

АНАЛІЗ АСОРТИМЕНТУ РАКЕТНИХ ПАЛИВ ТА ПРОБЛЕМ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ НА ПРИКЛАДІ УКРАЇНИ

Трофімов І. Л., Бойченко С. В., Шаманський С. Й.

Об'єктом дослідження є проблеми використання ракетних палив, їх сучасний стан та перспектива. Згадані проблеми характерні практично для усієї номенклатури товарних марок сучасних ракетних палив, придатних для використання. Це проблеми з основними фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями, технічними вимогами до якості ракетного палива, проблеми функціонування інфраструктури заправки, а також забезпечення чистоти ракетних палив. З огляду на заборону використання сильнотоксичних отруйних ракетних палив на основі азотної кислоти, виникла проблема їх заміни на менш отруйні. В багатьох країнах ця проблема поглиблюється відсутністю виробництва власних вуглеводневих ракетних палив на нафтовій основі. В цілому це призводить до виникнення гострих проблем забезпечення ракетними паливами космічних літальних апаратів і ракетноносіїв. Зокрема така проблема виникає в Україні з ракетноносійми українського виробництва.

В роботі використано комплексний підхід до оцінювання якості палива, аналіз світового досвіду, синтез результатів і ретроспективи, історико-еволюційний та логічний підхід. У результаті дослідження сформовано класифікацію рідких ракетних палив, засновану на їх компонентному складі та хімічній будові. Сформульовано вимоги до енергетичних, кінетичних, експлуатаційних характеристик, екологічних та економічних властивостей рідких ракетних палив (РРП). З огляду на незадовільний стан навколишнього середовища, використання гасу як ракетного палива на сьогодні є перспективним у порівнянні з гептиловим ракетним паливом. Реактивні палива Т-1, Т-6, Т-8В вдало підходять для космічної техніки виробництва багатьох країн, але далеко не у кожній країні вони виробляються. Закупівля ж у сусідніх країнах не завжди можлива з ряду причин. Порівняльний аналіз показує, що рідке ракетне паливо РР-1 за більшістю показників є аналогом реактивного палива Т-1 і Т-6 та цілком може використовуватися як заміник для ракетноносіїв.

Результати досліджень можуть бути застосовані в області експлуатації космічних апаратів, а також експертами хімматологами, фахівцями в галузі експлуатації засобів управління та зберігання РРП.

Ключові слова: рідке ракетне паливо, ракетноносій, об'єкт заправки, паливний бак, чистота палива, паливна комірка.

1. Вступ

Відомо, що на сьогодні дуже гостро постає питання економного й повного використання енергоносіїв, зокрема, нафти, газу, вугілля. Як відомо, нафта та

нафтопродукти становлять собою багатокомпонентні середовища [1, 2], які містять у собі важкі й легкі фракції. Наявність у нафті смол, асфальтенів і парафіну обумовлюють в ній властивість змінювати свою в'язкість при дії на неї різних факторів [2, 3]. Серед цих факторів можна виділити такі, як нагрівання, введення спеціальних добавок – інгібіторів, обробка ультразвуком, або змінним електромагнітним полем, кавітаційна обробка [4–6].

Світова практика експлуатації авіаційної та ракетної техніки накопичила величезний статистичний матеріал по відмовам бортових систем через підвищений рівень забрудненості робочих рідин. Статистика свідчить про зниження експлуатаційної надійності внаслідок забруднення робочих рідин паливних систем літаків. З цієї причини відбувається: майже 30 % усіх аварій та катастроф; до 50 % відмов авіаційних двигунів; від 20 до 40 % – гідравлічних відмов; майже 10 % відмов паливних систем. Термін роботи насосів та інших агрегатів по цій причині скорочується у 6–7 разів [3, 4]. Схожі дані наведені і у працях [5, 6]. За цими даними, 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, відомо, що чистота реактивних палив залежить не тільки від якості їх фільтрації, а й від чистоти робочих місць, чистоти миючих і технологічних рідин, ефективності очистки, промивки, контролю якості чистоти робочих агрегатів і трубопроводів. Значна частина забруднень складається з домішок, що залишились після виготовлення виробу. Це залишки від термічної та механічної обробки, підгонки та притирання, залишки абразивних паст після цих операцій.

Проблеми забезпечення якості авіаційних та ракетних палив залишаються відкритими та актуальними і на сьогодні. Високі рівні чистоти палив гарантують безпеку польотів, забезпечення надійності, збільшення технічного ресурсу агрегатів систем, внаслідок чого видатки на досягнення та підтримку необхідного рівня чистоти палив та робочих рідин цілком виправдані. Також, актуальними залишаються питання систематизації та вдосконалення методів та засобів промислової чистоти. Проблеми промислової чистоти рідин пов'язані з економією матеріальних ресурсів, охороною довкілля, покращенням санітарних умов праці.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є проблеми використання ракетних палив, їх сучасний стан та перспектива. Згадані проблеми характерні практично для усієї номенклатури товарних марок сучасних ракетних палив, придатних для використання. Це проблеми з основними фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями, технічними вимогами до якості ракетного палива, проблеми функціонування інфраструктури заправки, а також забезпечення чистоти ракетних палив. З огляду на заборону використання сильнодіючих отруйних ракетних палив на основі азотної кислоти, виникла проблема їх заміни на менш отруйні. В багатьох країнах ця проблема поглиблюється відсутністю виробництва власних вуглеводневих ракетних палив на нафтовій основі. В цілому це призводить до виникнення гострих

