

DOI: 10.18372/2310-5461.48.15092

УДК 662.6:629.76/:001.12/.18(045)

**І. Л. Трофімов**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет,  
orcid.org/0000-0001-5539-1166  
e-mail: troffi@ukr.net;

**С. В. Бойченко**, д-р техн. наук, проф.  
Національний авіаційний університет,  
orcid.org/0000-0002-2489-4980  
e-mail: chemmotology@ukr.net;

**І. О. Ландар**  
Академія будівництва України,  
orcid.org/0000-0002-7160-9580  
e-mail: landarivan50@gmail.com

## ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ РАКЕТНИХ ПАЛИВ

### Вступ

Приєднання України за часи своєї незалежності до міжнародних угод щодо скорочення та обмеження деяких видів озброєнь поставило перед державою необхідність проведення широкомасштабних робіт, пов'язаних із виконанням низки програм щодо поетапного скорочення і ліквідації стратегічної зброї наземного та повітряного базування, засобів доставки зброї та відповідної інфраструктури, а також реабілітації територій, забруднених унаслідок військової діяльності. Під час реалізації зазначених програм виникла необхідність нейтралізації об'єктів, що становлять екологічну небезпеку (ракетного озброєння, технологічного обладнання, споруд і т. п.), а також компонентів ракетного палива. Поруч з заборонаю використання сильнодіючих ядовитих ракетних палив на основі азотної кислоти в Україні виникла проблема, що пов'язана ще й з відсутністю виробництва власних вуглеводневих ракетних палив на нафтовій основі. У цілому це призвело до того, що на сьогодні в Україні виникла гостра проблема з забезпечення ракетними паливами космічних літальних апаратів та ракетноносіїв українського виробництва.

### Постановка проблеми та завдання

Світовий досвід експлуатації повітряних кораблів і ракетної техніки накопичив величезний статистичний матеріал щодо відмов бортових систем через підвищений рівень забрудненості робочих рідин. Узагальнений досвід з експлуатаційної надійності паливних систем вітчизняних і закордонних літаків свідчить, що майже 30 % усіх аварій і катастроф,

до 50 % відмов авіаційних двигунів, від 20 до 40 % – гідравлічних і майже 10 % відмов паливних систем відбуваються внаслідок забруднення робочих рідин, а термін роботи насосів і інших агрегатів скорочується за цією причиною у 6–7 разів [3; 4].

Аналогічні дані наведені і у працях Л. П. Лозицького, А. Г. Нікітіна, П. Н. Беляніна та інших авторів [5; 6].

За даними цих авторів, забруднення рідких палив та робочих рідин призводить до забивання форсунок, малих отворів, заклинюванню золотникових пар, командно-паливних агрегатів; сприяє прискореному зношуванню насосів і виконуючих механізмів, збільшенню витоків через зазори рухомих з'єднань.

Також, загальновідомо [6], що чистота реактивних палив залежить не тільки від якості їх фільтрації, але від чистоти робочих місць і атмосфери виробничих приміщень, чистоти миючих і технологічних рідин, ефективності очистки, промивки і контролю якості чистоти робочих агрегатів і трубопроводів. Значна частина забруднень складається з домішок, що залишились після виготовлення виробу. Це залишки від термічної і механічної обробки, підгонки і притирання, залишки абразивних паст після цих операцій.

Постійна увага до проблеми забезпечення якості авіаційних та ракетних палив викликана багатьма чинниками.

За високих рівнів чистоти палив гарантується безпека польотів, забезпечується надійність, збільшується технічний ресурс агрегатів систем, внаслідок чого видатки на досягнення і

підтримку необхідного рівня чистоти палив та робочих рідин цілком виправданні. Особливої актуальності набувають питання систематизації і вдосконалення методів і засобів промислової чистоти за можливістю з найменшими трудовитратами і контролем рівня чистоти протягом всього циклу виробництва. Проблеми забезпечення промислової чистоти рідин пов'язані з економією матеріальних ресурсів, охороною довкілля, покращенням санітарних умов праці і зниженням пожежної небезпеки технологічних процесів.

**Метою** цієї роботи є аналіз номенклатури товарних марок сучасних ракетних палив придатних до застосування в Україні, аналіз основних фізико-хімічних і експлуатаційних властивостей, технічних вимог до якості ракетних палив, проблем функціонування інфраструктури заправлення та забезпечення чистоти ракетних палив.

**Об'єкт дослідження** — використання ракетних палив, експлуатація інфраструктурних технологічних об'єктів заправлення паливних баків, забезпечення чистоти.

**Предмет дослідження** — номенклатура товарних марок, фізико-хімічні та експлуатаційні властивості ракетних палив.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні відомо багато марок ракетних двигунів як закордонного так й вітчизняного виробництва. Саме від їхніх характеристик залежить спроможність ракети-носія вивести той чи інший вантаж на орбіту. Саме розвиток ракетних двигунів і визначає загальний рівень космонавтики, і допоки людство не створить Next Big Thing для виводу корисного навантаження на орбіту, технологія рідинних ракетних двигунів буде визначальною для космічних польотів.

Саме рідинні ракетні двигуни здійснюють доставку корисних вантажів до МКС, доставку супутників на орбіти Землі, є рушіями ступенів ракет космічних апаратів для дослідження далекого космосу.

Ракетні двигуни з твердим паливом, як правило, використовуються для доставки озброєнь в умовах атмосфери Землі. Тож далі у статті буде здійснено розгляд саме рідких ракетних палив (РРП).

Існують різні підходи під час класифікації рідких ракетних палив: за способом застосування в рідинних ракетних двигунах, за хімічним складом компонентів, за принципом їх займання у камері згоряння, за основним призначенням. Рідкі ракетні палива за способом застосування в

двигунах поділяють на однокомпонентні (їх називають іноді *унітарними*) і двокомпонентні.

Однокомпонентні ракетні палива за хімічним складом поділять на мономолекулярні і сумішеві. До мономолекулярних однокомпонентних палив відносять речовини, в молекулі яких містяться як горючі елементи, так і необхідний для горіння кисень. Такими сполуками є, наприклад, складні ефіри азотної кислоти і різних одно-, дво- і триатомних спиртів (метилнітрат  $\text{CH}_3\text{ONO}_2$ , етилнітрат  $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONO}_2$ , ізопропілнітрат  $\text{C}_3\text{H}_7\text{ONO}_2$ , етиленглікольдінітрат  $\text{C}_2\text{H}_4(\text{ONO}_2)_2$ , трінітрогліцерин  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$  та ін.), а також нітропарафіни (нітрометан  $\text{CH}_3\text{NO}_2$ , нітроетан  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ , нітропропан  $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$  та ін.).

До однокомпонентних палив можуть бути віднесені і ендотермічні з'єднання, що виділяють під час свого розпаду велику кількість тепла і газоподібних продуктів (наприклад, гідразин  $\text{N}_2\text{H}_4$ , етиленоксид  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ , пероксид водню  $\text{H}_2\text{O}_2$  та ін.).

Двокомпонентні рідкі ракетні палива, в яких кожен з компонентів подається в камеру згоряння окремо, складаються з пального і окиснювача.

