

УДК 621.45.03

Ю. О. МІТІКОВ, І. Д. ДУБРОВСЬКИЙ*Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Україна***СИСТЕМА НАДДУВАННЯ БАКА ПАРАМИ КИСНЮ З ОЧИЩЕННЯМ
ВІД ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ**

Розглянуто ризики застосування колись найпоширенішої системи наддування бака з рідким киснем його гарячими парами (Фау-2, Saturn-V, 11К63, Р-9А). Наявність мізерної кількості конденсованої фази (вода, вуглекислота) в рідкому кисні (після бустерного насосу) в схемах двигунів з допалюванням окислювального генераторного газу викликає побоювання у проєктантів систем наддування баків. Досліджено можливі конструктивно прості шляхи очищення окислювального генераторного газу і рідкого кисню від конденсованої фази. Наведено їх дизайн. Показано ефективність парових систем на прикладі баку з киснем носія середнього класу.

Ключові слова: бак з киснем, наддування парами, генераторний газ, конденсат, очищення парів.

Вступ

Чому ж автономні системи наддування (СН) з використанням основних компонентів палива зараз не застосовуються на космічних ракетах-носіях (РН)? На нашу думку причин тут декілька. Перша – сучасні американські і європейські проєктанти систем живлення рушійних установок (РУ) не мають великого позитивного українського досвіду проєктування конструктивно простих, але наукоємних, достатньо складних у відпрацюванні СН паливних баків ряду рідинних МБР. В свою чергу КБ «Південне» з початку проєктування РН «Зеніт» було приречено на використання гелію згідно з постановою Уряду про взаємозв'язок РН "Зеніт" і РН "Енергія". У ГКНПЦ ім. Хрунічева (РФ) взагалі РН «Ангара» фактично стала першою розробкою носія на криогенному паливі.

Одна з причин (вона ж, мабуть, і основна) полягає в тому, що звичний для ракетників окислювальний генераторний газ при освоєних в СН температурах містить до 5% конденсованої фази (H₂O і CO₂) [1]. Наприклад, для умов бака окислювача І ступені РН «Зеніт» теоретично в бак може попасти близько 20 кг льоду на стінки, внутрішньобакові пристрої та дзеркало кисню. Наддування ж киснем, який випарувався в теплообміннику (ТО) (як на Фау-2, Saturn-V, 63С1, Р-9А), не вирішує повністю дану проблему – привід бустера окислювача на сучасних двигунах працює на тому ж окисному генераторному газі, який після його турбіни скидається в видаткову магістраль. В даному випадку в бак може попасти суттєво менша кількість конденсату ≤ 250 г водяної пари і вуглекислоти. Також слід зауважити, що ніякої

шкоди для систем двигунів (наприклад, для діючих двигунів РД-171М, РД-180, РД-191) ця конденсована фаза в LOX не робила і не робить. Випробування рідинних ракетних двигунів (РРД) проводять з багаторазовим запасом по масі твердої фази.

Мета досліджень

Метою проведених досліджень є підвищення ефективності СН бака окислювача шляхом розробки та впровадження автономної СН гарячими парами кисню. Компоненти палива – рідкий кисень (LOX) і РГ-1. Методом вирішення поставленої задачі є аналіз фізичних умов, при яких відбувається конденсація H₂O і CO₂ в баках, знаходження режимів, що виключають або суттєво знижують їх конденсацію на поверхнях бака і, в першу чергу, на дзеркалі окислювача.

Виклад основного матеріалу дослідження

Найбільш небезпечною для роботи різного роду внутрішньобакових пристроїв в баку з киснем є конденсація води і її замерзання. Тверда фаза в паливному баку небезпечна в силу чисто механічних перешкод (теоретична можливість утворення твердої фази небажаних розмірів) для роботи поплавкових пристроїв, забірних пристроїв, фільтра на вході в регулятори, в двигун та інші.

Двоокис вуглецю замерзає при –78⁰С. Як відомо, температура замерзання води суттєво вища за двоокис вуглецю. Тому, якщо ми уникаємо випадіння в бак твердої фази води, то випадіння твердої фази двоокису вуглецю виключається автоматично.

