$  [7].

При підводі тепла температура газу в баку за часом зростає згідно із рівнянням стану ідеального газу:

$$T = (P + \dot{P})V / (R\Sigma m_{\Sigma}) \quad (2)$$

де  $m_{\Sigma}$  – маса газу в вільному об'ємі баку (приймаємо постійною).

При досягненні тиском газу в баку потрібної величини підведення електроенергії у вільний об'єм баків припиняють. Особливо слід зазначити, що в баках з киплячим киснем перших ступенів РН, наприклад, РН "Зеніт", потрібний тиск газу в баку перші 80% часу польоту знаходиться на рівні тиску насиченої пари кисню, тобто, не нижче

$\sim 1 \cdot 10^5$  Па. У цьому випадку ні яка система ОН не потрібна, а на декількох пусках РН електричне нагрівання газу має виконувати виключно поліцейські функції.

Провівши попередні розрахунки для РН типу «Зеніт» можна констатувати про зменшення маси системи ПН з електронагрівачем приблизно в два рази на відміну від гелієвого ПН зі старту. Для ще більшого покращення вагових характеристик розглянутої системи можна на початку руху РН залишити кабель на стартовій позиції (відстрелити).

## **НАУКОВА НОВИЗНА**

Визначено процеси, що відбуваються у вільних обсягах баків при реалізації нового способу ПН – введення теплового потоку (електронагрів зі стартової позиції). Це вільноконвективні теплові процеси між газом у баку та граничними поверхнями. Запропоновано залежність для оціночних розрахунків розглянутої системи.

## **ВИСНОВКИ**

Показано реальність і в деяких випадках доцільність запропонованого методу проведення ПН шляхом введення у вільний об'єм баку теплової енергії (електронагрів). Вирішення технічної задачі підняття тиску газу у вільному об'ємі бака до потрібного рівня досягається шляхом підвищення середньомасової температури газу в цьому об'ємі. Наприклад, потрібний тиск газу в баку окиснювача першого ступеня РН "Зеніт" становить  $3 \cdot 10^5$  Па. Щоб підняти початковий тиск газу в баку з вихідною  $1 \cdot 10^5$  Па треба збільшити його температуру в три рази. Це цілком реально та технічно здійснено. Завдання зводиться до визначення реально потрібного теплового потоку до газу у вільному об'ємі бака з урахуванням теплових втрат у граничні поверхні.

Аналіз попередніх розрахунків для РН типу «Зеніт» свідчить про зменшення маси системи ПН з електронагрівачем приблизно в два рази на відміну від гелієвого ПН зі старту. Для ще більшого покращення вагових характеристик розглянутої системи можна на початку руху РН залишити кабель на стартовій позиції (відстрелити).

Особливо слід зазначити, що в баках з киплячим киснем перших ступенів РН, наприклад, РН "Зеніт", потрібний тиск газу в баку перші 80% часу польоту знаходиться на рівні тиску насиченої пари кисню, тобто, не нижче  $\sim 1 \cdot 10^5$  Па. У цьому випадку ні яка система ОН не потрібна, а на декількох пусках РН електричне нагрівання газу має виконувати виключно поліцейські функції.

## ПОСИЛАННЯ

1. Dreus, A., Yemets, V., Dron, M., Malaychuk, V., & Dubovik, L. (2023). Передумови створення надлегких ракет-носіїв з полімерними корпусами. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки, 32(1), 25-40. <https://doi.org/10.15421/472303>

2. Мітіков, Ю., & Седченко, М. (2023). Критичний аналіз гелієвих газобалонних систем наддування паливних баків ракетних двигунів. Виклики та проблеми сучасної науки, 1, 117-125. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/23>

3. Беляев, Н. М. (1976). Системы наддува топливных баков ракет. М.: Машиностроение.

4. Дегтярев, А. В., Кушнарєв, А. П., Попов, Д. А., Полуян, Н. В., Аксененко, А. В., & Баранов, Е. Ю. (2014). Ракета космического назначения сверхмалого класса. Космическая техника. Ракетное вооружение, (1), 14-20.

5. Мітіков, Ю. А., & Татарінов, К. А. (2017). Аналіз шляхів удосконалення систем наддуву паливних баків двигунних установок ракет-носіїв. Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка, (25, вип. 20), 50-56.

6. Спосіб наддування паливного бака рідинної рушійної установки ракети-носія (Патент України № а202304842). (2023). ДНУ ім. Олесь Гончара.

7. Naoumov, V. I., Krioukov, V. G., Abdullin, A. L., & Demin, A. V. (2019). Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications. Cambridge University Press.