

О. В. ЗОЛОТЬКО¹, О. Є. ЗОЛОТЬКО¹, О. С. АКСЬОНОВ^{1,2}¹ Дніпровський національний університет імені О. Гончара, Дніпро, Україна² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»», Дніпро, Україна

ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ МЕТОДІВ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ЗАРЯДІВ ВИВЕДЕНИХ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТВЕРДОПАЛИВНИХ РАКЕТ

Предметом вивчення в статті є процеси, які відбуваються при утилізації ракет твердого палива, методи утилізації та критерії вибору ефективного методу утилізації. **Метою** є виявлення найбільш значущих критеріїв, які визначають вибір ефективного методу утилізації зарядів виведених з експлуатації твердопаливних ракет. **Завдання:** розглянути ризики техногенного впливу процесу утилізації твердопаливних міжконтинентальних балістичних ракет на навколишнє середовище, пов'язані з викидами до атмосфери шкідливих речовин, розлітанням осколків, виникненням ударної повітряної, сейсмічної та солітонної хвилі; аналіз переваг та недоліків існуючих способів знищення й утилізації твердопаливних зарядів ракетних двигунів; експертна оцінка критеріїв вибору методів утилізації; апріорне ранжування критеріїв. У якості **методу** рішення поставленої задачі обраний метод апріорного ранжування. Отримані такі **результати**. Ступінь узгодженості висновків експертів оцінено за допомогою коефіцієнта конкордації. Здійснено перевірку гіпотези про значущість коефіцієнта конкордації на основі порівняння розрахованого значення коефіцієнта конкордації з табличним при заданих величинах рівня значущості та числі ступенів вільності. Виявлені найбільш значущі фактори, які слід враховувати при виборі методу утилізації (економічна ефективність; можливість повторного використання палива, яке вилучається; технологічність; ймовірність виникнення аварійних ситуацій при реалізації методу; екологічна безпека; енергоємність), та фактори, які можна виключити з подальшого аналізу (необхідність у додаткових спеціальних системах, ступінь освоєння методу). **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному: проведена формалізація та математична обробка апріорних даних про предмет дослідження; дана порівняльна оцінка ступеню впливу різних критеріїв на відомі та перспективні методи утилізації зарядів твердого палива ракет. Сукупності значущих критеріїв вибору за попередньою оцінкою найбільш повно відповідає метод криогенного вимивання, застосування якого дозволяє використовувати вилучені із зарядів твердого палива та подрібнені речовини для підвищення характеристик сучасних детонаційних двигунів, покращення характеристик технологічних процесів нанесення спеціальних тугоплавких покриттів, а також для організації високоефективних процесів спалювання у детонаційному режимі палива з отриманням теплової та електричної енергії.

Ключові слова: утилізація; твердопаливні заряди ракетних двигунів; експертна оцінка; критерії вибору; апріорне ранжування; ранг; детонаційні двигуни.

Вступ

Виведені з експлуатації міжконтинентальні балістичні ракети (МБР) твердого палива представляють собою пожежно- та вибухонебезпечні об'єкти з високим рівнем техногенної небезпеки для населення [1]. Ракетні двигуни твердого палива МБР оснащені вибухопожежонебезпечними речовинами з обмеженими термінами придатності підкласів 1.1 (речовини і вироби, які характеризуються небезпечною вибуху масою, тобто такого вибуху, який практично миттєво поширюється на весь вантаж) та 1.3 (речовини і вироби, які характеризуються пожежною небезпечною, під час їхнього горіння виділяється значна кількість променистого тепла) [2].

У випадку виникнення аварійних ситуацій ризик техногенного забруднення навколишнього середовища стає загрозливо високим. За даними [3] при аварії однієї ступені спорядженого корпусу двигуна (СКД) в атмосферу викидається більше 2,3 млн л токсичних речовин та створюється зона негативного впливу радіусом від 40 км до 80 км. Радіус зони найбільшого розлітання осколків досягає 2 км, радіус зони сейсмічного впливу перевищує 5 км, солітонні хвилі розповсюджуються у зоні радіусом більше 12 км, а небезпечна відстань від впливу ударної повітряної хвилі перевищує 15 км.