Відомо, конденсація може бути об'ємною та поверхневою [3]. Розглянемо першу з них. Для виникнення об'ємної конденсації водяної пари вона повинна бути перенасиченою. Тому для виключення зазначеної конденсації необхідно максимально швидко піднімати температуру газу у вільному обсязі бака і по можливості забезпечувати його мінімально можливий тиск (витрат на наддування – потенційна кількість можливого конденсату) [4]. Також слід зазначити наступне. При наявності домішок умови для конденсації конкретної складової суміші газів істотно погіршуються. А в нашому випадку домішки становлять 95%. Причому, треба мати на увазі, що в початковий момент роботи польотної СН парціальний тиск пари води в баку дорівнює нулю. Це забезпечує деякий невеличкий проміжок часу без умов для об'ємної конденсації.

Поставлену задачу нами запропоновано вирішувати наступним чином [4]. На етапі передпускового наддування в вільний об'єм бака вводять робоче тіло наддування (РТН) із температурою суттєво вищою за температуру кисню. Такий прийом призводить до збільшення потенційно можливої кількості пари води у вільному об'ємі бака при подальшому наддуванні. Іншими словами, ми наближаємо парціальний тиск парів кисню у вільному обсязі бака до тиску його насичених парів при середньомасовій температурі в тому ж вільному обсязі $p_{O_2}(\bar{T}_{г6}) \rightarrow p_s(\bar{T}_{г6})$.

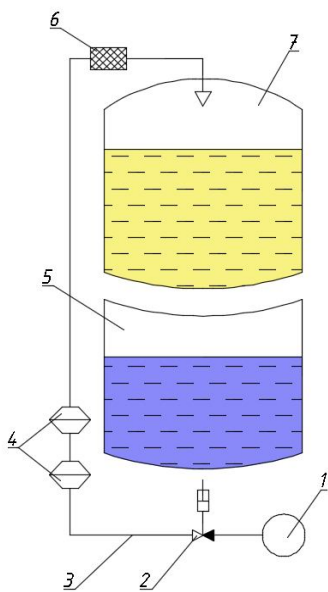


Рис. 1. Принципова схема очищення окислювального генераторного газу

На етапі польотного наддування окисним генераторним газом після турбіни з моменту запуску РУ треба зменшувати витрати води і двоокису вуглецю в складі РТН, наприклад, за допомогою силікагелю (рис.1). Один з варіантів роботи системи наступний. З газогенератора 1 через клапан 2 відбираємо потрібні витрати продуктів згоряння. Далі вони по магістралі наддування 3 з температурними компенсаторами 4 уздовж бака пального 5 потрапляють в корпус з силікагелем 6 і після очищення вводяться в вільний обсяг бака окислювача 7. При цьому час зменшення витрат конденсату в складі РТН повинен бути не менш часу, при якому середньомасова температура газу в баку забезпечить перевищення тиском насиченої пари води її парціального тиску. Також в цей проміжок часу треба забезпечувати швидкістю і напрямком введення РТН непопадання його струменем на вільну поверхню кисню в баку.

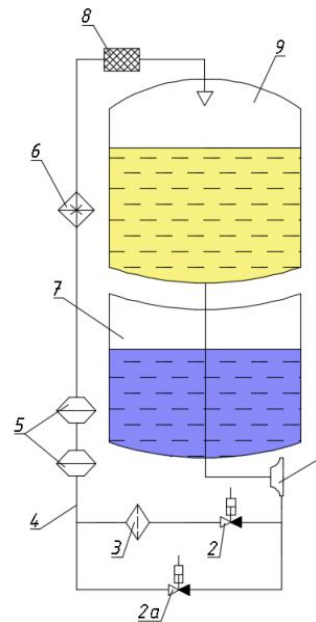


Рис. 2. Принципова схема очищення LOX для наддуву бака окислювача

При використанні в якості РТН рідкого кисню, нами запропоновано зменшувати витрати потенційного конденсату в складі РТН у два етапи. На першому етапі після насоса високого тиску до входу в теплообмінник (ТО) його механічно фільтрують [4], на другому етапі, після ТО, очищують пари кисню за допомогою силікагелю. Працює запропонована система наступним чином (рис.2). Потрібні витрати кисню для наддування після насоса 1 за допомогою клапана 2 через фільтр 3 надходять в магістраль 4 з температурними компенсаторами 5. В ТО 6 кисень випаровується і

вздовж бака пального 7 через пристрій з силікагелем 8 вводиться в вільний об'єм бака окислювача 9. Після того як $p_{O_2}(\bar{T}_{г6}) \leq p_s(\bar{T}_{г6})$, потреби в фільтруванні відпадають. Клапан 2 зачиняють, а клапан 2а відчиняють до кінця роботи РУ.