проблем забезпечення ракетними паливами космічних літальних апаратів і ракетноносіїв. Зокрема така проблема виникає в Україні з ракетноносійми українського виробництва. Приєднання України до двох міжнародних угод щодо скорочення та обмеження деяких видів озброєнь призвело до появи та виконання низки урядових програм. Це програми поетапного скорочення та ліквідації стратегічної зброї наземного та повітряного базування, засобів доставки та відповідної інфраструктури. Розпочалось також відновлення територій, забруднених унаслідок військової діяльності. Під час реалізації зазначених програм виникла необхідність нейтралізації об'єктів, що становлять екологічну небезпеку (ракетного озброєння, технологічного обладнання, споруд та ін.), а також компонентів ракетного палива.

Постійна увага до проблеми якості авіаційних і ракетних палив викликана багатьма факторами. За високих рівнів чистоти палив гарантується безпека польотів, забезпечується надійність, збільшується технічний ресурс агрегатів систем, в результаті чого витрати на досягнення та підтримання необхідного рівня чистоти палива та робочих рідин цілком виправдані.

3. Мета та задачі дослідження

Мета цієї роботи полягає у формуванні технічних вимог до ракетних палив для забезпечення їх чистоти і, відповідно, безпечної заправки та використання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Виконати порівняльний аналіз основних фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей існуючої номенклатури товарних марок сучасних ракетних палив придатних для використання на прикладі України.

2. Сформувати класифікацію рідких ракетних палив, засновану на їх компонентному складі та хімічній будові.

3. Сформулювати вимоги до енергетичних, кінетичних, експлуатаційних характеристик, екологічних та економічних властивостей рідких ракетних палив (РРП) для розробки нормативних документів з контролю якості РРП при їх зберіганні та експлуатації.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

На сьогодні відомо багато марок ракетних двигунів. Саме їх техніко-експлуатаційні характеристики визначають спроможність ракети-носія вивести той чи інший вантаж на орбіту. Розвиток ракетних двигунів, без сумніву, визначає загальний рівень космонавтики. Саме рідинні ракетні двигуни здійснюють доставку корисних вантажів до Міжнародної космічної станції (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 роботі буде здійснено розгляд саме 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 згорання, за основним призначенням. Рідкі ракетні

палива за способом застосування в двигунах поділяють на однокомпонентні (їх називають іноді унітарними) та двокомпонентні.

Однокомпонентні ракетні палива за хімічним складом поділять на мономолекулярні та 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 та різних одно-, дво- і трьохатомних спиртів (метилнітрат CH_3ONO_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 CH_3NO_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 та газоподібних продуктів (наприклад, гідразин N_2H_4 , етиленоксид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$, пероксид водню H_2O_2 та ін.).

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

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

- кисневі – рідкі кисень O_2 та озон O_3 , пероксид водню H_2O_2 ;
- азотні – концентрована азотна кислота HNO_3 , оксиди азоту N_2O_5 , N_2O_4 , і N_2O_3 , NO , N_2O , суміші азотної кислоти (азотний тетраоксид), тетранітрометан $\text{C}(\text{NO}_2)_4$;
- фторової – рідкі фтор F_2 та кисневі сполуки фтору, зокрема монооксид фтору OF_2 , трифторид хлору ClF_3 , пентафторид хлору ClF_5 , трифторид азоту NF_3 , перхлорилфторид ClO_3F , фторнітрат FNO_3 , тетрафторгідразин N_2F_4 та ін.;
- хлорні – рідкий хлор Cl_2 , хлорна кислота HClO_4 та оксиди хлору, зокрема Cl_2O_7 .

Ракетні палива за хімічним складом поділяють на [7]:

- водневі – рідкий та шугоподібний водень H_2 ;
- вуглеводневі – нафтового походження типу RP1, Jp-5, Jp-6, T-1 та синтетичні, як правило, у вигляді індивідуальних сполук, зокрема, циклічної будови, а також рідкі метан CH_4 і пропан C_3H_8 ; до вуглеводневих палив можуть бути віднесені і спирти – метанол CH_3OH , етанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, ізопропанол $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, фурфуріловий спирт $\text{C}_5\text{H}_6\text{O}_2$;
- гідразин – гідразин N_2H_4 та його алкілпохідні, зокрема насимдиметилгідразин $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{NH}_2$ (НДМГ), монOMETИЛгідразин $\text{CH}_3\text{N}-\text{NH}_2$ та фенілгідразин $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}-\text{NH}_2$, Аерозин-50, який є сумішшю гідразину та НДМГ у співвідношенні 1:1, гідразіназиди та ін.;
- амінні – рідкий аміак NH_3 , індивідуальні аміни, наприклад, анілін $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, етиламін – моно- $\text{C}_2\text{H}_5\text{N}-\text{NH}_2$, диетилентриамін та ін., 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 B_nH_{n+4} , наприклад, декаборан $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ і диборан B_2H_6 , дигідроборанів B_nH_{n+6} , наприклад, пентаборан B_5H_{11} та ін.;

– металовмістні – гомогенні з'єднання типу триетілалюмінію, гідридів (MH_2) і боргідридів $M(BH_4)$ алюмінію, літію та берилію (n -валентність металу) та гетерогенні металізовані суспензії зазначених металів в гідразині та вуглеводнях.