Ракетні окиснювачі за хімічною природою (назвою основного елемента) поділять на [7]:

- кисневі — рідкі кисень  $\text{O}_2$  і озон  $\text{O}_3$ , пероксид водню  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;
- азотні — концентрована азотна кислота  $\text{HNO}_3$ , оксиди азоту  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ , і  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , суміші азотної кислоти (азотний тетраоксид), тетранітрометан  $\text{C}(\text{NO}_2)_4$ ;
- фторової — рідкі фтор  $\text{F}_2$  та кисневі сполуки фтору, зокрема монооксид фтору  $\text{OF}_2$ , трифторид хлору  $\text{ClF}_3$ , пентафторид хлору  $\text{ClF}_5$ , трифторид азоту  $\text{NF}_3$ , перхлорилфторид  $\text{ClO}_3\text{F}$ , фторнітрат  $\text{FNO}_3$ , тетрафторгідразин  $\text{N}_2\text{F}_4$  та ін.;
- хлорні — рідкий хлор  $\text{Cl}_2$ , хлорна кислота  $\text{HClO}_4$  та оксиди хлору, зокрема  $\text{Cl}_2\text{O}_7$ .

Ракетні палива за хімічним складом поділяють на [7]:

- водневі — рідкий і шугоподібний водень  $\text{H}_2$ ;
- вуглеводневі — нафтового походження типу RP1, Jp-5, Jp-6, T-1 і синтетичні, як правило, у вигляді індивідуальних сполук, зокрема, циклічного будови, а також рідкі метан  $\text{CH}_4$  і пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; до вуглеводневих палив можуть бути віднесені і спирти — метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$ , етанол  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , ізопропанол  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ , фурфуроловий спирт  $\text{C}_5\text{H}_6\text{O}_2$ ;
- гідразин — гідразин  $\text{N}_2\text{H}_4$  і його алкілпохідні, зокрема насим-диметилгідразин

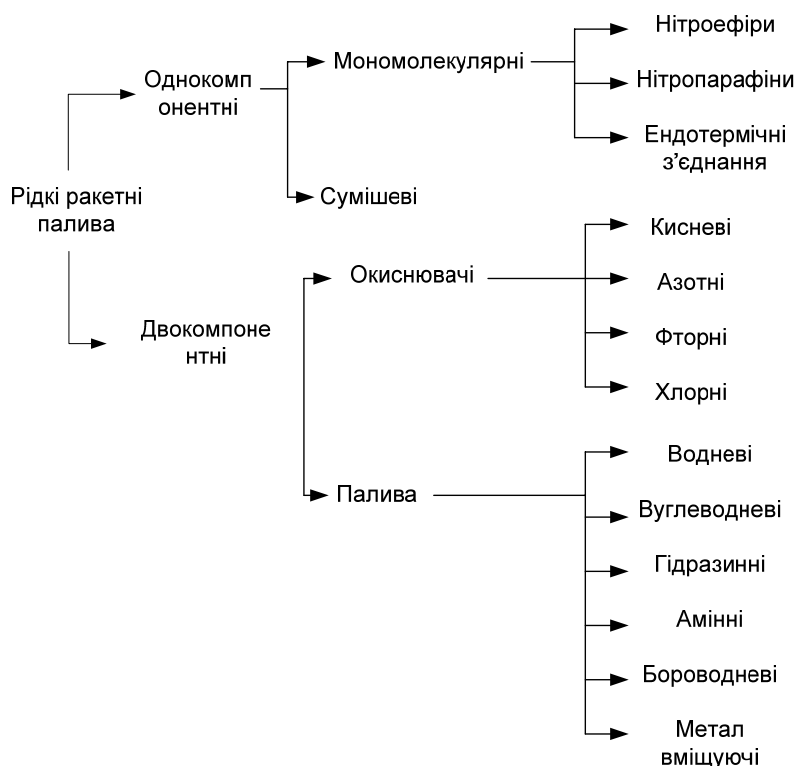
$(\text{CH}_3)_2\text{N-NH}_2$  (НДМГ), монометилгідразин  $\text{CH}_3\text{N-NH}_2$  і фенілгідразин  $\text{C}_6\text{H}_5\text{N-NH}_2$ , Аерозин-50, який є сумішшю гідразину і НДМГ у співвідношенні 1:1, гідразиназиди та ін.;

- амінні — рідкий аміак  $\text{NH}_3$ , індивідуальні аміни, наприклад, анілін  $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ , етиламін — моно- $\text{C}_2\text{H}_5\text{N-NH}_2$ , диетилентриамін та інші суміші аліфатичних і ароматичних амінів, зокрема, суміш триетиламіна та ізомерних ксилідинів  $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$  у співвідношенні 1:1 та ін.;

- бороводневі — з'єднання типу боранів  $\text{B}_n\text{H}_{n+4}$ , наприклад декарборан  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$  і диборан  $\text{B}_2\text{H}_6$ , дигідроборанів  $\text{B}_n\text{H}_{n+6}$ , наприклад, пентаборан  $\text{B}_5\text{H}_{11}$  та ін.;

- металовмістні — гомогенні з'єднання типу триетілалюмінію, гідридів ( $\text{MH}_2$ ) і боргідридів  $\text{M}(\text{BH}_4)$  алюмінію, літію та берилію ( $n$  — валентність металу) і гетерогенні металізовані суспензії зазначених металів в гідразині та вуглеводнях.

Класифікація рідких ракетних палив, заснована на їх компонентному складі і хімічній будові, представлена на рисунку.



Класифікація рідких ракетних палив [7]

За своїм прямим призначенням рідкі ракетні палива прийнято поділяти на основні, пускові і допоміжні [7].

Основними називають палива, що використовуються для спалювання у камері згоряння і отримання необхідної тяги двигуна, пусковими — для займання у камері згоряння не самозаймаючих компонентів палива, допоміжними — для забезпечення функціонування допоміжних агрегатів РРД (турбонасосного агрегату, рідинного акумулятора тиску та ін.) [7].

Відомо, що розрізняють висококиплячі, низькокиплячі та криогенні компоненти рідкого ракетного пального [8]. Висококиплячі — це речовини, які є рідинами при експлуатаційних тиску та температурі баків.

Тобто, за тій температурі, при якій експлуатують ракету, в баках не має потреби підтримувати значний тиск для того, щоб компонент залишався рідиною і не кипів. Приклади висококиплячих компонентів — це перекис водню, азотна кислота, газ тощо [9].

Низькокиплячі компоненти — це речовини, тиск насичених парів яких близький до тиску, який максимально витримують баки. Тобто, якщо тиск зняти, то за нормальної температури компонент почне потихеньку кипіти.

Якщо ж баки тримати надутими, то рідина всередині кипіти не буде. Приклади таких речовин — аміак (так, його також використовували як пальне у американському ракетоплані X-15), пропан, тетраоксид азоту [8–9].

Кріогенні компоненти – це речовини, які залишаються рідинами за дуже низьких температур, і їх неможливо утримувати від кипіння, піднявши тиск. Такі компоненти потребують охолодження баків і трубопроводів під час заправки, а також постійного підживлення компонентом до моменту старту, щоб компенсувати неминучі його втрати внаслідок кипіння [8–9].