В Україні витрати, пов'язані із зберіганням знятих з озброєння твердопаливних ракет, складають вагомую частку регіонального та державного

бюджету. Основними методами знешкодження зарядів виведених з експлуатації твердопаливних ракет є їх утилізація та знищення. Економічно обґрунтованим рішенням є утилізація, яка на відміну від знищення передбачає переробку хімічних речовин, які входять до складу палива, з метою їхнього подальшого корисного використання [4].

Відповідно до [5] вибір варіанту утилізації повинний враховувати:

- 1) можливість повторного використання окремих вузлів, агрегатів, речовин та матеріалів;
- 2) тривалість процесу;
- 3) вартість виконання робіт;
- 4) залучення підприємств, установ та організацій, здатних виконати роботи та забезпечувати екологічну безпеку та вимоги законодавства про охорону навколишнього природного середовища.

1. Матеріали та методи дослідження

Запропоновані різні способи утилізації компонентів ракетного палива [6]. Найбільш поширеними методами вилучення або знищення зарядів РДТП є спалювання або підривання палива та вилучення твердого ракетного палива (ТРП) шляхом гідродинамічного вимивання, механічної обробки, хімічної деструкції, криогенного руйнування. На стадії дослідно-конструкторських розробок знаходяться методи біодеструкції палива та його розкладання парою з надкритичними параметрами. Розглянемо основні переваги та недоліки зазначених методів.

У тих випадках, коли утилізація з вагомими причин є неможливою, застосовують ліквідаційні методи підриву та спалювання зарядів твердого палива. При спалюванні або підриванні дефектних зарядів і зарядів із понаднормативним терміном зберігання існує висока ймовірність аварій з подальшими важкими наслідками для навколишнього середовища [7]. Зміни фізико-хімічних властивостей зарядів після їхнього довготривалого зберігання можуть призвести до переходу пошарового дефлаграційного режиму горіння ТРП в детонаційне. Методу спалювання притаманні значні капітальні витрати, пов'язані з будівництвом полігонів та систем очищення і поховання відходів. До того ж процес спалювання необхідно проводити з обов'язковим очищенням викидів від токсичних продуктів згоряння, які утворюються при недостатній кількості кисню, до нормативів екологічної безпеки. При підриванні ТРП унаслідок виникнення режиму нестійкої детонації можливий розкид фрагментів заряду і корпусу на значній території з утворенням вторинних джерел забруднення. Отже, метод спалювання або підривання зарядів твердого палива характеризується рядом негативних факторів [6]:

- викидами до атмосфери високотемпературних шкідливих газів (при спалюванні сумішевого твердого палива – хлору, хлористого водню, окисів алюмінію, окису вуглецю та ін.), а також твердих частинок пилу;
- забрудненням ґрунтів та водою твердими продуктами згоряння;
- виділенням шкідливих речовин при неповному згорянні броньованого та теплозахисного покриттів, манжет та органопластикового корпусу РДТП;
- розповсюдження ударних та сейсмовибухових хвиль;
- світловий та шумовий ефекти.

Метод механічного вилучення твердого палива передбачає сегментацію корпусу ракети шляхом його розрізання та характеризується підвищеним рівнем пожежо- та вибухонебезпечності. Але він має найкращі економічні показники порівняно з іншими методами. До того ж при застосуванні методу механічної дезінтеграції зарядів твердого палива шкідливі викиди до навколишнього середовища є мінімальними. Сегментація може здійснюватися ультразвуковим, електроіскровим, електронно-променевим, лазерним та ін. методами, а також дуговим, кисневим (газовим) різанням, різанням плазмовим струменем та за допомогою спеціальних машин.