Класифікація рідких ракетних палив, заснована на їх компонентному складі та хімічній будові, представлена на рис. 1.

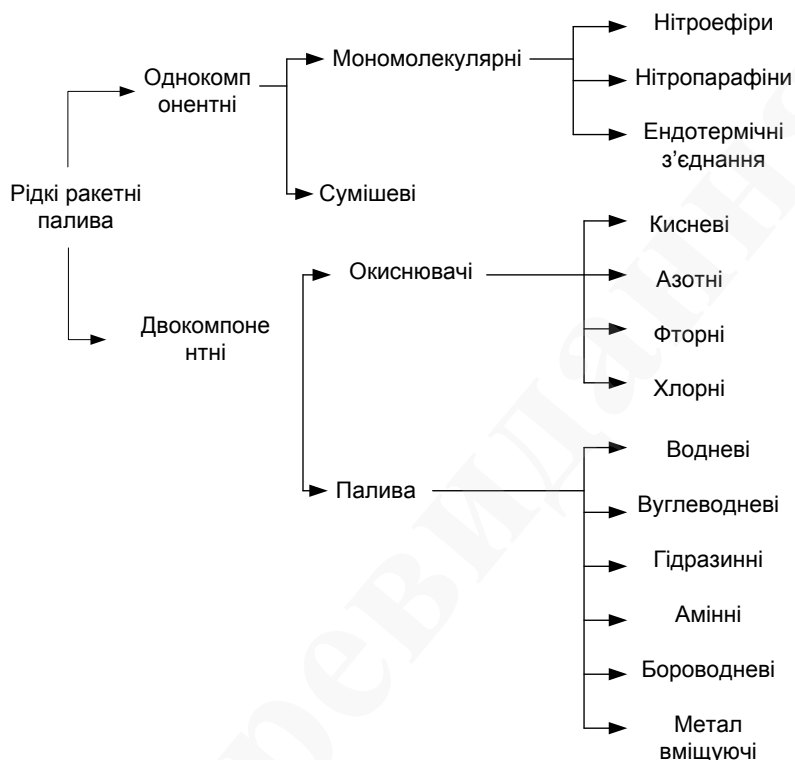


Рис. 1. Класифікація рідких ракетних палив

За своїм прямим призначенням рідкі ракетні палива поділяють на основні, пускові та допоміжні.

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

Альтернативний варіант ракетного палива пропонує автор праці [8]. У цій роботі представлено експериментальне дослідження дистиляції перекису водню для збільшення концентрації розчину з метою використання його як ракетного палива. Процес отримання концентрації, необхідної для роботи ракетного двигуна в аеродинамічній трубі, був отриманий за допомогою методу вакуумної дистиляції. Були оцінені ключові фактори, що сприяють отриманню бажаної концентрації, та порівняні результати експериментів із розрахунковими значеннями. Однак у цій роботі не показано результати натурних випробувань такого палива, а лише приводиться припущення щодо його вдалого використання на ракетноносіях першого ступеня.

Робота [9] присвячена дослідженню можливості вдосконалення властивостей горіння багатоконпонентних твердих палив шляхом застосування

методів оптимізації топології до репрезентативного об'ємного елемента (RVE) НМХ-алюмінієвого палива. Знайдено сімейство дротоподібних розчинів, що забезпечують оптимальні властивості горіння та конструкції. Оцінки продуктивності горіння показали покращення швидкості поширення опіку на 52 та 33 % порівняно з попередніми конструкціями при відповідно 20 та 200 атм. Але паливо такого типу придатне до використання у ракетноносіях наземної орбіти і не зрозуміло з опису, який імпульс тяги надасть таке паливо для виведення космічних апаратів на 1-шу космічну швидкість.

Автори роботи [10] дослідили використання Росією несиметричного диметилгідразину (UDMH). Авторами встановлено, що не все паливо на борту споживається під час запуску, а залишкове паливо має тенденцію виходити з майбутніх етапів і утворювати аерозольні хмари, які дрейфують на великих площах та забруднюють довкілля. Цим питанням дуже стурбовані жителі Канади та Гренландії, на територію яких до цих пір скидається таке токсичне ракетне паливо. Автори зазначають, що це є порушенням кількох договорів, а також міжнародного права, хоча існують альтернативні нетоксичні ракетні системи.

У роботі [11] розглянуто попередню оцінку потенційного впливу UDMH на навколишнє середовище та здоров'я людини в результаті космічної діяльності. Теоретична основа включає моделювання QSAR, ADME та PASS, а також дослідження можливої дисперсії UDMH в атмосфері, розраховану за допомогою моделі OML-Multi. Авторами було встановлено можливий вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей. Також, було зроблено висновок, що UDMH, який скидається на землю разом з першою ступінню ракетноносія становить значну загрозу як для навколишнього середовища, так і для здоров'я людини.

Авторами роботи [12] досліджено можливий вплив 1,1-диметилгідразину (гептилу) та продуктів його перетворення на здоров'я людини. Автор використали як моделі ADME, так і моделі гострої токсичності, специфічних для органів несприятливих гематологічних ефектів, серцево-судинної та шлунково-кишкової систем, нирок, печінки та легенів, а також модель, що передбачає біологічну активність сполук. Науковці передбачають, що всі досліджувані сполуки легко біодоступні через пероральний прийом і що значні кількості сполук будуть вільно доступні в системному кровообігу. Крім того, передбачається, що кілька сполук мають високу ймовірність потенційної канцерогенності, мутагенності, тератогенності та/або ембріотоксичності. Однак, змодельовані авторами впливи на живі організми на сьогодні вже підтвердженні експериментально іншими науковцями.

