

УДК 621.642.1

Ю.О. Мітіков, М.В. Поляков

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ПРОЕКТУВАННЮ ГАЗОВОДІВ БАКІВ ВЕЛИКОГО ПОДОВЖЕННЯ РАКЕТ-НОСІІВ

*Розглянута фізична картина розповсюдження у баку великого подовження струменю гарячого газу наддування і взаємодії його із поверхнею палива. Сформульовані рекомендації що до проектування багаторежимних газоводів, виявлена їх ефективність.*

**Ключові слова:** баки великого подовження, оптимізація швидкості вводу газу, багаторежимні газоводи.

### Вступ

Сьогодні у зв'язку зі збільшенням конкуренції на світовому ринку надання пускових послуг все більше значення набувають дослідження, спрямовані на підвищення ефективності систем ракет-носіїв (РН), на зниження вартості запуску 1 кг корисного навантаження на опорну орбіту. Системи наддування (СН) паливних баків двигунних установок (ДУ), як відомо, призначені для забезпечення безкавітаційної роботи насосів ДУ, забірною пристрою та забезпечення міцнісних характеристик баків. Також вони впливають на ефективність і надійність всього ракетно-космічного комплексу. Функціонування СН тісно пов'язано з ДУ, системою управління, стартовим комплексом, при цьому маса СН може досягати до 7% кінцевої ваги ступеня [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спираються автори.** На даний час для наддування алюмінієвих циліндричних паливних баків (найбільш поширені матеріал і їх форма) перших ступенів РН широко використовується гаряче наддування (газ з температурою на вході в паливний бак вище температури палива більш ніж на  $200^{\circ}\text{C}$ ). Саме таким чином наддуваються баки РН «Зеніт», «Циклон», «Аріан-5», паливні баки практично всіх російських, американських, японських, корейських і китайських РН. У вітчизняній практиці вже більш 30 років успішно реалізовано і високотемпературне генераторне наддування (газ з температурою на  $\sim 850^{\circ}\text{C}$  вище температури палива, наприклад, на РН «Дніпро»). Саме таке наддування ще й дозволяє, як це не парадоксально, зменшити в порівнянні з гарячим наддуванням генераторним газом, прогрівання поверхневого шару палива за рахунок більшої «сухості» газу (менший відсоток парів, як наслідок менша кількість теплоти виділиться при їх конденсації у баку на дзеркалі палива) [2].

При проектуванні гарячих і високотемпературних СН «розпечену» хмару газу наддування розробники прагнуть розмістити всередині бака, «відсунувши» її подальше від товстостінного алюмінієво-

го верхнього днища, на якому встановлено запобіжний клапан (він, найчастіше, працює в другій половині польоту). Для цього існує практично тільки один шлях – вводити гарячий газ в бак з певною швидкістю уздовж його повздовжньої осі. Але, при цьому, треба мати на увазі, що трапляється, в порівнянні з холодним наддуванням, деяке ускладнення пневмогідролічної схеми системи живлення ДУ (особливо для газобалонних СН з теплообмінником ДУ) та умов їй наземного відпрацювання та технологічних перевірок [1].

Відомі численні експериментальні данні [3], що свідчать про наявність оптимуму швидкості введення гарячого газу наддування в вільні об'єми паливних баків невеликого подовження ( $H/D = 0,8 \div 1,0$ ). При цьому вказується, що оптимальна швидкість забезпечує максимальний тиск газу у баку на момент вимкнення ДУ і економію газу наддування до 30%. Саме цей момент часу, як правило, є визначним, найбільш важким для забезпечення необхідного значення тиску палива на вході в ДУ, що працює на режимі дроселювання (через зменшення вклату вже незначного стовпа рідини  $\rho g h_{n,}$ ).