Метод гідродинамічного вимивання [8], який переважно використовується на підприємствах США та Європи для планового виведення з експлуатації твердопаливних ракет, має високу енергоємність та потребує подальшого очищення забрудненої водорозчинними компонентами палива рідини. Наявність значних об'ємів забрудненої окислювачами на основі хлору води, потребує застосування спеціальних водоочисних систем. Разом з тим, використання продуктів утилізації вилученого гідровимиванням ТРП при виготовленні нових виробів та промислових вибухових речовин має вагомий економічний ефект. Основними негативними факторами методу гідровимивання зарядів є такі [9]:

- забруднення технологічної води розчинними компонентами та твердими частинками палива, що потребує організованого водообміну з періодичним очищенням забруднених вод (маса забруднених технологічних вод майже у десять разів перевищує масу заряду, який спалюється);
- виділення у певній кількості аміаку і водню;
- небажаний вплив на довкілля під час утилізації чи спалюванні вилучених фрагментів твердого палива.

При застосуванні в установках для гідророзмиву поряд з водою струменів рідкого аміаку та/або вуглекислоти екологічні характеристики процесу

суттєво покращуються. Гідромеханічний метод порівняно з механічним є більш складним, але й більш безпечним.

Є позитивний досвід застосування рідкого азоту для видалення зарядів твердого палива з корпусу двигуна. Азот подають під високим тиском у вигляді спрямованих струменів. Метод криогенного вимивання є недостатньо відпрацьованим, потребує розрізання та доочищення корпусу від залишків твердого палива. Використання криогенного обладнання високої вартості для отримання, транспортування та зберігання кріоагента збільшує витрати на утилізацію.

Методу хімічної деструкції властиві такі негативні фактори: виділення легколетючої пари органічних розчинників, що застосовують у технологічному процесі та потрапляння до атмосфери й у стічні води шкідливих речовин, які утворюються у процесах деструкції палива, регенерації його компонентів та знищенні шламу.

При утилізації зарядів РДТП повинна дотримуватися як виробнича, так і екологічна безпека [9]. Виробнича безпека жорстко регламентується правилами роботи з вибуховими речовинами та компонентами ракетного палива, відповідними інструкціями, посібниками, вказівками з техніки безпеки та охорони праці. Питання забезпечення екологічної безпеки при реалізації різних технологій утилізації регламентовані меншою мірою. Основна відмінність методів ліквідації (підрив, спалювання та ін.) від методів утилізації полягає у тому, що в останньому випадку вплив на навколишнє середовище може спостерігатися лише при виникненні аварійних ситуацій (несанкціоноване спрацювання двигуна або детонація заряду твердого палива) у вигляді залпових викидів забруднюючих речовин у довкілля. Тому необхідно розглядати вплив різних технологій вилучення зарядів з корпусів РДТП на навколишнє середовище при штатних режимах проведення утилізації та в умовах виникнення аварійних ситуацій. У штатних режимах можуть спостерігатися викиди повітря з парами вибухових речовин, виділення в атмосферу шкідливих продуктів згоряння, забруднення водного басейну промисловими та технологічними стоками, забруднення ґрунту небезпечними твердими частинками та рідкими компонентами. При вибуху та пожежі можуть бути знищені не тільки матеріальні цінності, також може постраждати працюючий персонал. При порушенні режимів експлуатації очисних та вентиляційних споруд, фільтруючих установок відбувається забруднення довкілля шкідливими речовинами.

При виборі методу утилізації необхідно враховувати цілу низку факторів, до числа яких належать фізико-хімічні властивості твердого ракетного пали-

ва та продуктів його переробки, їх хімічну та термічну стійкість, чутливість до різного роду впливів (удар, нагрівання, тертя, підвищення тиску та ін.), які здатні ініціювати детонацію або вибухові перетворення.

Складна науково-технічна проблема підвищення ефективності утилізації РДТП може бути успішно вирішена на основі детального аналізу критеріїв вибору методу утилізації, які повинні враховувати техніко-економічні, екологічні, законодавчо-правові та певною мірою наявні соціально-політичні й гуманітарні аспекти. При остаточному виборі методу утилізації необхідно здійснювати екологічну оцінку впливу об'єкту утилізації на стан довкілля з урахуванням сумарного впливу вже існуючих на території розміщення підприємства з утилізації інших виробництв зі шкідливими та небезпечними факторами односпрямованої та адитивної дії.