Робота [13] присвячена моделюванню процесів забруднення ґрунту та рослин токсичним гептиловим ракетним паливом (несиметричним диметилгідразином, UDMH) та продуктом його перетворення N-нітрозодиметиламіном (NDMA). Експерименти, проведені в лабораторних умовах, показують, що в сіро-коричневому ґрунті (незабруднені зразки ґрунту відбирали із зони космодрому Байконур) реакція перетворення UDMH в NDMA є оборотною та залежить від концентрації взаємодіючих речовин. NDMA передається ґрунтом до стебел та листя рослин дикорослих видів аерогенним шляхом. Здатність накопичувати NDMA листям і стеблами рослин більшою чи

меншою мірою залежить від видів рослин.

У роботі [14] представлені результати дослідження утворення та накопичення гептилу в диких рослинах із ґрунту, забрудненого ракетним паливом, на місцях аварійного падіння ракет-носіїв «Протон-М» у Центральному Казахстані. Експериментально доведено, що певні концентрації гептилу в сіро-бурих піщаних ґрунтах не є фітотоксичними для *Agropyron pectiniformee* (1–5 мг/кг) та *Artemisia dracunculus L.* (1–25 мг/кг). Однак це може спричинити анатомічні морфологічні зміни коренів і листя. Виявлені ознаки зростають із збільшенням дози забруднення ґрунту гептилом вище 25 мг/кг.

Як видно з аналізу літературних джерел, одним з основних видів ракетного палива на сьогодні є гептил та його похідні, хоча питання щодо його токсичності залишається відкритим. Саме тому багато праць [14–16] присвячено дослідженню його впливу на ґрунти, гідросферу, рослинний, тваринний світ та людину.

У зв'язку із специфікою використання ракетних палив та високими вимогами до них, на сьогодні дуже мало наукових робіт присвячено пошуку та дослідженню їх альтернативи. В Україні це питання взагалі майже не розглядається, з огляду на те, що такі палива Україна ніколи не виробляла, хоча ракетносії українського виробництва у 2020 році склали майже 20 % світового використання під час запуску багатотоннажних космічних апаратів Росією, США, Францією та Канадою.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що у світі до ракетних палив сформовані дуже високі вимоги щодо їх конденційності та якості. Проте проблеми заправки та чистоти ракетних палив залишаються на сьогодні відкритими та важливими. Для України також залишається відкритим питання, щодо номенклатури товарних марок сучасних ракетних палив придатних для використання, оскільки власних ракетних палив Україна не виробляє.

5. Методи дослідження

Використано комплексний підхід до оцінювання якості палива, аналіз світового досвіду, синтез результатів і ретроспективи, історико-еволюційний та логічний підхід.

Аналіз досліджень і публікацій показує, що донедавна на території України для заправки ракетносіїв використовувалось рідинне та тверде ракетне паливо. Як відомо, завдяки своїм фізико-хімічним властивостям більшу загрозу становлять рідинні палива, потрапляння яких у довкілля мало більш масовий характер, а розклад і міграція – більш інтенсивний. З них найбільш екологічно небезпечним є гідразинове ракетне пальне – НДМГ та гептил. НДМГ надзвичайно небезпечний через високу токсичність, тому віднесений Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) до речовин першого класу небезпеки [15].

Сучасні експериментальні дослідження процесів дифузії, сорбції, десорбції, фільтрації та розкладу НДМГ у різних типах ґрунтів, відібраних з місць проливів пального, показали, що гептил піддається окисненню повітрям в об'єктах навколишнього середовища з утворенням і накопиченням низки

стійких продуктів трансформації [15]. Авторами праць [15–17] встановлено, що в ґрунтах, забруднених НДМГ, утворюються диметиламін, метилгідразин, триметилгідразин, тетраметилтетразен, формальдегід, нітрозодиметиламін, метилендиметил-гідразин та інші продукти.

Характер міграції НДМГ у ландшафтах визначається його високою випаровуваністю, окиснюваністю повітрям, розчинністю у воді, високою сорбційною здатністю [17]. Розчинність НДМГ у воді дозволяє йому при потраплянні на ґрунт разом з атмосферними опадами легко досягти незахищених водоносних шарів і далі надходити до водоймищ далеко від місць виливу [15, 16]. Гептил володіє високою стійкістю в ґрунті (стабільність більше 12 місяців) і рослинах (збереження протягом більше ніж 12 місяців), добре мігрує в профілі ґрунту (від 60 до 200 см і більше). Авторами праці [15] встановлена чітка залежність поглинання НДМГ ґрунтом від вмісту в ньому органічної речовини та її міцного зв'язку з органомінеральним комплексом ґрунту.

Амінне пальне ТГ-02 (Тонка-250, самін) – ракетне пальне, яке є сумішшю технічних ізомерних ксилідинів і технічного триетиламіну [15]. Самін є отруйною та канцерогенною речовиною, яка за своїми токсикологічними характеристиками належать до третього класу небезпеки.