Наведемо приклад. Для наддування бака окислювача I ступеня РН "Зеніт" необхідно ~ 3 кг/с генераторного газу з температурою на вході в бак (після прогріву гарячої магістралі наддування) на рівні 250°C . У цьому газі 5% потенційного конденсату. Для надійності будемо вважати, що це тільки пари води. За 25 с роботи польотного наддування в бак може потрапити 3,75 кг води. Розрахунки внутрішньооб'ємових процесів за методиками [5] при початковій температурі газу у вільному об'ємі бака -50°C і його об'ємі 5 м^3 з секундною витратою кисню з бака $1,9 \text{ м}^3/\text{с}$ показують, що середньомасова температура газу в баку на 25 с буде не нижче $+40^\circ\text{C}$. При цій температурі тиск насичення води становить $0,0738 \text{ кг}/\text{см}^2$ [6], а парціальний тиск пари води в кількості 3,75 кг становить $0,0654 \text{ кг}/\text{см}^2$. Таким чином, умов для конденсації водяної пари в вільному об'ємі бака при використанні окисного генераторного газу після турбіни немає. Ще краще ситуація реалізується при використанні для наддування рідкого кисню після насоса зі слідами водяного льоду. У цьому випадку при наявності гарячого передпускового наддування два етапи очищення кисню від домішок служать тільки задля 100% надійності.

Для забезпечення швидкого випаровування і нагрівання парів кисню доцільно перед самим стартом РН розігріти ТО і тракт наддування до допустимих по міцності температур [7]. Для досягнення максимально допустимої температури парів кисню на вході в бак є сенс використовувати в якості теплоносія високотемпературний ТППГ [8]. Після ТО відновлювальний ГГ доцільно використовувати для наддування бака пального чи приводу турбіни бустера по лінії пального [9].

Термін фільтрації (маса уловлених парів води) визначає розмір фільтра (наприклад, конічної форми) і масу силікагелю.

Чим менше час фільтрації, тим менша маса фільтруючих елементів. Для зменшення часу фільтрації (~ 25 с) треба підвищувати температуру парів кисню, наприклад, шляхом збільшення температури теплоносія. Такі технічні рішення вже відомі [8].

Для виключення поверхневої конденсації досить щоб струмінь газу наддування не попадав на вільну поверхню LOX [9]. Це питання технічно вирішується за допомогою пристроїв з плаваючим відбивачем (рис.3), радіальних газоводів або

дворежимних [10]. Також необхідного ефекту можна досягти відповідним підбором швидкості введення РТН у вільний об'єм бака [11]. Радикально вирішується проблема при введенні РТН у вигляді турбулентних вихрових кілець [12].

Висновки

Для бака з РГ-1 відомі ефективні безгелеві СН. Тому перехід на парову СН для бака з киснем відкриває перспективу відмови від гелію в руховій установці. Також, перехід з гелієвої СН на парову крім значного спрощення конструкції РН і стартового комплексу дозволяє знизити повну масу СН з урахуванням використання під паливо звільненого від балонів об'єму бака окислювача. Наприклад, для бака окислювача I ступеня РН "Зеніт", цей перехід дозволить збільшити масу корисного навантаження на не менше як 80 кг [8].

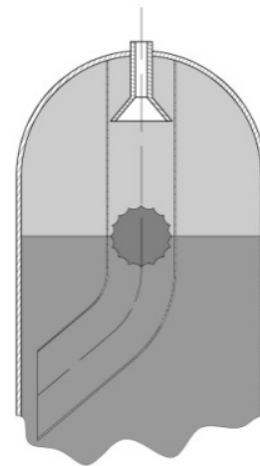


Рис. 3. Пристрій з плаваючим відбивачем

Література

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст] / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалін и др. под ред. В. П. Глушко. – М. : ВИНТИ АН СССР, 1972. – т. 2. – 489 с.
2. Беляев, Н. М. Системы наддува топливных баков ракет [Текст] / Н. М. Беляев. – М. : Машиностроение, 1976. – 335 с.
3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 374 с.
4. Заявка на винахід № a201710283 Україна: F02K 9/00 B64D 37/00. Спосіб наддування парами кисню бака с рідким киснем [Текст] / Ю. О. Мітіков. – заяв. 24.10.2017.
5. Митиков, Ю. А. Расчет параметров системы наддува с учетом взаимодействия струи

газа с компонентом топлива [Текст] / Ю. А. Митиков, Г. М. Иваницкий // Холодильная техника и технология. – 2012. – № 2. – С. 46 – 50.