2. Результати та обговорення

Підсумовуючи результати попереднього аналізу, виділимо критерії, які впливають на вибір методу утилізації:

1. Сумарні витрати, пов'язані з будівництвом полігонів для здійснення процесу знешкодження, утилізації, переробки або поховання відходів.
2. Технологічність (складність реалізації технологічного процесу та його тривалість), підвищені вимоги до кваліфікації персоналу, який здійснює технологічний процес утилізації.
3. Ступінь освоєння методу (достатня чи недостатня апробація).
4. Можливість утворення вторинних джерел забруднення.
5. Ймовірність виникнення аварійних ситуацій при реалізації методу.
6. Виробнича безпека.
7. Екологічна безпека.
8. Енергоємність.
9. Економічна ефективність.
10. Можливість повторного використання палива, яке вилучається.
11. Адитивний ефект (внесення нових забруднень до вже існуючих на даній території).
12. Необхідність у додаткових спеціальних системах (системи очищення викидів у атмосферу та стічних вод).

Формалізуємо задачу вибору введенням функцій відгуку (методи утилізації) та факторів (критерії вибору). Порівняльну оцінку ступеню впливу різних факторів на функції відгуку виконаємо методом апіорного ранжування [10]. Ступінь впливу кожного з факторів будемо оцінювати за рангом. Резуль-

тати експертної оцінки значущості факторів (рангів) наведені у таблиці 1.

Ступінь узгодженості висновків експертів оцінюємо за допомогою коефіцієнта конкордації, який визначається за формулою [7]:

$$\omega = \frac{12 \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}{m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j}; \quad (1)$$

де m – кількість експертів;

n – кількість факторів.

Значення Δ та T_j визначаються за формулами:

$$\Delta = R_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (2)$$

$$T_j = \sum_{i=1}^n (t_j^3 - t_j), \quad (3)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}, \quad (4)$$

де a_{ij} – ранг кожного i -ого фактору, приписаний j -м експертом;

t_j – кількість однакових рангів, приписаних j -м експертом.

У таблиці 2 наведено результати розрахунку величини коефіцієнта конкордації.

Значення коефіцієнта конкордації складає $\omega = 0,799$.

Здійснимо перевірку гіпотези про значущість коефіцієнта конкордації. Приймаємо рівень значущості при перевірці гіпотези $q = 0,025$. Для обраного рівня значущості та числі ступенів вільності $f = n - 1 = 11$ табличне значення критерію $\chi_T^2 = 21,92$. Розрахункове значення критерію знайдемо за формулою:

$$\chi_P^2 = m(n-1)\omega. \quad (5)$$

Отже, $\chi_P^2 = 35,17 > \chi_T^2$, і експертні оцінки можна вважати узгодженими.

Відповідно до даних таблиці 2 побудуємо апріорну діаграму рангів (рис. 1).

Як видно з діаграми, найменш значущими виявилися фактори x_3 та x_{12} . Найбільш значущими є фактори x_2 , x_5 , x_7 – x_{10} . Фактори x_1 , x_4 , x_6 , x_{11} необхідно додатково перевірити.

Висновки

Використовуючи сукупність значущих критеріїв вибору повернемося до аналізу розглянутих нами методів утилізації. Метод криогенного вимивання після відповідного доопрацювання має найкращі перспективи. Вибір такого методу найбільшою мірою задовольняє екологічним, технічним, технологічним, економічним та соціальним вимогам.