Значну небезпеку становлять рідинні окиснювачі ракетного пального на основі азотної кислоти – АТ та АК-27И. АТ (азотний тетраоксид, аміл) – окиснювач ракетного палива; похідна високотоксичної концентрованої азотної кислоти, яка віднесена до 1-го класу небезпечності [2, 3, 7]. АК-27И (меланж) – окиснювач пального, який є розчином азотного тетраоксиду (27 % за масою) в азотній кислоті (73 %) з додаванням інгібітору корозії – кристалічного йоду. Меланж становить значну екологічну небезпеку, оскільки є високотоксичною речовиною [15, 16]. Азотні окиснювачі, потрапляючи в ґрунтовий покрив, взаємодіють з присутніми в ґрунті лугами та утворюють суміші солей нітратної та нітритної кислот – нітратів і нітритів, які є достатньо стабільними сполуками.

Тож для підсумку, варто зауважити, що з екологічної точки зору менш шкідливими для навколишнього середовища залишаються авіаційні гаси (керосини).

Для довідки [7]: авіаційний гас, який застосовують для ракетної техніки, виробляють у Російській Федерації (РФ) для літаків дозвукової авіації за ГОСТ 10227-2013 і для надзвукової авіації за ГОСТ 12308-013. Для дозвукової авіації передбачено 5 марок палива (ТС-1, Т-1, Т-1С, Т-2 та РТ), для надзвукової – 2(Т-6 та Т-8В). Масовими паливами в даний час є палива ТС-1 (вищого та першого сортів) і паливо РТ (вищого сорту, яке на сьогодні також виробляється в Україні на Кременчуцькому нафтопереробному заводі (НПЗ)). Для РРД ракет космічного призначення довгі роки основним паливом був авіаційний гас Т-1. Зокрема, гас Т-1 був обраний як пальне міжконтинентальних балістичних ракет (МБР) Р-7, на базі якого були створені ракети космічного призначення: ракетносії (РН) «Супутник» (перші три радянських штучних супутники Землі (ШСЗ)), РН «Восток» (перший пілотований політ), РН «Блискавка» (перший супутник зв'язку), РН «Союз» (пілотовані польоти та супутники різного призначення). Застосовується головним чином для РРД РД-107 (перший ступінь, «боковинки») та РД-108

(другий ступінь, центральний блок), які з урахуванням неодноразових модернізацій та модифікацій знаходяться в серійному виробництві майже 60 років. Вибір авіаційного гасу Т-1 в якості основного пального для рідкопаливних двигунів (РПД) МБР Р-7 та всіх наступних ракет космічного призначення визначався дешевизною та доступністю Т-1, а також низькою токсичністю та простотою наземної інфраструктури.

Реактивні палива на нафтовій основі Т-1, Т-6, Т-8В також вдало підходять і для космічної техніки українського 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 вказаних марок, або закуповувати аналоги в інших державах. Зокрема, на початок 2020 в конструкторському бюро (КБ) «Південне» велися перемовини з США та Канадою про закупку ракетного палива RP-1. Тож далі у цій роботі буде проведено порівняльний аналіз існуючих ракетних палив придатних до застосування в Україні, аналіз технічних вимоги до ракетних палив та аналіз проблеми заправки та 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 [17–19].

Вимоги до енергетичних характеристик РПД:

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 апарату – 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 питома 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 в камері згорання в разі контакту його компонентів у рідкому вигляді. Виконання цієї вимоги істотно підвищує надійність двигуна та спрощує його конструкцію, тому що відпадає необхідність в спеціальній системі запалювання палива.

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

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:

1. Вимоги до палива як охолоджувача камери згорання.

2. Вимоги, обумовлені обслуговуванням і роботою двигуна.

Вимоги першої групи покликані забезпечити надійне охолодження камери двигуна:

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

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

1.3. Висока температура кипіння

1.4. 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.

1.5. 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:

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

2.2. Мінімальна корозійна активність по відношенню до матеріалів системи подачі палива рухової установки.

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

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

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

2.5. Високі вибухобезпечність і пожежобезпечність.

Вимоги до екологічних та економічних властивостей. Ці вимоги забезпечують безпеку експлуатації двигунів та їх конкурентоспроможність на світовому ринку:

1. Низька вартість.

2. Недефіцитність.

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

4. Простота виготовлення.

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

6. Компоненти палива та продукти їх згоряння не повинні бути токсичними.

7. Виробництво та 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 та знаходити оптимальні рішення. У разі формування цільової функції перш за все слід звертати увагу на виконання основних вимог.

6. Результати дослідження

У табл. 1 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 та рекомендовані до застосування в Україні (RP-1 та JP-5).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика реактивних палив придатних для ракетних двигунів різних країн виробників

Показник	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:						
10 %, °С	175	175	199	визначається обов'язково 185–210	150 175	195 220
50 %, °С	225	225	220	–	225	255
90 %, °С	270	270	246	–	270	290
– температура кінця кипіння, °С	–	–	–	max 274	282	315
– залишок, %	–	–	–	max 1,5	–	–
– втрати під час випаровування, % мас	–	–	–	max 1,5	–	–
Температура спалаху, °С	min 30	min 28	64	min 60	min 30	min 62
Температура початку кристалізації, °С	–55 max	–55 max	–45	–51 max	–60 max	–60 max
Кінематична в'язкість, мм ² /с за температури мінус 40 °С за температури мінус 34 °С	max 16	max 16	13,8	max 16,5	max 16	max 60
Теплота згорання, кДж/кг	min 43100	min 43120	48,5	min 43031	min 42900	min 42900
Концентрація фактичних смола, мг на 100 см ³ 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	Відсутні	Відсутні
Корозія на мідній пластинці	max 1	max 1	max 1	max 1	max 1	max 1
Густина, 60/16 °С	–	–	–	0,799–0,815	–	–
Густина за 20 °С, г/см ³	0,775	0,778	0,824	–	0,800	0,840

Як видно з табл. 1, наведені реактивні палива дуже близькі за основними властивостями. Що стосується ракетних палив, то гас JP-5 в цілому близький за охолоджуючими властивостями до гасу T-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 та 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 T-6, а отже цілком може використовуватися для ракетноносіїв українського виробництва. Єдиним показником, за яким реактивне паливо RP-1 програє паливам T-1 та T-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 ракетних двигунів (РД).