**Гас.** Такий самий, як використовують в авіації у США це RP-1, RP-5, RP-6, в Україні знедавна — TC-1, T-1. Гас-кисень вважається наразі найкращою паливною парою для першого ступеню РН — у той час як сучасні двигуни здатні досягнути пустотного питомого імпульсу близько 3500 м/с, питома вага цього пального, з урахуванням оптимального співвідношення кисню і гасу, становить 1020 кг/м<sup>3</sup>. Гас не токсичний. Порівняно дешевий. Має високу температуру кипіння — 423-588 К — тому може довго зберігатися, але може утворювати смолисті осадки у баках та вбирає в себе вологу. Під час горіння в умовах нестачі окисника виділяє сажу, що нам яскраво демонструє перший ступінь Фалкону після посадки [10].

Головний недолік гасу — це його порівняно низька питома вага. Тому в СРСР розробляли синтетичний гас із більшою густиною — синтин.

На пальному гас-рідкий кисень працювали і працюють двигуни [8; 10]:

- РД-107 і РД-108 — відповідно перший і другий ступінь РН «Восток»/ «Восход»/ «Союз»;
- F-1 — перша ступінь РН «Saturn V»;
- НК-15 і НК-33 — перша ступінь РН Н-1;
- РД-170/171 — перша ступінь РН «Енергія» і «Зеніт»;
- РД-180 — перша ступінь РН «Atlas IV»4
- SpaceX Merlin 1D — улюбленець місцевої публіки двигун РН Falcon 9.

І це тільки вибрані найбільш відомі ракети, повний список двигунів та ракет на цій простій і надійній паливній парі набагато більший.

**Водень.** Вірніше рідкий водень. Формула, звичайно — H<sub>2</sub>. Англomовне позначення LH<sub>2</sub>. Король і головний бій сучасного ракетобудування. РРД, які використовують пару рідкий кисень-рідкий водень досягають найбільшого питомого імпульсу тяги серед тих паливних, які реально використовуються — близько 4500 м/с. Водень також є термодинамічно ідеальним робочим тілом для турбіни ТНА. Це відмінний охолоджувач і на відміну від більшості інших рідин він не втрачає своїх властивостей охолоджувача при переході в газоподібний стан. Навіть іноді спеціально газоподібним воднем обертають турбіну, як це зробили в

американському RL-10, і російському РД-0120. Але у водню є багато недоліків. І два основні недоліки походять від його першого номеру в таблиці елементів — водень є найлегшою речовиною у Всесвіті, його питома вага — 71 кг/м<sup>3</sup>, а температура кипіння близька до абсолютного нуля — 20,46 К [10–11].

Через таку малу густину баки для рідкого водню потрібні дуже великі, наприклад як на «Аріан-5», «Шаттл» і «Енергії» [11]. Саме низька густина водню і призводить до того, що на першому ступені краще використовувати менш ефективно, але компактніше пальне — гас, або взагалі тверде пальне. Також низька густина водню робить проєктування відцентрових насосів для нього досить складною справою, і для того щоб забезпечити потрібний тиск, їх роблять багатоступінчастими. Це ускладнює конструкцію двигуна і додає їй маси.

Через те, що рідкий водень є кріогенною рідиною з надзвичайно низькою температурою, заправка його в ракету є складним і довгим процесом — необхідно охолодити усі магістралі і баки, бо інакше водень у них закипає і просто-напросто виштовхує все назад. Також слід пам'ятати, що будь-який кріогенний компонент неможливо довго зберігати.

Водень має високу проникну здатність, тобто його складно герметизувати. І саме висока проникна здатність унеможливила створення композитних водневих баків для проєкту Venture Star X-33 – водень проникав у мікротріщини композитних баків, там закипав і розривав стінки.

Але, за всіх своїх складнощів і всіх неприємностей, які становить водень, він має найбільший питомий імпульс тяги з усіх палив, які реально використовує людство. Тому його активно використовували, використовують і будуть використовувати.

На паливній парі LO<sub>2</sub>—LH<sub>2</sub> працюють:

- RL-10 — ступінь Centaur;
- J-2 — Saturn IVB;
- RS-25 aka SSME — Space Shuttle;
- 11Д122 aka РД-0120 — 2-й ступінь РН Енергія;
- Vulcain — РН Ariane 5.

**Метан.** Хімічна формула CH<sub>4</sub>. На сьогодні дуже відомий метановий РРД BE-4 розробки Blue Origin [10]. Цікавий метан тим, що він важчий за водень — його густина 420 кг/м<sup>3</sup>. При цьому питомий імпульс тяги пари метан-кисень менший, ніж у водню — близько 4000 м/с. Таким чином, метан — це компроміс між гасом і воднем. Імпульс менший за водневий, але й баки менші.

Однак метан все ж криогенна рідина — кипить за 112 К. Що, звісно, незручно. Також у деяких режимах горіння метану може виділятися сажа — це знижує питомий імпульс тяги, а також погіршує умови охолодження камери згоряння.

**Гідразинові палива.** Називають їх так, тому що це група речовин, в основі яких є гідразин —  $N_2H_4$ . Це прозора рідина з густиною близькою до густини води —  $1010 \text{ кг/м}^3$  і температурою кипіння 386,66 К — тобто є досить легкою для зберігання [9–10]. Двигуни на гідразині і АТ досягають питомого імпульсу тяги близько 2860 м/с. Так само, як і гас, гідразин самозаймається з азотною кислотою і тетраоксидом. Тобто бачимо, що це досить зручне паливо. Але є одна велика проблема — гідразин дуже токсичний. Так само як і його похідні, і найбільш вживана з них несиметричний диметил гідразин [11; 12].

**НДМГ** або несиметричний диметил гідразин ( $H_2N-N(CH_3)_2$ ). Несиметричний тому, що метильні групи розташовані несиметрично. Цікаво, що СДМГ (симетричний диметил гідразин) — не використовується в ракетній техніці. Як і гідразин, НДМГ має високу температуру кипіння — 336 К, але меншу густину —  $785 \text{ кг/м}^3$ . Він добре зберігається і тому його широко використовують там, де це важливо — для військових ракет і космічних апаратів. Тим більше що він також самозаймається з АТ і має задовільний питомий імпульс тяги з цим окиснювачем — близько 3300 м/с.

Незважаючи на цю дуже неприємну властивість гідразинові палива, а варто згадати ще монометилгідразин (ММГ) і суміш НДМГ та гідразину — аерозин-50, досить популярні. Їх широко використовують в усьому світі, бо такі РРД можна використовувати для військових ракет і вони досить таки прості. Найбільш відомі РРД КБ Глушка [9]:

- РД-253 — перший ступінь РН «Протон»;
- РД-270 — один з найпотужніших РРД свого часу, призначений для місячної РН УР-700;
- РД-270.

**Перекис водню.** Відомий  $H_2O_2$ , тільки високої концентрації — близько 80 %. За такої концентрації перекис у присутності каталізатору — сполуки марганцю, наприклад, бурно розкладається на гарячий парогаз. І саме таким парогазом від розпаду перекису приводилась у рух турбіна у двигуні ракети А4, більш відомої як Фау-2. І точно так само крутиться ТНА двигуна РД-107/108 відповідно на першому і другому ступені РН «Союз», яка досі доставляє людей у космос. Також перекис широко використовують як монопальне для космічних

РРД і особливо РРД малої тяги — наприклад, на КК «Союз» або у вже згаданого Х-15.