6. Давление насыщенного пара воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html>. – 23.07.2017

7. Пат. 106685 Україна: МПК F02k 9/00, B64D 37/00. Спосіб наддування паливних баків рушійних установок ракет-носіїв [Текст] / Мітіков Ю.О. – № а201307739 ; заявл. 18.06.13 ; опубл. 10.12.13. – 5 с.

8. Пат. 15096 Україна, МПК F 02k 9/50 Система наддування паливних баків рушійної установки. [Текст] / Мітіков Ю. О., Поляков Д. Г. – № а 201600573 ; заявл. 25.01.16 ; опубл. 11.09.17, бюл. № 17. – 5 с.

9. Пат. 108414 Україна, МПК B64D 37/00 Система наддування паливних баків рушійних установок РН : [Текст] / Мітіков Ю. О. – № а201309167 ; заявл. 22.07.13 ; опубл. 10.12.14, бюл. № 23. – 5 с.

10. Митиков, Ю. А. Газоводы топливных баков жидкостных ракетных двигателей. Подходы к проектированию. Современная классификация [Текст] / Ю. А. Митиков, Е. Ю. Любарский // Сб. науч. праць НУК. – 2016. – № 1. – С. 41 – 46.

11. Митиков, Ю. А. Оптимизация скорости ввода горячего гелия в бак с кислородом [Текст] / Ю. А. Митиков, С. А. Куда // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 34. – С. 9 – 16.

12. Митиков, Ю. А. Проблемы использования высокотемпературного газа для наддува топливных баков двигательных установок нового поколения и пути их решения [Текст] / Ю. А. Митиков, Н. Ф. Свириденко // Технічна механіка. – 2013. – № 1. – С. 68 – 77.

References

1. Alemasov, V. E., Dregalin, A. F. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya* [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products]. VINTI AN SSSR, Moscow, 1972. 489 p.

2. Beljaev, N. M. *Sistemy nadduva toplivnyh bakov raket* [Systems of pressurization for rocket fuel tanks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 335 p.

3. Miheev, M. A. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Jenergija Publ., 1977. 374 p.

4. Mitikov, Yu. O. *Sposib nadduvannya paramy` ky`snyu baka s ridky`m ky`sнем* [The method of

pressurization of oxygen tank using oxygen vapors]. State Register of Patents of Ukraine, Kiev, 2017, Application for invention № 201710283.

5. Mitikov, Ju. A., Ivanickij, G. M. Raschet parametrov sistemy nadduva s uchetom vzaimodejstviya strui gaza s komponentom topliva [Calculation of the parameters of the boost system taking into account the interaction of the gas jet with the fuel component]. *Holodil'na tehnika i tehnologija – Refrigeration technology and technology*, 2012, vol. 2, pp. 46 – 50.

6. *Davlenie nasyshhenogo para vody* [Saturated water vapor pressure]. Saint Petersburg State Chemical Pharmaceutical Academy Faculty of Industrial Medicine Technology. Available from: <http://www.fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html> (Accessed 23.07.2017).

7. Mitikov, Ju. O. *Sposib nadduvannya paly`vny`x bakiv rushijny`x ustanovok raket nosiyiv* [Method of pressurization of fuel tanks of propulsion systems of launch vehicles], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, 2013, Pat. № 106685.

8. Mitikov, Ju. O., Polyakov, D. G., Mitikov, Ju. O. *Sy`stema nadduvannya paly`vny`kh bakiv rushijnoyi ustanovky`* [Pressurization of fuel tanks of the propulsion system], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, 2016, Pat. № 15096.

9. Mitikov, Yu. O. *Sy`stema nadduvannya paly`vny`kh bakiv rushijny`kh ustanovok LV* [Pressurization system of fuel tanks of launch vehicles], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, 2013, Pat. № 108414.

10. Mitikov, Ju. A., Ljubarskij, E. Ju. *Gazovody toplivnyh bakov ZhRD. Podhody k proektirovaniju. Sovremennaja klassifikacija* [Gas pipes of fuel tanks of liquid rocket engines. Approaches to design. Modern classification]. *Zbirnyk naukovy`x prac` Nacional`nogo universy`tetu korablebuduvannya – Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding*, 2016, vol. 1, pp. 41 – 46.