Як відомо, безпека експлуатації літальних апаратів з газотурбінними (ГТД) та РД значною мірою залежить від чіткої організації заправлення їх кондиційними паливами. Використання палив для ГТД у цивільній авіації України та технологія заправлення літаків чітко регламентуються інструкціями та вказівками, недотримання яких часто призводять до втрати якості палив та порушення графіку регулярності польотів, створюються передумови до льотних подій [20, 21].

Палива для ГТД та РД у процесі зберігання, транспортування й заправлення можуть змінювати свої властивості. Неконденсійні палива негативно впливають на роботу агрегатів паливних систем літаків та ракет. У паливних системах можуть вийти з ладу автоматика керування заправленням, відбутися передчасне забивання фільтрів. Особливо чутлива до забруднень паливо-регулювальна апаратура ГТД [22, 23]. У кожній робочій рідині є забруднення, або «успадковані», від сировини в процесі виробництва, або «набуті» – ті, що потрапили в рідину у результаті зношування пар тертя агрегатів, контакту з навколишнім середовищем чи з'явилися в результаті фізико-хімічних змін. В нафті, з якої виробляють практично усі традиційні палива, присутні небажані компоненти, такі як ненасичені вуглеводні, асфальто-смолисті речовини, зольні елементи, нафтенові кислоти, азотні та сірчані сполуки, тверді парафіни, церезити, вода тощо [22]. Своєчасне очищення робочих рідин паливних систем підвищує надійність і довговічність обладнання. Під час роботи на неконденсійному паливі в насосах-регуляторах реактивних двигунів можуть відбуватися заїдання прецизійних пар, а це викликає нестабільність запуску двигуна, 5 коливання числа обертів або самовідключення двигуна. Як показали дослідження авторів праці [23], лише за рахунок очищення та підвищення чистоти робочої рідини довговічність паливної системи та обладнання збільшується в 2–3 рази. Тому питання підвищення чистоти палив для ГТД є особливо перспективними.

Відомо, що забруднення в технічну рідину потрапляють:

- у разі обслуговування систем; неякісного монтажу агрегатів, гнучких шлангів і трубопроводів;
- через незакриті з'єднувальні вузли;
- внаслідок забрудненості інструментів; заправних засобів; одягу обслуговуючого персоналу;
- у разі наповнення палива в забруднені місткості;
- у разі перекачування погано промитими трубопроводами.

На складах служб авіапаливозабезпечення аеропортів забруднення в паливо потрапляють:

- у вигляді продуктів корозії місткостей та технологічного обладнання;
- через зношування перекачувальних засобів, руйнування та вимивання прокладо-ущільнювальних матеріалів:
- у вигляді пилу та вологи, що потрапляють в резервуари при великих і малих «диханнях» резервуарів;
- при наповненні засобів заправлення.

Згідно директиви ICAO Doc 9977 [24] чисте та обезводнене паливо – гарантія безпеки польоту літаків. Для авіапалив встановлені такі вимоги до вмісту води та механічних домішок:

- згідно джерел [18, 19] – повна відсутність вільної води, та наявність механічних домішок розміром не більше 5 мкм;
- згідно джерела [24] – 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. Проте чіткої директивної інформації стосовно вмісту в них води та механічних домішок в Україні немає. Під час підготовки РРП до заправки йде чітке дотримання стандартів до самих палив.

Так, для розглянутих 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 [24] – для рідких ракетних палив масова частка води має складати не більше 0,17 %;
- згідно джерела [25] – 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 та розчиненої води);
- видалення розчинених газів (дегазації);
- охолодження або нагрівання до необхідної температури перед виконанням заправних операцій на технічних або стартових комплексах космодромів. При цьому підготовка РРП відбувається за послідовним проведенням таких операцій: очищення при прийомі; зневоднення; дегазація; температурна підготовка; очищення перед видачою споживачеві.

Ракетні палива згідно розглянутим стандартам [20, 21, 25] повинні очищуватися до 5–20 мкм з дегазацією вільного газу, 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 РРП вміст розчиненої води має становити не більше 0,0001–0,0004 % за масою, що обумовлено необхідністю охолодження пального перед заправкою в паливні баки ракет до температур (–30)–(–40) °С.

Важливим показником якості охолодженого до мінусових температур вуглеводневого палива є забезпечення його прокачуваності через фільтри заправних і бортових паливних систем. Це в свою чергу вимагає зниження вмісту в паливі вільної та 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. Під час виробництва ракетних палив їх зневоднення не проводиться. Цей процес не є стадією виробництва пального, і вміст розчиненої в ньому води не регламентовано. Тому завдання зневоднення пального повинно вирішуватися виключно засобами наземної інфраструктури космодромів.