### Виклад основного матеріалу

Аналіз досліджень і публікацій свідчить [11–14], що донедавна для заправлення паливних баків ракет на території України використовувалось рідинне і тверде ракетне паливо.

Авіаційний гас, що придатний для ракетної техніки України, виробляють у РФ для літаків дозвукової авіації за ГОСТ 10227-2013 і для надзвукової авіації за ГОСТ 12308-013. Для дозвукової авіації передбачено п'ять марок палива (ТС-1, Т-1, Т-1С, Т-2 і РТ), для надзвуковою — дві (Т-6 і Т-8В). Масовими паливами в даний час є палива ТС-1 (вищого і першого сортів) і паливо РТ (вищого сорту, яке на сьогодні також виробляється в Україні на Кременчуцькому НПЗ). Для РРД ракет космічного призначення довгі роки основним паливом був авіаційний гас Т-1. Зокрема, гас Т-1 був обраний академіком В. П. Глушко як паливо МБР Р-7, на базі якої були створені ракети космічного призначення: РН «Супутник» (перші три радянських ШСЗ), РН «Восток» (перший пілотований політ), РН «Блискавка» (перший супутник зв'язку), РН «Союз» (пілотовані польоти і супутники різного призначення).

Застосовується головним чином для РРД РД-107 (перший ступінь, «боковинки») і РД-108 (другий ступінь, центральний блок), які з урахуванням неодноразових модернізацій і модифікацій знаходяться в серійному виробництві майже 60 років.

Вибір авіаційного гасу Т-1 як основного пального для РРД МБР Р-7 і всіх наступних ракет космічного призначення визначався дешевизною і доступністю Т-1, а також низькою токсичністю і простотою наземної інфраструктури.

Реактивні палива на нафтовій основі Т-1, Т-6, Т-8В також вдало підходять і для космічної техніки вітчизняного виробництва, але проблема у тому, що в Україні вони не виробляються, а їх закупка у РФ на сьогодні не можлива за низки причин. Тож Україні потрібно або почати виробляти власні палива указаних марок, або закуповувати аналоги у інших держав.

Зокрема, на початок 2020 в КБ «Південне» велися перемовини з США та Канадою про закупку ракетного палива RP-1. Тож далі у цій статті буде проведено порівняльний аналіз існуючих ракетних палив придатних до застосування в Україні, аналіз технічних вимоги до ракетних палив та аналіз проблеми заправки і чистоти ракетних палив.

Тривалий досвід застосування реактивних палив показує, що вони мають задовольняти енергетичним вимогам, вимогам до кінетичних властивостей ракетних палив, експлуатаційним вимогам, екологічним та економічним вимогам [10; 16].

#### *Вимоги до енергетичних характеристик РРП*

1. Високе значення ідеального питомого імпульсу тяги або масової теплоти згорання палива. Чим вище нижча масова теплота згорання палива  $H_i$ , тим вища швидкість витікання продуктів згорання з сопла, а отже і питомий імпульс тяги.

2. Велика густина палива. Густина палива, поряд з питомим імпульсом, надає основний вплив на найважливішу характеристику літального апарата — його кінцеву швидкість, тобто швидкість в кінці активної ділянки траєкторії польоту в момент закінчення роботи двигунів.

3. Високе значення газової постійної продуктів згорання палива  $R_{зг}$ . Це забезпечує більш питоме газоутворення палив.

4. Низьке значення показника адіабати продуктів згорання.

5. Прийнятний рівень температури продуктів згорання в камері згорання  $T_{зг}$ .

#### *Вимоги до кінетичних властивостей палива*

1. Можливість самозаймання палива у камері згорання у разі контакту його компонентів в рідкому вигляді. Виконання цієї вимоги істотно підвищує надійність двигуна і спрощує його конструкцію, тому що відпадає необхідність в спеціальній системі запалювання палива.

2. Низька температура займання компонентів палива. Це сприяє підвищенню надійності запуску РРД.

3. Мала затримка займання.

4. Висока швидкість згорання палива, тобто висока швидкість протікання хімічних реакцій.

#### *Вимоги до експлуатаційних характеристик*

Вимоги до експлуатаційних характеристик палива можна поділити на дві групи: вимоги до палива як охолоджувача камери згорання; вимоги, зумовлені обслуговуванням і роботою двигуна. Вимоги першої групи покликані забезпечити надійне охолодження камери двигуна:

1. Висока питома теплоємність. За високої питомої теплоємності одиницею маси охолоджуваного компонента буде поглинатися більша кількість тепла.

2. Задовільна теплопровідність. Рідина, що володіє високою теплопровідністю, здатна пропускати і розподіляти за обсягом великі теплові потоки.

3. Висока температура кипіння

4. Значна хімічна стійкість у разі контакту з вогневою стінкою камери, нагрітої до температури 570...970 К. На стінках проточної частини зовнішньої регенеративної системи охолодження камери не повинно утворюватися нагару або коксу, які погіршують відведення тепла від стінки до більш холодного тіла.

5. Низька в'язкість. За високої в'язкості охолоджуючого компонента збільшується гідравлічний опір тракту охолодження камери. Це вимагає підвищення потужності паливних насосів.

Вимоги другої групи, пов'язані з обслуговуванням і роботою двигуна:

6. Стійкість при тривалому зберіганні. Компоненти палива під час зберігання не повинні випаровуватися, розшаровуватися, змінювати свою структуру і хімічний склад, виділяти осадки.

7. Мінімальна корозійна активність відносно до матеріалів системи подачі палива рухової установки.

8. Низька температура замерзання. Бажано, щоб температура замерзання була не вище  $-40^{\circ}\text{C}$ .

9. Висока температура кипіння. Температура кипіння повинна бути не нижче  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Виконання двох останніх вимог спрощує обслуговування і використання РРД в усьому експлуатаційному діапазоні температур навколишнього середовища.

10. Високі вибухобезпечність і пожежо-безпечність.

#### *Вимоги до екологічних та економічних властивостей*

Ці вимоги забезпечують безпеку експлуатації двигунів і їх конкурентоспроможність на світовому ринку:

1. Низька вартість.

2. Недефіцитність.

3. Забезпеченість сировинною базою. Компоненти палива слід виготовляти за можливістю з використанням вітчизняної сировини і на вітчизняних заводах.

4. Простота виготовлення.

5. Можливість використання палива, його компонентів і їх похідних в народному господарстві.

6. Компоненти палива і продукти їх згорання не повинні бути токсичними.

7. Виробництво і експлуатація двигунів та палива повинні бути екологічно безпечними.

Також слід зауважити, що не існує палива, яке задовольняло б усім переліченим вимогам. Тому під час підбору компонентів палива доводиться шукати компроміси і знаходити оптимальні рішення.

У разі формування цільової функції перш за все слід звертати увагу на виконання основних вимог. У таблиці наведено типові властивості реактивних палив, які виробляються в Україні (РТ та ТС-1), реактивних палив, які

використовуються для ракетної техніки та виробляються в РФ (Т-1 та Т-6), ракетних палив, що виробляються в США та Канаді і рекомендовані до застосування в Україні (RP-1 та JP-5).