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячена дана стаття.** Також відомі експериментальні данні [4] для паливних баків великого подовження ( $H/D \geq 4,5$ ), притаманного першим ступеням РН, які в свою чергу свідчать, що в діапазоні швидкостей введення гарячого газу наддування (гелій, кисень) у баку  $w = 5 \div 450$  м/с оптимуму швидкості не зафіксовано, маючи на увазі кінцевий тиск газу у баку. При цьому, ні яких роз'яснень та практичних і корисних висновків таким суперечливим, на перший погляд, даним не існує.

**Метою даної роботи** є збільшення ефективності роботи гарячих СН паливних баків великого подовження РН шляхом оптимізації умов вводу газу наддування до вільних об'ємів баків.

Великий обсяг експериментальних досліджень, проведений на теперішній час на різноманітних штатних і зменшених моделях паливних

баків з різними газами наддування, на самих різних компонентах палива, свідчить про те, що, доцільно реалізовувати рівномірний профіль температури газу по висоті бака. Це знижує теплові втрати в граничні поверхні, виключає перегрів верхнього днища й запобіжного клапану. У цьому випадку реалізується найбільший тиск газу у вільному об'ємі баку на момент вимикання ДУ.

В той же час встановлено, що для баків великого подовження (більше чотирьох) в умовах, типових для перших ступенів РН, ні при якій швидкості вводу струменя неізотермічного газу (наприклад, гелію) в бак, він не може навіть теоретично розповсюдитися більш ніж на 2-3 калібри бака [4] (мова не йдеться про надзвукові швидкості). А в натурних умовах, з урахуванням повздовжнього перевантаження (дія сили Архімеда на гарячий струмінь збільшується), зона розповсюдження струменя неізотермічного газу зменшується ще більше [5].

### Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянемо процеси, які відбуваються у баку при наддуванні його струменем гарячого газу, який вводять вздовж повздовжньої осі. Як відомо, початкові газові обсяги в паливних баках сучасних ДУ на момент запуску двигунів становлять до 0,5% від їх загального обсягу. Тому не дивно, що зріз вільного пристрою газу наддування в бак знаходиться в безпосередній близькості від начального рівня палива.

У початковий момент роботи ДУ при введенні в бак газу з помітною швидкістю динамічний напір струменя при зустрічі з дзеркалом значний. Він, як правило, перевищує другий критичний [5]. У цьому випадку струмінь досить глибоко проникає вглиб палива і дробиться на малі численні бульбашки. Реалізується так званий третій режим взаємодії струменя з рідкою фазою. Якщо газ наддування асимільований (розчиняється в паливі, пар, наприклад), то він конденсується і збільшує прогрів палива. Це, звичайно, призводить до помітного падіння тиску газу в баку на початку роботи СН через зменшення кількості робочого тіла. Навіть при наддуванні гарячим гелієм це падіння тиску має місце (струмінь гелію засмоктує за рахунок ежекції пари палива, які конденсуються, зменшують кількість робочого тіла у вільному об'ємі бака), хоча це не так явно виражено. По мірі зменшення рівня палива динамічний напір по осі струменя падає, і реалізується так званий другий режим взаємодії – режим каверни з гострою кромкою, коли відображений від дна каверни струмінь повертається в бак під гострим кутом до вільної поверхні палива. У цьому випадку, теплообмін газу наддування з

пульсуючої поверхнею каверни також істотний, і він визначається дією не прямого струменя, а зворотного.

Надалі, динамічний напір струменя на рівні поверхні палива, що безперервно опускається, зменшується, і струмінь газу вже не в змозі деформувати паливо. Струмінь, досягаючи поверхні дзеркала палива, вільно розтікається по ньому. Теплові втрати вже не так помітні, але ще існують. І, в кінцевому підсумку, струмінь перестає досягати дзеркала палива, теплові втрати в паливо зменшуються до мінімуму. З цього моменту часу помітно зростає температура перемішаного об'єму газу в баку, в тому числі, і у верхнього днища. Зростають втрати в конструкцію бака. По мірі зростання температури середовища, крізь яке поширюється струмінь, зменшується виштовхуюча сила на менш щільний струмінь газу. Це призводить до послідовного деякого збільшення його далекобійності.