На сьогодні очищення палив від забруднень та води здійснюється такими поширеними методами, як відстоювання, фільтрування, центрифугування та хімічними методами. Відповідно до нормативних документів цивільної авіації України, очищення палив для ГТД в умовах аеропортів та на літаку здійснюється методом фільтрування. Цей метод ґрунтується на пропусканні палива через пористу мембрану, на якій затримуються забруднення та краплі води. У якості фільтрувальних перепон використовуються різні типи тканин, папір, сітка, кераміка, металокераміка тощо.

Аеродромні та бортові фільтри для очищення палив становлять собою пристрої з фільтроелементами дискового, спірального, циліндричного та інших типів. Розробленням фільтрів для очищення палив від забруднень та емульсійної води займаються у США (Millipor Filter Corp., Fram Corp.), у Великій Британії (Millipor Filter Corp., Stream Line Filter Ltd.) та інших країнах [22].

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 РРП за мінусових температур, як правило, дуже дорогі та мають максимальний ресурс до 500 тис. л.

Альтернативними є і інші відомі методи очищення технологічних рідин, робота яких заснована на ефекті взаємодії частинок забруднень з силовим полем: гравітаційним, відцентровим, магнітним, електричним та полями сил ультразвукових коливань.

Перераховані обставини вимагають пошуку, аналізу та обґрунтування раціональних технологій та режимів охолодження та підготовки ракетних палив

за вмістом у них води засобами стартових і технічних комплексів космодромів. Це є завданнями досліджень навчально-наукових лабораторій «Альтернативні моторні палива» та «Технологічні процеси у авіапаливозабезпеченні» факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Національного авіаційного університету (м. Київ, Україна).

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. До сильних сторін можна віднести виявлену можливість використання американського рідкого ракетного палива RP-1 для ракетносіїв українського виробництва, оскільки за більшістю показників воно є аналогом реактивного палива Т-1 і Т-6.

Weaknesses. До слабких сторін можна віднести:

- невирішеність проблеми з розробки нормативних документів з контролю якості ракетних палив;
- відсутність чіткої нормативної документації до процесу заправлення ракет за низьких температур;
- відсутність регламентів та інших нормативних документів щодо вмісту вільної та розчиненої води та механічних домішок в паливах.

Opportunities. Сформовані вимоги до енергетичних, кінетичних, експлуатаційних характеристик, екологічних та економічних властивостей рідких ракетних палив здатні:

- пришвидшити розробку нормативних документів з контролю якості ракетних палив при їх зберіганні та експлуатації;
- забезпечити безпеку експлуатації двигунів і їх конкурентоспроможність на світовому ринку.

Threats. Негативні наслідки використання ракетних палив на довкілля є недостатньо вивченими. Досвід свідчить, що традиційні ракетні палива, які потенційно можуть використовуватися для українських ракетносіїв, несуть істотні загрози для навколишнього середовища. Зменшення таких загроз потребує подальших досліджень у напрямку покращення фізико-хімічних властивостей використовуваних палив.

8. Висновки

1. У ході дослідження показано, що використання гасів як ракетних палив на сьогодні є екологічно безпечнішим порівняно з гептиловими РРП. Виконано порівняльний аналіз, який показав, що паливо RP-1 за більшістю показників є аналогом реактивного палива Т-1 та Т-6, а отже цілком може використовуватися для сучасних ракетносіїв. Єдиними показниками, за якими реактивне паливо RP-1 програє паливам Т-1 та Т-6 – це температура початку кристалізації та допустимий вміст сірки. Але RP-1 у свою чергу має вищу теплоту згоряння та значно меншу допустиму концентрацію фактичних смол, що дуже важливо для експлуатації РД.

2. Виконано класифікацію рідких ракетних палив, засновану на їх компонентному складі та хімічній будові. Класифікація дозволяє виявити номенклатуру товарних марок сучасних палив, найбільш придатних для

перспективного застосування в ракетній техніці. Це дасть змогу виконувати економічно та технологічно рівноцінні заміни палив з більш токсичних на менш токсичні, чим покращувати стан навколишнього середовища в районах пусків ракет.

3. Сформовано вимоги до експлуатаційних характеристик, екологічних та економічних властивостей РРП. Ці вимоги дозволять розробляти нормативні документи, що регламентують контроль якості палив при їх зберіганні, транспортуванні, та використанні.

Література

1. Pokonova, Iu. V. (1980). *Khimiia vysokomolekuliarnykh soedinenii nefti*. Leningrad: Izd-vo LGU, 172.

2. Koval, A. D., Petrochenkov, V. G. (2005). Issledovanie reologicheskikh svoistv nefti do i posle kavitatsionnoi obrabotki. *Promislova gidravlika i pnevmatika*, 2 (8), 29–32.

3. Lozitskii, L. P., Vetrov, A. M. (1992). *Konstruktziia i prochnost aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei*. Moscow: Vozdushnii transport, 735.

4. Matvieieva, O. L., Zakharchuk, P. P., Zakharchuk, V. P. (2005). Doslidzhennia zabrudnenosti ridyn hidrosystem litakiv. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, 2 (8), 36–42.

5. Wilson, P. J. (1992). Solid Contaminant profiles. *Fluid Power International*, 37 (439), 19–22.

6. Nikitin, G. A., Chirkov, S. V. (1996). *Vliianie zagriaznennosti zhidkosti na nadezhnost gidrosistem letatelnykh apparatov*. Moscow: Transport, 183.