11. Mitikov, Ju. A., Kuda, S. A. *Optimizacija skorosti vvoda gorjachego gelija v bak s kislorodom* [Optimization of the rate of introduction of hot helium into an oxygen tank]. *Visnyk Kharkivs`kogo politekhnichnogo insty`tutu – Bulletin of Kharkiv Polytechnic Institute*, 2012, vol. 34, pp. 9 – 16.

12. Mitikov, Ju. A., Sviridenko, N. F. *Problemy ispol'zovaniya vysokotemperaturnogo gaza dlja nadduva to-plivnyh bakov dvigatel'nyh ustanovok novogo pokolenija i puti ih reshenija* [Problems of using high-temperature gas for pressurization of fuel tanks of new generation propulsion systems and ways to solve them]. *Tehnichna mehanika – Technical mechanics*, 2013, vol. 1, pp. 68 – 77.

СИСТЕМА НАДДУВА БАКА ПАРАМИ КИСЛОРОДА С ОЧИСТКОЙ ОТ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Ю. А. Митиков, И. Д. Дубровский

Рассмотрены риски применения некогда распространенной системы наддува бака с жидким кислородом его горячими парами (Фая-2, Saturn-V, 11К63, Р-9А). Наличие ничтожного количества конденсированной фазы (вода, уголекислота) в жидком кислороде (после бустерного преднасоса) в схемах двигателей с дожиганием окислительного генераторного газа вызывает опасения у проектантов систем наддува баков. Исследованы возможные конструктивно простые пути очистки окислительного генераторного газа и жидкого кислорода от конденсированной фазы. Приведены их схемы. Показана эффективность паровых систем на примере бака с кислородом носителя среднего класса.

Ключевые слова: бак с кислородом, наддув парами, генераторный газ, конденсат, очистка паров.

PRESSURIZATION SYSTEM OF THE TANK WITH OXYGEN VAPORS WITH CLEANING FROM COMBUSTION PRODUCTS

Yu. O. Mitikov, I. D. Dubrovskiy

Considered with respect to modern launch vehicles, the risks of using the once widespread systems of pressurization of tanks with liquid oxygen by its hot vapors. Such systems were successfully used at the Fau-2, at the second stage of the LV 63S1, the first stage of the Saturn-V LV. They do not require complicating the launch complex by means of refueling compressed gases onto the launch vehicle. When switching to engines with afterburning of oxidative gas, the situation worsened. The generator gas contains up to 5% of water vapor and carbon dioxide. In a cryogenic tank they can condense. In oxygen, after the high-pressure pump, there are also these components. They enter the oxygen after drive unit of the turbine of the booster pump. In general way, the condensed phase does not harm the pump. It causes concern among designers of systems of pressurization of tanks with oxygen due to the potential risk of a condensed phase. The purpose of the research is the safe use of oxygen vapors to boost the tanks initially containing a condensed phase. The most dangerous first tens of seconds of operation of the propulsion system were analyzed. Mass-exchange processes in the increasing free volume of a tank with oxygen are considered. The dynamics of the pressure variation of saturated water vapor in the tank and their partial pressure under a hot charge is studied. New possibilities for a sharp increase in the pressure of saturated water vapor in a tank are presented. New possible constructively simple ways of purifying the oxidative generating gas and liquid oxygen from the condensed phase are investigated. Recommendations have been worked out. Two possible principal schemes for eliminating the volume condensation of water vapor are presented and analyzed. To cope with surface condensation, a number of devices for introducing steam into the tank are proposed. Radically, the problem is solved when hot steam is injected into the tank in the form of turbulent vortex rings. The mass efficiency of steam systems with proposed schemes for purification from potential condensate is shown using the example of a tank with oxygen from a medium-sized launch vehicle.

Keywords: oxygen tank, steam boost, generator gas, condensate, vapor purification.

Мітіков Юрій Олексійович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: mitikov2017@gmail.com.

Дубровський Іван Дмитрович – студент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна, e-mail: iskolyar@gmail.com.

Mitikov Yuriy Oleksijovych – PhD, Head of the Department of Engine Engineering, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: mitikov2017@gmail.com.

Dubrovskiy Ivan Dmytrovych – student, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: iskolyar@gmail.com.