Таким чином, аналіз наведеної фізичної картини взаємодії гарячого струменя із поверхнею палива і законів поширення струменя із урахуванням його стиснення, дозволяє зробити наступні важливі далекосяжні висновки для гарячих СН баків великого подовження.

По-перше, найбільш прийнятним режимом взаємодії гарячого струменя газу наддування із поверхнею палива з міркувань мінімальних теплових і масових збитків є такий режим, коли струмінь ледве не штовхається дзеркала палива. Але отут виникає питання: яким чином це конструктивно забезпечити на весь час роботи ДУ? Адже для однорежимного газопроводу такий режим існує декілька секунд.

По-друге, прагнення розробника СН вводити гарячий газ наддування з помітною швидкістю уздовж повздовжньої осі баку для отримання максимального тиску газу в баці в кінці її роботи, з однієї сторони, взагалі обмежено не більш як ~2 калібрами баку. З іншого боку, помітна осьова швидкість вводу гарячого робочого тіла приводить до значного провалу тиску газу в баці в початковий момент роботи ДУ. До теперішнього часу відомо ряд конструкцій двохранжимних і багаторежимних газопроводів (наскільки нам відомо, жоден з них у практику ракетобудування не запроваджено). Однак, як показують отримані висновки, всі вони можуть тільки пом'якшити провал тиску газу в баку в початковий момент роботи СН, і зменшити прогрівання верхнього днища бака, але ніяк не забезпечити реальні оптимальні умови тепло-масобміну газу наддування у баку протягом всієї роботи ДУ.

По-третє, ні яким зростанням швидкості введення газу наддування через газопвід, вихідний перетин якого залишається на постійному місці у

верхнього днища бака, оптимізації параметрів СН баків великого подовження не добитися.

По-четверте, оптимізувати швидкість вводу гарячого газу доцільно послідовно крок за кроком (найпростіше – дискретно) в діапазоні відстані від ввідного перетину газопроводу до рівня палива, де вона експериментально зафіксовано, а саме в межах,  $0,8 \div 1,2$  калібру бака.

Саме останні висновки дозволяють сформулювати фундаментальні рекомендації для конструювання газопроводів баків великого подовження, притаманних для перших ступенів РН. Пропонована схема багаторежимного наддування, яка оптимізує теплову картину в баку, наведена на рис. 1.

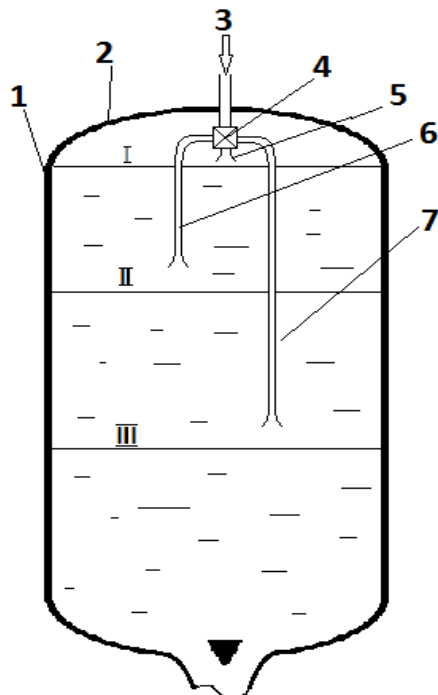


Рис. 1. Схема багаторежимного наддування:  
1 – паливний бак; 2 – верхнє днище;  
3 – вхід гарячого газу наддування;  
4 – клапан-перемикач;  
5, 6, 7 – перший, другий та третій входи газу;  
I, II, III – рівні палива на моменти часу  
переключення пристрою

Реалізація пропонованої схеми вводу гарячого газу наддування в паливні баки, наприклад, баку з киснем I ступеня для двохступеневої РН «Зеніт», може збільшити вагу корисного вантажу до 45 кг.