7. Bratkov, A. A., Seregin, E. P., Gorenkov, A. F. et. al.; Bratkova, A. A. (Eds.) (1987). *Khimmotologiiia raketnykh i reaktivnykh topliv*. Moscow: Khimiia, 304.

8. Pelin, G., Stoica, C., Pelin, C.-E., Balasa, R. (2020). High concentration hydrogen peroxide for rocket fuel applications. *Incas Bulletin*, 12 (3), 151–157. doi: <http://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.3.12>

9. Kirchdoerfer, T., Ortiz, M., Stewart, D. S. (2019). Topology Optimization of Solid Rocket Fuel. *AIAA Journal*, 57 (4), 1684–1690. doi: <http://doi.org/10.2514/1.j057807>

10. Byers, M., Byers, C. (2017). Toxic splash: Russian rocket stages dropped in Arctic waters raise health, environmental and legal concerns. *Polar Record*, 53 (6), 580–591. doi: <http://doi.org/10.1017/s0032247417000547>

11. Carlsen, L., Kenesova, O. A., Batyrbekova, S. E. (2007). A preliminary assessment of the potential environmental and human health impact of unsymmetrical dimethylhydrazine as a result of space activities. *Chemosphere*, 67 (6), 1108–1116. doi: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.11.046>

12. Carlsen, L., Kenessov, B. N., Batyrbekova, S. Y. (2009). A QSAR/QSTR study on the human health impact of the rocket fuel 1,1-dimethyl hydrazine and its transformation products. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 27 (3), 415–423. doi: <http://doi.org/10.1016/j.etap.2009.01.005>

13. Bimaganbetova, A. O., Uteulin, K. R., Atygaev, A. B., Fedorina, O. A., Stepanova, Y. Y., Bekeshev, Y. C. (2020). Ecological Modelling Research of

Transformations of Unsymmetrical Dimethylhydrazine and N-Nitrodimethylamine. *Systematic Review Pharmacy*, 11 (6), 179–181. doi: <http://doi.org/10.31838/srp.2020.6.28>

14. Zhubatov, Z., Stepanova, Y., Fedorina, O., Agapov, O., Toktar, M., Atygayev, A. (2019). Experimental study of nature of plant contamination by rocket fuel – heptyl. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*, 19, 373–380. doi: <http://doi.org/10.5593/sgem2019/5.2/s20.046>

15. Movchan, Ya. I., Sharavara, V. V. (2014). Ekolohichna nebezpeka heokhimichnoi povedinky raketnykh palyv. Naukovi pratsi. *Tekhnohenna bezpeka*, 223 (221), 53–57.

16. Popova, L. S., Fedorov, L. A., Vagner, S. Ia. (2008). *Problemy ekologicheskoi opasnosti primeneniia geptila – sverkh toksichnogo raketnogo topliva. Khronika sobytii*. Perm, 45.

17. Rodin, I. A., Moskvina, D. N., Smolenkov, A. D., Shpigun, O. A. (2008). Prevrashcheniia nesimmetrichnogo dimetilgidrazina v pochvakh. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 82 (6), 1039–1044.

18. *Instruktsiia z kontroliuvannia yakosti nafty i naftoproduktiv na pidpriemstvakh i orhanizatsiiakh Ukrainy* (2007). Nakaz Minpalyvenerho Ukrainy, Derzhspozhyvstandartu Ukrainy No. 271/121. 04.06.2007. Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60829

19. *Instruktsiia z zabezpechennia zapravlennia povitrianykh suden palyvno-mastylnymy materialamy i tekhnichnymy ridynamy na pidpriemstvakh tsyvilnoho aviatsiinoho transportu Ukrainy* (2006). Nakaz Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nahliadu za zabezpechenniam bezpeky aviatsii No. 416. 14.06.2006. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0416629-06#Text>

20. *GOST R ISO 15859-7-2010 «Raketnoe toplivo na osnove gidrazina» (Chast 1: toplivo vysokoi chistoty: spetsialnoe proizvodstvo so strogim kontrolem kolichestva primesei)*. Available at: <http://vsegost.com/Catalog/50/50837.shtml>

21. *GOST R ISO 15859-5-2010. Sistemy kosmicheskie. Kharakteristiki, otkor prob i metody analiza tekuchikh sred. Chast 5. Raketnoe toplivo na osnove tetrokksida azota*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-15859-5-2010>

22. Panin, V. V., Varennyk, A. V. (2014). Ochyshchennia vid zabrudnen palyv dlia hazoturbinykh dvyhuniv. *Naukoiemni tekhnolohii*, 1 (21), 6–10.

23. Trofimov, I. L., Zubchenko, A. N., Kolomic, A. F. (2012). Development of plant for treatment of working liquids used for process purposes. *Systems and means of motor transport (selected problems)*. Rzeszow: Politechnika Rzeszowska, 295–301.

24. Ruamchat, K., Thawesaengskulthai, N., Pongpanich, C. (2017). Development of Quality Management System Under ISO 9001:2015 and Joint Inspection Group (JIG) for Aviation Fuelling Service. *Management and Production Engineering Review*, 8 (3), 50–59. doi: <http://doi.org/10.1515/mper-2017-0028>

25. *ISO 15859-7:2004 "Space systems – Fluid characteristics, sampling and test methods – Part 5: Nitrogen tetroxide propellants*. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15859:-5:ed-1:v1:en>