Таблиця

**Порівняльна характеристика реактивних палив  
придатних для ракетних двигунів різних країн виробників**

Найменування показника	РТ ГСТУ 320.00149 943.007 (Україна)	ТС-1 ГСТУ 320.00149 943.011 (Україна)	Ракетне паливо JP-5 (США, Канада)	Ракетне паливо RP-1 MIL-DTL- 25576E (США, Канада)	Т-1 ГОСТ 10227- 2013 (Росія)	Т-6 ГОСТ 12308- 2013 (Росія)
Фракційний склад: - температура початку кипіння	175	175	199	визн. об.	150	195
- 10 %, °C	225	225	220	185–210	175	220
- 50 %, °C	270	270	246	–	225	255
- 90 %, °C	–	–	–	–	270	290
- температура кінця кипіння, °C	–	–	–	max 274	282	315
- залишок %	–	–	–	max 1,5	–	–
втрати під час випаровування, % мас	–	–	–	max 1,5	–	–
Температура спалаху, °C	min 30	min 28	64	min 60	min 30	min 62
Температура початку кристалізації, °C	–55 max	–55 max	–45	–51 max	–60 max	–60 max
Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с за температури мінус 40 °C за температури мінус 34 °C	max 16	max 16	13,8	max 16,5	max 16	max 60
Теплота згоряння, кДж/кг	min 43100	min 43120	48,5	min 43031	min 42900	min 42900
Концентрація фактичних смоля, мг на 100 см <sup>3</sup> палива, не більше	max 4	max 5	–	max 1	max 6	max 4
Масова доля загальної сірки, мг/кг, %	max 0,1	0,25	30	max 30	max 0,1	max 0,001
Масова доля меркаптанової сірки, %, Мг/кг	0,001	0,003	0,003	max 3	–	max 0,005
Масова частка ароматичних вуглеводнів, %	max 22	max 22	5	max 5	max 18	max 8
Вміст механічних домішок, мг/л, %	0,0003	0,0003	<1мг/л	max 1	Відс.	Відс.
Корозія на мідній пластинці	max 1	max 1	max 1	max 1	max 1	max 1
Густина, 60/16 °C	–	–	–	0,799–0,815	–	–
Густина за 20 °C, г/см <sup>3</sup>	0,775	0,778	0,824	–	0,800	0,840

Як видно з таблиці наведені реактивні палива дуже близькі за основними властивостями. Що стосується ракетних палив, то гас JP-5 в цілому близький за охолоджуючими властивостями до гасу Т-1 за низьких температур, але з тенденцією до перевищення по охолоджуючим властивостям на 10...20 %.

Що стосується гасу RP-1, то він вже за низьких температурах показує кращі властивості, ніж JP-5. З огляду на монотонність функцій густини, теплоємності, теплопровідності і в'язкості, скоріше за все ця тенденція зберігається і за високих температур  $T \geq 200$  °C. Порівняльний аналіз показує, що паливо RP-1 за

більшістю показників є аналогом реактивного палива Т-6, а отже цілком може використовуватися для ракетноносіїв українського виробництва. Єдиними показниками за яким реактивне паливо RP-1 програє паливам Т-1 та Т-6 — це температура початку кристалізації та допустимий вміст сірки.

Але ракетне паливо RP-1 у свою чергу має вищу теплоту згоряння та значно меншу допустиму концентрацію фактичних смол, що дуже важливо для експлуатації РД.

Як відомо, безпека експлуатації літальних апаратів з газотурбінними (ГТД) та РД значною мірою залежить від чіткої організації заправлення їх кондиційними паливами. Застосування палив для ГТД у цивільному авіаційному транспорті України і технологія заправлення літаків регламентуються відповідними інструкціями і вказівками, недотримання яких нерідко призводять до втрати якості палив і, як наслідок, порушення регулярності польотів, що створює передумови до льотних подій [15; 16].

Палива для ГТД та РД у процесі зберігання, транспортування й заправлення можуть змінювати свої властивості. Забруднення в паливі негативно впливають на роботу агрегатів паливних систем літаків та ракет. У паливних системах можуть порушитися автоматика керування заправленням і необхідне подавання палива, відбутися передчасне забивання фільтрів. Особливо чутлива до забруднень паливо-регулювальна апаратура ГТД [17, 18]. У кожній рідині є забруднення, «успадковані», від сировини в процесі виробництва і «набуті», тобто ті, що потрапили в рідину в результаті зношування пар тертя агрегатів, контакту з навколишнім середовищем або з'явилися в результаті фізико-хімічних змін і появи продуктів розпаду. В нафті, що є основою більшості рідких палив, присутні небажані компоненти, такі як ненасичені вуглеводні, асфальто-смолисті речовини, зольні елементи, нафтені кислоти, азотні і сірчані сполуки, тверді парафіни, церезити, вода тощо [17].

Своєчасне очищення робочих рідин паливних систем підвищує надійність і довговічність обладнання. Під час роботи на забрудненому паливі в насосах-регуляторах реактивних двигунів можуть відбуватися заїдання прецизійних пар, а це викликає нестабільність запуску двигуна, коливання числа обертів або самовідключення двигуна. Як показали дослідження, що лише за рахунок очищення і підвищення чистоти робочої рідини довговічність паливної системи і обладнання збільшується в 2–3 рази [18].

Тому питання підвищення чистоти палив для ГТД є особливо актуальними.

Відомо, що забруднення в технічну рідину потрапляють: під час обслуговування систем; недбалого монтажу агрегатів, гнучких шлангів і трубопроводів; через незаглушені з'єднувальні вузли; внаслідок забрудненості інструментів; заправних засобів; одягу обслуговуючого персоналу; під час наповнення палива в недостатньо чисті ємності; при перекачуванні погано промитими трубопроводами.

На складах паливно-мастильних матеріалів аеропортів забруднення в паливо потрапляють у вигляді продуктів корозії місткостей і технологічного обладнання, зношування пар перекачувальних засобів, руйнування і вимивання прокладо-ущільнювальних матеріалів, пилу та вологи, що потрапляють в резервуари при великих і малих «диханнях» резервуарів, а також при наповненні засобів заправлення.

Згідно з директивою ІКАО Doc 9977 [19] чисте і обезводнене паливо — гарантія безпеки польоту літаків. Для авіаційних палив встановлені такі вимоги до вмісту води та механічних домішок:

- згідно джерела [15] — повна відсутність вільної води, та наявність механічних домішок розміром не більше 5 мкм;
- згідно джерела [16] — повна відсутність вільної води, та наявність механічних домішок розміром не більше 5 мкм;
- згідно джерела [19] - повна відсутність вільної води, та наявність механічних домішок розміром не більше 4 мкм.

Як видно з нормативних документів, ці вимоги стосуються авіаційних реактивних палив, що використовуються в Україні та світі. Щодо ракетних палив, нажалі чітка директивна інформація стосовно вмісту в них води та механічних домішок в Україні відсутня. Під час підготовки РРП до заправки йде чітке дотримання стандартів до самих палив.