При запуску ДУ (початковий рівень палива I) гарячий газ наддування через магістраль 3 і клапан-перемикач 4 потрапляє до вільного об'єму бака 1 через вхід 5. Газ наддування потрапляє в вільний об'єм баку з оптимальною швидкістю на ділянці від рівня палива I до рівня палива II (приблизно 1 калібр бака). При опусканні рівня палива до рівня II, клапан-перемикач весь газ наддування вводить в бак через вхід 6 з оптимальною швидкістю на ділянці

від рівня палива II до рівня III і так далі.

Частково покращити параметри СН шляхом деякого збільшення далькостійності було запропоновано найпростішим пристроєм вводу газу наддування в баки [7], що дозволяє при інших рівних умовах збільшити далькостійність струменя (зону перемішування газу) в корінь із двох раз. У ньому використано властивість газового струменя розповсюджуватися далі при настиланні на плоску поверхню через зменшення ежектованого в струмінь газу навколишнього середовища. Пристрій являє собою простіший осьовий циліндричний газовід, до вихідного перетину котрого прикріплена тонкостінна плоска пластина, зафіксована в баку за допомогою розтяжок.

Однак ця конструкція газопроводу має і недолік – пластина, прикріплена безпосередньо до вихідного перерізу, повільніше гасить швидкість гарячого струменя, ніж у випадку поширення вільного струменя при інших рівних умовах. Це призводить до більшого динамічного напору в початковий момент роботи ДУ, і як слід – більше падіння тиску газу в баку в цей початковий момент роботи системи наддування, що в ряді випадків критично і неприпустимо. Для вирішення вказаних вище протиріччя нами [8] запропоновано розташувати пластину 6 з розтяжками 5 під рівнем палива 3 з розрахунку її появи на поверхні палива після зникнення провалу тиску газу у баку 1, який властивий третьому режиму взаємодії струменя з паливом (рис. 2).

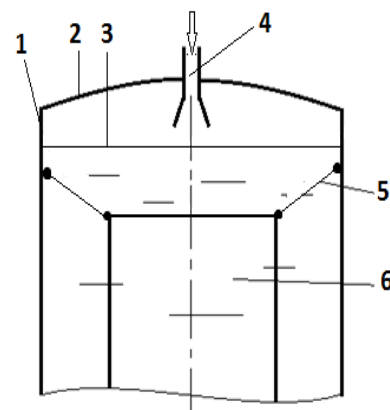


Рис. 2. Схема однорежимного газопроводу:  
1 – паливний бак; 2 – верхнє днище;  
3 – початковий рівень палива;  
4 – вхід гарячого газу наддування;  
5 – розтяжки; 6 – пластина

У радіальному напрямку пластина повинна бути зміщена від осі струменя на величину його радіуса в момент виходу пластини з палива.

Таким чином, використання запропонованого пристрою не призведе до підсилення падіння тиску газу в баку в початковий момент роботи системи наддування, в той же час підвищує далькостійність струменя (там, де це необхідно), що благотворно

впливає на параметри системи наддування (тиск газу, температура біля верхнього днища).

Одержані висновки що до проектування багаторежимних газоводів та помітний економічний ефект (збільшення корисної ваги) варті проведення модельних експериментальних випробувань.