Таблиця 1

Результати експертної оцінки

Експерти	Фактори											
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
1	6	3	9	7	2	8	4	6	1	2	6	3
2	8	2	8	6	3	9	4	5	1	1	8	2
3	6,5	2	11	5	1	7	6	6	1	2	6,5	2
4	8	1	11	9	4	4	3	4	2	1	8	1

Таблиця 2

Статистична обробка результатів висновків експертів

m	Фактори												T
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	
1	6	3	9	7	2	8	4	6	1	2	6	3	36
2	8	2	8	6	3	9	4	5	1	1	8	2	12
3	6,5	2	11	5	1	7	6	6	1	2	6,5	2	24
4	8	1	11	9	4	4	3	4	2	1	8	1	36
R	28,5	8	39	27	10	28	17	21	5	6	29,5	43	108
Δ	6,67	-13,8	17,2	5,17	-11,8	6,17	-4,83	-0,83	-16,8	-15,8	7,67	21,2	
$(\Delta)^2$	44,4	191,4	294,7	26,7	140,0	38,02	23,36	0,694	283,4	250,7	58,78	448,03	1800

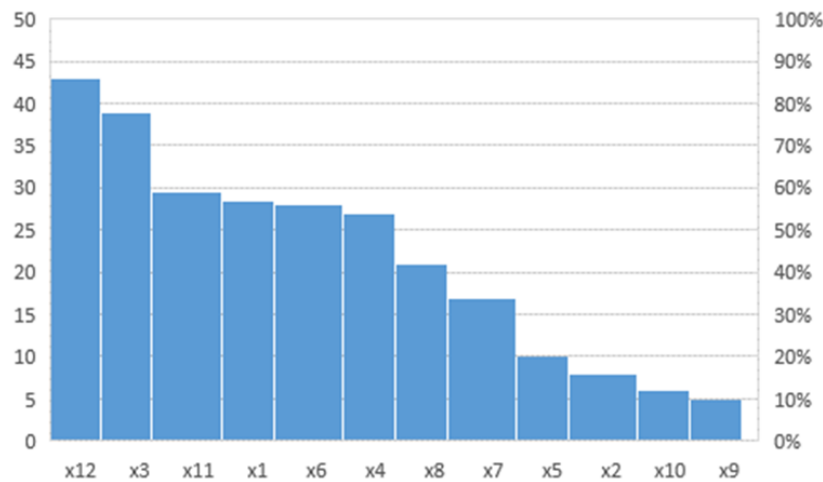


Рис. 1. Априорна діаграма рангів (за даними табл. 2)

Охолоджені до криогенних температур та подрібнені до порошкоподібного стану заряди твердого палива доцільно використовувати для підвищення характеристик сучасних детонаційних двигунів, покращення характеристик технологічних процесів нанесення спеціальних тугоплавких типів покриття, для організації високоефективних процесів отримання теплової та електричної енергії при спалюванні у детонаційному режимі компонентів палива [11].

Перспективи подальших досліджень пов'язані з плануванням та проведенням активного експерименту по застосуванню обраного методу утилізації.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. В. Золотько, О. С. Аксьонов**; формулювання мети і постановка задач дослідження – **О. В. Золотько, О. С. Золотько**; аналіз результатів дослідження – **О. В. Золотько, О. С. Золотько, О. С. Аксьонов**; формулювання висновків – **О. В. Золотько, О. С. Золотько**, написання статті – **О. В. Золотько, О. С. Аксьонов**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Wilken, J. Critical Analysis of SpaceX's Next Generation Space Transportation System: Starship and Super Heavy [Text] / J. Wilken, M. Sippel, M. Berger // 2nd International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology (HiSST). – Bruges, 2022. – 13 p. – Available at: <https://elib.dlr.de/188531/> (accessed: 11.08.2023).
2. ДСТУ 4500-3:2008. Вантажі небезпечні. Класифікація [Текст]. – [На заміну ГОСТ 19433-88 в частині класифікації; чинний від 2010-04-01]. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010. – 40 с.
3. Про утилізацію твердого ракетного палива. Звернення міської ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pavlogradmrada.dp.gov.ua/wp-content/uploads/2020/03/%D0%97%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-63-%D1%81%D0%B5%D1%81%D1%96%D1%97.pdf>. (дата звернення: 20.08.2023). – Назва з екрана.
4. Півоваров, О. А. Космічна екологія [Текст] : навч. посібник / О. А. Півоваров. – Дніпро, 2021. – 410 с.
5. Про схвалення Концепції Державної цільової оборонної програми утилізації озброєння, військової техніки та іншого військового майна (крім звичайних видів боєприпасів та компонентів рідкого ракетного палива) на період до 2017 року [Електронний ресурс] : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 5.12.2012 р. № 996-р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-2012-r#Text>. (дата звернення: 20.08.2023). – Назва з екрана.
6. Утилізація літальних апаратів [Текст] : монографія / М. В. Нечипорук, В. М. Кобрін, В. В. Вамболь, О. О. Поліщук. – Харків : Видавничий центр «ХАІ», 2014. – 306 с.
7. Голинько, В. И. Экологические последствия ликвидации смесового твердого ракетного топлива методом открытого сжигания [Текст] / В. И. Голинько, Е. Б. Устименко // Матер. міжнар. наук.-практ. конф. «Екологічні проблеми техногенно-навантажених регіонів», 14-16 травня 2008 р. / М-во освіти і науки України, Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 205-207.
8. Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions [Text] / E. A. Granovskiy, V. A. Lyfar, Yu. A. Skob, M. L. Ugrumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety. – San