Так, для розглянутих нами ракетних палив встановлені такі вимоги до вмісту води та механічних домішок:

- згідно джерела [20] — для ракетних палив на основі гідразину допустимі тверді частинки — не більше 15 %;
- згідно джерела [21] — для рідких ракетних палив масова частка води має складати не більше 0,17 %;
- згідно джерела [22] — для ракетних палив США масова частка води має складати не більше 0,15 %.

Процеси підготовки вуглеводневих палив призначених для заправки паливних баків ракет,



ракетних і розгінних блоків, зводяться до очищення палив від твердих частинок, зневоднення (видалення вільної (емульсійної) і розчиненої води), видалення розчинених газів (дегазації), а також до охолодження або нагрівання до необхідної температури перед виконанням заправних операцій на технічних або стартових комплексах космодромів. При цьому підготовка РПП відбувається за послідовним проведенням таких операцій: очищення при прийомі; зневоднення; дегазація; температурна підготовка; очищення перед видачею споживачеві.

Ракетні палива згідно з розглянутими стандартами [20–22] повинні очищуватися до 5...20 мкм з дегазацією вільного газу, з урахуванням кількості прийнятого палива, контролем його якості під час приймання, а також відділенням від палива вільної води до вмісту не вище 0,0015 % за масою. Для РПП вміст розчиненої води має становити не більше 0,0001...0,0004 % за масою, що зумовлено необхідністю охолодження пального перед заправкою в паливні баки ракет до температури 30...–40 °С.

Важливим показником якості охолодженого до мінусових температур вуглеводневого палива є забезпечення його прокачуваності через фільтри заправних і бортових паливних систем, що в свою чергу вимагає зниження вмісту в паливі вільної і розчиненої води до значень не більше 0,0004 % за масою перед заправкою в паливні баки ракет, так як основною причиною погіршення прокачуваності палива є засмічення фільтрів заправних і бортових систем кристалами льоду.

Необхідні властивості вуглеводневих палив за змістом води в загальному випадку можуть забезпечуватися в кілька прийомів, від виробництва пального на нафтопереробних заводах до його зневоднення в ході підготовки до заправки засобами наземних комплексів. Оскільки під час виробництва ракетних палив їх зневоднення не проводиться, так як даний процес не є стадією виробництва пального, і вміст розчиненої в ньому води не регламентовано, то завдання зневоднення пального повинна вирішуватися технологіями його підготовки виключно засобами наземної інфраструктури космодромів.

Наразі очищення палив від забруднень і води здійснюється методами відстоювання, фільтрування, центрифугування та хімічними. Відповідно до інструктивних документів цивільної авіації України для очищення палив для ГТД в умовах аеропортів і на літаку отримав метод

фільтрування, що ґрунтується на плині палива через пористу перепону і затримуванні на ній частинок забруднення та крапель води. Як фільтрувальні перепони використовуються різні типи тканин, папір, сітки, кераміка, метало-кераміка тощо.

Аеродромні фільтри і ті, що використовуються на літаках для очищення палив, являють собою пристрої з фільтроелементами дискового, спірального, циліндричного та інших типів. Дослідженнями і розробленням фільтрів для очищення палив від забруднень і емульсійної води зараз займаються у США (Millipor Filter Corp., Fram Corp.), у Великій Британії (Millipor Filter Corp., Stream Line Filter Ltd.) та інших країнах [17].

Але проблема очищення ракетних палив за допомогою фільтроелементів полягає у тому, що на відміну від авіапалив, вони подаються у баки ракет виключно за мінусових температур. Фільтроматеріали, що здатні обезводнювати РПП за мінусових температур як правило дуже дорогі і мають максимальний ресурс до 500 тис. літрів.

Альтернативними є і інші відомі методи очищення технологічних рідин, робота силових агрегатів яких основана на ефекті взаємодії частинок забруднень з силовим полем: гравітаційним, відцентровим, магнітним, електростатичним, електромагнітним і полями сил, що генеруються ультразвуковими коливаннями.

Перераховані обставини вимагають пошуку, аналізу та обґрунтування раціональних технологій і режимів охолодження та підготовки ракетних палив за вмістом у них води засобами стартових і технічних комплексів космодромів, що є завданнями досліджень навчально-наукових лабораторій «Альтернативні моторні палива» та «Технологічні процеси у авіапаливо-забезпеченні» факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету м. Київ.

Однією з перспективних сфер використання ракетних палив є використання паливних комірок.

Космічні потреби людства були першим істотним поштовхом як для створення паливних комірок, так і їхнього використання. Відомі факти використати гідразин і аміак через відсутність у них вуглецю і, тим самим, принципову нездатність утворювати окис вуглецю, який є шкідливим для лужного і ПОМ електроліту. Серед розробників, компанії Monsanto, Union Carbide, Shell та Allis Chalmers багато зробили щодо використання гідразину як палива для паливних комірок. Там же вказується і на ту обставину, що відмічена вище

«дискваліфікація гідразинних паливних комірок співпала у часі зі зменшенням фінансування НАСА та всієї Армії США», що залишило надію на можливість сприятливого винаходу, що дозволив би використати високі енергетичні властивості азот-водневих палив.

Декілька світових компаній продовжили свої дослідження з використання гідразину, сподіваючись вирішити одночасно з енергетичною і проблему зниження викидів двоокису вуглецю через очевидну відсутність самого вуглецю у цьому паливі. Немаловажною, у порівнянні з воднем, є й його краща здатність зберігатися у зрідженому стані.

Найстарший у Японії виробник автомобілів Daihatsu об'явив у 2007 році про створення автомобіля ShoCase, який замість водню споживає рідкий або твердий гідрат гідразину, не потребуючи при цьому коштовного платиногого каталізатора, який є обов'язковим у паливних комірках на полімерному електроліті. Як і воднева паливна комірка, гідразинова ПК виробляє електрику з високою потужністю на рівні  $0,5 \text{ Вт/см}^2$  ( $5 \text{ кВт/м}^2$ ). Виробник вирішив і проблему збереження гідразину у паливному бакові авто, заповнюючи його полімерними гранулами, завдячуючи чому утворюється тверда форма гідразину — гідразон, який можна зберігати безпечніше. При додаванні теплої води, утворюється рідкий розчин гідразину, який і споживається паливними комірками.

Повідомляється, що гідразинова паливна комірка забезпечує електрорушійну силу 1,56 В, у той час як воднева забезпечує лише 1,23 В.

З огляду на те, що за своїм складом несиметричний диметилгідразин,  $(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ , є сумішшю двох речовин — метилової групи  $\text{CH}_3$  і гідразину  $\text{N}_2\text{H}_4$ , кожна з яких сама по собі може бути використана як паливо для паливних комірок, то позитивне вирішення цієї думки не виглядає зухвалим. Окисником тут має бути кисень повітря або тетроксид азоту  $\text{N}_2\text{O}_2$ . Викидними газами мають бути  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  та  $\text{N}_2$ , які можуть бути повторно використані за потреби.

Головною перепоною тут є надзвичайно висока токсичність цієї речовини, її канцерогенність і активність. Робота з несиметричним диметилгідразинном вимагає спеціальних лабораторних умов і надзвичайної уважності, щоб запобігти неприпустимих випадковостей, які можуть нашкодити як розробникам, так і допоміжному персоналу.