### Висновки з даного дослідження

Проведений аналіз фізичної картини взаємодії гарячого струменя газу наддування з поверхнею компоненту палива в баках великого подовження, притаманного для перших ступенів ракет-носіїв, свідчить, що при використанні однорежимних і багаторежимних пристроїв вводу, що направляють газ вздовж поздовжньої осі бака, провести оптимізацію параметрів СН за рахунок швидкості вводу газу наддування неможливо. Можна тільки пом'якшити провал тиску газу в баці в початковий момент роботи СН і не перегріти його верхнє днище. Треба особливо підкреслити, що сформульований висновок отриманий за умови розміщення різних вихідних перерізів газоводів на одній висоті. Оптимізувати швидкість вводу гарячого газу доцільно послідовно крок за кроком (найпростіше – дискретно) в діапазоні відстані від ввідного перетину газовода до рівня палива, де вона експериментально зафіксовано, а саме в межах,  $0,8 \div 1,2$  калібру бака. Запропоновано послідовно зміщувати вихідні перетини багаторежимних газоводів під час роботи ДУ до дзеркала палива.

Також запропоновано найпростіший однорежимний пристрій введення гарячого газу в бак, що дозволяє збільшити фактичну далекобійність струменя газу в баку, при цьому, не збільшуючи провал тиску в баку в початковий момент роботи ДУ.

Одержані висновки що до проектування багаторежимних газоводів та помітний економічний ефект (збільшення корисної ваги) варті проведення модельних експериментальних випробувань.

### Список літератури

1. Беляев Н.М. Системы наддува топливных баков ракет. – М.: Машиностроение, 1976. – 335 с.
2. Митиков Ю.А. Газобаллонные системы наддува и ракеты-носители нового поколения // Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. – 2012. – Вып.1 – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 179-185.
3. Козлов А.А. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок / А.А. Козлов, В.Н. Новиков, Е.В. Соловьев. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
4. Митиков Ю.А. Определение коэффициентов стеснения для неизотермических турбулентных струй / Ю.А. Митиков, С.А. Куда // Сб. АН УССР. Ин-т техн. механики: Проектирование сложных технических систем. – К.: Наук. думка, 1989. – С. 153-155.
5. Митиков Ю.А. Расчёт параметров газовой струи в замкнутом объёме. – В кн.: Рабочие процессы в двигателях. Тем. сб. науч. трудов МАИ. / Ю.А. Митиков, В.А. Мосейко. – 1980. – С. 51-52.
6. Митиков Ю.А., Пронь Л.В. К вопросу определения диаметра кратера при взаимодействии струи газа с жидкой фазой. Известия вузов // Чёрная металлургия. 1981. – № 3. – С.45-47.
7. А.С. №148930. Устройство для наддува топливного бака. / Авт. изобр. Ю.А. Митиков, Л.А. Осташев, В.А. Мосейко Заявл. 23.11.79 №2267719/23; МКП В64 D37/24.
8. Заявка на патент № 201207527, Україна, МКП В64D 37/24. Пристрій для наддування паливного бака/ Авт. изобр. Мітіков Ю.О., Поляков М.В.; ДНУ ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, 2012.

Надійшла до редколегії 20.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.В. Січовий, Дніпропетровський національний університет ім. Олесья Гончара, Дніпропетровськ.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ГАЗОВОДОВ БАКОВ БОЛЬШОГО УДЛИНЕНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Ю.А. Митиков, М.В. Поляков

*Рассмотрена физическая картина распространения в баках большого удлинения струи горячего газа наддува и взаимодействия её с поверхностью топлива. Сформулированы рекомендации по проектированию многорежимных газоводов, приведена простейшая конструкция, показана их эффективность.*

**Ключевые слова:** баки большого удлинения, оптимизация скорости вводу газа, многорежимные газоводы.

### SOME RECOMMENDATIONS FOR DESIGNING A GAS INFED FOR A BIG ELONGATION TANK LAUNCH VEHICLES

Y.A. Mitikov, M.V. Polykov

*A physical model of the spreading of the elongated hot jet pressurant gases and its interaction with the surface of the fuel in the tank is reviewed. Some recommendations for designing many-mode devices been made, a simple construction is given with its efficiency.*

**Keywords:** tanks of the large lengthening, optimization of speed to the input of gas, multimode gas-lead-in.