Sebastian, 2007. – 15 p. DOI: 10.6084/m9.figshare.11576955.

9. Золотько, О. В. Аналіз екологічних проблем при знешкодженні зарядів вилучених з експлуатації твердопаливних двигунів [Електронний ресурс] / О. В. Золотько // Виклики та проблеми сучасної науки : зб. наук. пр. – Дніпро : [б. в.], 2023. – Том. 1. – С. 571-573. Режим доступу: <https://fti.dp.ua/conf/2023/06028-0503/>. (дата звернення: 20.08.2023). – Назва з екрана.

10. Статюха, Г. О. Вступ до планування оптимального експерименту [Текст] : навч. посібн. для студ. спец. 092502 – Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва / Г. О. Статюха, Д. М. Складанний, О. С. Бонаренко. – К. : ІВЦ «Політехніка», 2011. – 117 с.

11. Особливості конструктивних схем двигунів з імпульсними детонаційними камерами [Текст] / О. С. Золотько, О. В. Золотько, О. В. Сосновська, О. С. Аксьонов, І. С. Савченко // *Авіаційна техніка та технологія*. – 2020. – № 2 (162). – С. 4-10. DOI: 10.32620/aktt.2020.2.01.

References

1. Wilken, J., Sippel, M., & Berger, M. *Critical Analysis of SpaceX's Next Generation Space Transportation System: Starship and Super Heavy*. 2nd International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology (HiSST). Bruges, Belgium, 2022. 13 p. Available at: <https://elib.dlr.de/188531/> (accessed: 11.08.2023).

2. DSTU 4500-3:2008. *Vantazhi nebezpechni. Klasyfikatsiya* [State Standard 4500-3:2008. Dangerous cargos. Classification]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy Publ., 2010. 40 p. (In Ukraine).

3. *Pro utylizatsiyu tverdoho raketnoho palyva. Zvernennya mis'koyi rady* [About the disposal of solid rocket fuel. Address of the city council]. Available at: <https://pavlogradmrada.dp.gov.ua/wp-content/uploads/2020/03/%D0%97%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-63-%D1%81%D0%B5%D1%81%D1%96%D1%97.pdf>. (accessed 20.08.2023). (In Ukraine).

4. Pivovarov, O. A. *Kosmichna ekolohiya: navch. posibnyk* [Space ecology: a study guide]. Dnipro, 2021. 410 p. (In Ukraine).

5. *Pro skhvalennya Kontseptsii Derzhavnoyi tsil'o-voyi oboronnoyi prohramy utylizatsiyi ozbroynennya, viys'kovoyi tekhniki ta inshoho viys'kovoho mayna (krim zychaynykh vydiv boyeprypasyv ta komponentiv ridkoho raketnoho palyva) na 2013 – 2017 roky: Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 5 hrudnya 2012 r. no 996-r* [On the approval of the Concept of the State Targeted Defense Program for the

disposal of weapons, military equipment and other military property (except for conventional types of ammunition and components of liquid rocket fuel) for the period until 2017: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 5.12.2012 No. 996]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-2012-p#Text>. (accessed: 20.08.2023). (In Ukraine).