Паливно-комірчане явище само по собі запобігає прямому контакту палива і окиснювача.

Особливо обнадійливим тут виглядає керамічна паливна комірка, у якій контрольований контакт між паливним та окиснювальним газами відбувається через тверду керамічну перегородку, через яку перенесення електричного заряду відбувається йонами лише дифузійним чином.

Наявність твердої газонепроникної перегородки запобігає неконтрольованому вибуховому протіканню реакції окиснення палива. Реагувати можуть лише ті кількості речовин, які відповідають стехіометричному складові хімічної реакції окиснення і які можуть бути прирівняні кількості окисника, який може пройти через електроліт лише йонним чином.

Крім високої ефективності через відсутність проміжним перетворень енергії, паливним коміркам притаманна ще й надзвичайно висока економічність використання електроутворюючих речовин. З коротко наведеного вище видно і зрозуміло, що паливо та окисник споживаються лише тоді, коли споживається електрика. І лише у тій кількості, яка дійсно відповідає спожитій електричній потужності. Ця особливість паливно-комірчаного перетворення є особливо важливою при тривалих космічних подорожах. Важливим є й те, що паливно-комірчані електрогенеруючі системи можуть бути модульними і легко забезпечувати потужності до декількох гігават.

### Висновки

1. Ураховуючи далеко незадовільний екологічний стан в Україні, використання гасів у якості ракетних палив на сьогодні є актуальним для нашої країни порівняно з гептиловими РРП.

2. Реактивні палива Т-1, Т-6, Т-8В вдало підходять для космічної техніки вітчизняного виробництва, але в Україні вони не виробляються, а їх закупка у РФ на сьогодні не можлива за низки причин. Тож Україні потрібно або почати виробляти власні палива указаних марок, або закуповувати аналоги у інших держав.

3. Порівняльний аналіз показав, що американське РРП RP-1 за більшістю показників є аналогом реактивного палива Т-1 та Т-6, а отже цілком може використовуватися для ракетноносіїв українського виробництва. Єдиними показниками за яким реактивне паливо RP-1 програє паливам Т-1 та Т-6 — це температура початку кристалізації та допустимий вміст сірки. Але ракетне паливо RP-1 у свою чергу має вищу теплоту згоряння та значно меншу допустиму концентрацію фактичних смол, що дуже важливо для експлуатації РД.

4. На сьогодні в Україні не вирішена і не вирішується проблема щодо розробки нормативних документів з контролю якості РРП під час їх зберігання та експлуатації. Зокрема, відсутня чітка нормативна документація щодо процесу заправки ракет РРП за низьких температур.

5. На відміну до авіаційних палив, відсутні регламенти чи інші нормативні документи щодо вмісту вільної та розчиненої води і механічних домішок в РРП. Відсутній перелік дозволених технологій і засобів очищення ракетних палив від води та механічних домішок, послідовних операцій підготовки РРП до заправки на космодромах.

6. Однією з перспективних сфер використання ракетних палив є використання паливних комірок.

### ЛІТЕРАТУРА

1. **Поконова Ю. В.** Химия высокомолекулярных соединений нефти. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980, 172 с.
2. **Коваль А. Д.,** Петроченков В. Г. Исследование реологических свойств нефти до и после кавитационной обработки. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2005. Вип. 2 (8). С. 29–32.
3. **Лозицкий Л. П.,** Ветров А. М. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Воздушный транспорт, 1992. 735 с.
4. **Матвеева О. Л.,** Захарчук П. П., Захарчук В. П. Дослідження забрудненості рідин гідросистем літаків. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2005. Вип. 2(8). С. 36–42.
5. **Wilson P. J.** Solid Contaminant profiles. *Fluid Power International*. 1992. vol. 37, №439, p. 19–22.
6. **Никитин Г. А.,** Чирков С. В. Влияние загрязнённости жидкости на надёжность гидросистем летательных аппаратов. М.: Транспорт. 1996. 183 с.
7. **Химмотология** ракетных и реактивных топлив / [А. А. Братков, Е. П. Серегин, А. Ф. Горенков и др.]; под ред. А. А. Браткова. М.: Химия, 1987. 304 с.
8. **Ракетне паливо.** — Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%BD%D0%B5\\_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%BD%D0%B5_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE). (дата звернення 12.09.2020)
9. **Жидкостные** ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для высших учебных заведений / М. В. Добровольский; под ред. Д. А. Ягодникова 3-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 461, с.
10. **Егорычев В. С.,** Кондрусев В. С. Топлива химических ракетных двигателей: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 72 с.
11. **Ariane 5ES with ATV 4 on its way to ELA.** URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26533952>. (дата звернення 12.09.2020)
12. **Мовчан Я. І.,** Шаравара В. В. Екологічна безпека геохімічної поведінки ракетних палив. *Техногенна безпека*. 2014. Вип. 221. Т.223. С. 53–57.
13. **Баранов М. Е.,** Герасимова Л. А., Хижняк С. В., Дубинин П. А. Формирование микробного сообщества почв, загрязнённых ракетным топливом. *Техносферная безопасность*. 2017. № 1. С. 94–95.
14. **Хрупенко А. Н.** Выбор способа утилизации твёрдых ракетных топлив. *Системы озброєнь і військова техніка*. 2005. № 2. С. 86–93.
15. **Інструкція** з контролювання якості нафти і нафтопродуктів на підприємствах і організаціях України, затверджена Наказом Мінпаливенерго України, Держспоживстандарту України від 04.06.2007 №271/121.
16. **Інструкція** з забезпечення заправлення повітряних суден паливно-мастильними матеріалами і технічними рідинами на підприємствах цивільного авіаційного транспорту України, затвердженої Наказом Державної служби України з нагляду за забезпеченням безпеки авіації від 14.06.2006 №416.
17. **Панін В. В.,** Вареник А. В. Очищення від забруднень палив для газотурбінних двигунів. *Наукоємні технології*. №1(21). 2014. С. 6–10.
18. **Trofimov I. L.,** Zubchenko A. N., Kolomiec A. F. Development of plant for treatment of working liquids used for process purposes. Systems and means of motor transport (selected problems), by Politechnika Rzeszowska. Rzeszow, Poland. 2012. p. 295–301.
19. **Директиви** ICAO Doc 9977, JIG1 та JIG2.
20. **ГОСТ Р ИСО 15859-7-2010** «Ракетное топливо на основе гидразина» (Часть 1. Топливо высокой чистоты: специальное производство со строгим контролем количества примесей).
21. **ГОСТ Р ИСО 15859-5-2010.** Системы космические. Характеристики, отбор проб и методы анализа текучих сред. Часть 5. Ракетное топливо на основе тетроксид азота.
22. **ISO 15859-7:2004.** Space systems — Fluid characteristics, sampling and test methods — Part 5: Nitrogen tetroxide propellants.

Трофімов І. Л., Бойченко С. В., Ландарь І. О.

## ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ РАКЕТНИХ ПАЛИВ

У статті обговорюється питання сучасного стану та перспектив використання ракетних палив в Україні. Основною метою роботи був аналіз номенклатури товарних марок сучасних ракетних палив придатних для використання в Україні, аналіз основних фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей, технічних вимог до якості ракетного палива, проблем функціонування інфраструктури заправки і забезпечення чистоти ракетних палив. Поруч із заборонаю використання сильнодіючих отруйних ракетних палив на основі азотної кислоти в Україні виникла проблема, пов'язана ще і з відсутністю виробництва власних вуглеводневих ракетних палив на нафтовій основі. В цілому це призвело до того, що сьогодні в Україні виникла гостра проблема щодо забезпечення ракетними паливами космічних літальних апаратів і ракетноносіїв українського виробництва. Постійна увага до проблеми якості авіаційних і ракетних палив викликана багатьма факторами. За високих рівнях чистоти палив гарантується безпека польотів, забезпечується надійність, збільшується технічний ресурс агрегатів систем, в результаті чого витрати на досягнення і підтримання необхідного рівня чистоти палива і робочих рідин цілком виправдані. У статті наведено класифікацію рідких ракетних палив, засновану на їх компонентному складі і хімічній будові. Наведено вимоги до енергетичних, кінетичних, експлуатаційних характеристик, екологічних та економічних властивостей рідких ракетних палив (РРП). Встановлено, що з огляду на далеко незадовільний екологічний стан в Україні, використання гасу в якості ракетного палива на сьогодні є актуальним для нашої країни у порівнянні з гептиловим ракетним паливом. Реактивні палива Т-1, Т-6, Т-8В вдало підходять для космічної техніки вітчизняного виробництва, але в Україні вони не виробляються, а їх закупівля в РФ на сьогодні неможлива з ряду причин. Порівняльний аналіз показав, що американське рідке ракетне паливо RP-1 за більшістю показників є аналогом реактивного палива Т-1 і Т-6 і цілком може використовуватися для ракетноносіїв українського виробництва. На сьогодні в Україні не вирішена і не вирішується проблема з розробки нормативних документів з контролю якості ЖРТ при їх зберіганні і експлуатації. Зокрема, відсутня чітка нормативна документація до процесу заправки ракет РРП за низьких температур. На відміну до авіаційних палив, відсутні регламенти та інші нормативні документи за змістом вільної і розчиненої води і механічних домішок в РРП. Однією з перспективних сфер використання ракетних палив є використання паливних осередків. Результати досліджень можуть бути застосовані в області експлуатації космічних апаратів, а також інфраструктури заправки і забезпечення чистоти ракетних палив. Результати статті можуть бути застосовані експертами хіммотологами, фахівцями в галузі експлуатації засобів заправки та зберігання РРП.

**Ключові слова:** ракетні палива; ракетноносії; властивості; об'єкти заправки; паливний бак; чистота; топлівне осередку; аналіз.

Trofimov I., Boichenko S., Landar I.

## OVERVIEW OF THE CURRENT SITUATION AND PROSPECTS OF USING ROCKET FUELS

In the article discusses the current state and prospects for the use of rocket fuels in Ukraine. The main purpose of the work was analyze the range of brands of modern rocket fuels suitable for use in Ukraine, analysis of basic physical, chemical and operational properties, technical requirements for rocket fuel quality, problems of refueling infrastructure and cleanliness of rocket fuels. In addition to the ban on the use of highly toxic nitric acid-based rocket fuels in Ukraine, there is a problem associated with the lack of production of its own hydrocarbon rocket fuels based on oil. In general, this has led to the fact that today in Ukraine there is an acute problem with the provision of rocket fuels for spacecraft and rocket carriers of Ukrainian production. The constant attention to the problem of the quality of aviation and rocket fuels is caused by many factors. At high levels of purity of fuels safety of flights is guaranteed, reliability is provided, technical resource of units of systems increases therefore expenses for achievement and maintenance of necessary level of purity of fuel and working liquids are quite justified. The article presents the classification of liquid rocket fuels based on their component composition and chemical structure. The requirements to energy, kinetic, operational characteristics, ecological and economic properties of liquid rocket fuels (LRF) are given. It is established that given the far unsatisfactory environmental situation in Ukraine, the use of kerosene as a rocket fuel is relevant for our country today in comparison with heptyl rocket fuel. Jet fuels T-1, T-6, T-8B are well suited for domestic space production, but they are not produced in Ukraine, and their purchase in Russia is currently impossible for a number of reasons. Comparative analysis has shown that the American liquid rocket fuel RP-1 in most respects is an analogue of jet fuel T-1 and T-6 and can be used for rocket carriers of Ukrainian production. Today in Ukraine the problem of development of normative documents on quality control of LRF during their storage and exploitation is not solved. In particular, there is no clear regulatory documentation for the process of refueling LRF when the temperature is low. Unlike aviation fuels, there are no regulations and other regulatory documents on the content of free and dissolved water and mechanical impurities in the LRF. One of the promising areas of rocket fuel use is the use of fuel cells. The results of the research can be applied in the field of spacecraft operation, as well as refueling infrastructure and cleanliness of rocket fuels. The results of the article can be used by chemical experts, specialists in the field of operation of refueling and storage of LRF.

**Keywords:** rocket fuels; rocket carriers; properties; refueling facilities; fuel tank; purity; fuel cell; analysis.

Трофимов И. Л., Бойченко С. В., Ландарь И. А.

## ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

*Целью работы был анализ номенклатуры товарных марок современных ракетных топлив пригодных для использования в Украине, анализ основных физико-химических и эксплуатационных свойств, технических требований к качеству ракетных топлив, проблем функционирования инфраструктуры заправки и обеспечения чистоты ракетных топлив. Представлено требования к энергетическим, кинетическим, эксплуатационным характеристикам, экологическим и экономическим свойствам жидких ракетных топлив (ЖРТ). Установлено, что учитывая далеко неудовлетворительное экологическое состояние в Украине, использования керосинов в качестве ракетных топлив на сегодня является актуальным для нашей страны по сравнению с гептиловым ракетным топливом. Реактивные топлива Т-1, Т-6, Т-8В удачно подходят для космической техники отечественного производства, но в Украине они не производятся, а их закупка в РФ на сегодня невозможна по ряду причин. Сравнительный анализ показал, что американское жидкое ракетное топливо RP-1 по большинству показателей является аналогом реактивного топлива Т-1 и Т-6 и вполне может использоваться для ракетносителей украинского производства. На сегодня в Украине не решена и не решается проблема по разработке нормативных документов по контролю качества ЖРТ при их хранении и эксплуатации. В частности, отсутствует четкая нормативная документация по процессу заправки ракет ЖРТ при низких температурах. В отличие к авиационным топливам, отсутствуют регламенты и другие нормативные документы по содержанию свободной и растворенной воды и механических примесей в ЖРТ. Одной из перспективных сфер использования ракетных топлив является использование топливных ячеек. Результаты исследований могут быть применены в области эксплуатации космических аппаратов, а также инфраструктуры заправки и обеспечения чистоты ракетных топлив. Результаты статьи могут быть применены экспертами химмотологами, специалистами в области эксплуатации средств заправки и хранения ЖРТ.*

**Ключевые слова:** ракетные топлива; ракетносители; свойства; объекты заправки; топливный бак; чистота; топливные ячейки; анализ.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2020 р.  
Прийнято до друку 23.11.2020 р.