6. Nechyporuk, M. V., Kobrin V. M., Vambol' V. V., & Polishchuk, O. O. *Utylizatsiya lital'nykh aparativ* [Disposal of aircraft]. Kharkiv, «KhAI» Tsentrl Publ., 2014. 306 p. (In Ukraine).

7. Golin'ko, V. I., & Ustimenko, E. B. *Ekologicheskie posledstviya likvidatsii smesovogo tverdogo raketnogo topliva metodom otkrytogo szhiganiya* [Environmental consequences of eliminating mixed solid rocket fuel by open burning]. Mater. mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Ekologichni problemi tekhnogenno-navantazhenikh regioniv» [Materials of international science and practice conf. "Environmental problems of technologically burdened regions"]. Dnipropetrovsk, 2008. pp. 205-207. (In Russian).

8. Granovskiy, E. A., Lyfar, V. A., Skob, Yu. A., & Ugryumov, M. L. *Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions*. Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San Sebastian, Spain, 2007. 15 p. DOI: 10.6084/m9.figshare.11576955.

9. Zolot'ko, O. V. *Analiz ekolohichnykh problem pry zneshkodzhenni zaryadiv vyluchenykh z ekspluatatsiyi tverdopalyvnykh dvyhuniv* [Analysis of ecological problems during the disposal of charges removed from operation of solid fuel engines]. *Vyklyky ta problemy suchasnoyi nauky : zb. nauk. pr.* [Challenges and problems of modern science : a collection of scientific papers]. Dnipro, 2023, vol. 1, pp. 571-573. Available at: <https://fti.dp.ua/conf/2023/06028-0503/>. (accessed: 11.08.2023). (In Ukraine).

10. Statyukha, H. O., Skladanny, D. M., & Bonarenko, O. S. *Vstup do planuvannya op-tymal'noho eksperymentu: Navch. posibn. dlya stud. spets. 092502 – Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohichni protsesy i vyrobnytstva* [Introduction to optimal experiment planning: Training. manual for students special 092502 – Computer-integrated technological processes and production]. Kyiv, IVTs «Politehnika» Publ., 2011. 117 p. (In Ukraine).

11. Zolot'ko, O. Ye., Zolot'ko, O. V., Sosnov'ska, O. V., Aks'onov, O. S., & Savchenko, I. S. *Osoblyvosti konstruktyvnykh skhem dvyhuniv z impul'snymy detonatsiynymy kameramy* [Design features of engines with pulsed detonation cameras]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 2 (162), pp. 4–10. DOI: 10.32620/aktt.2020.2.01. (In Ukraine).

Надійшла до редакції 10.08.2023, розглянута на редколегії 20.09.2023

EXPERT ASSESSMENT OF THE SELECTION CRITERIA OF DISPOSAL OF DECOMMISSIONED SOLID ROCKET CHARGE DISPOSAL METHODS

*Olena Zolotko, Oleksandr Zolotko,
Oleksandr Aksonov*

The **subject** of study in this article is the processes that occur during the disposal of solid fuel rockets, methods of disposal, and criteria for choosing an effective method of disposal. This study identified the most significant criteria that determine the choice of an effective method for the disposal of decommissioned solid-fuel rocket charges. The task: to consider the risks of the man-made impact of the process of disposal of solid-fuel intercontinental ballistic missiles on the environment, associated with the emission of harmful substances into the atmosphere, the scattering of fragments, the occurrence of shock air, and seismic and soliton waves; analyze the advantages and disadvantages of existing methods of destruction and use of solid propellant charges of rocket engines; expertly evaluate the criteria for the selection of disposal methods; and a priori ranking of criteria. The **method** of a priori ranking was chosen as the method of solving the given problem. The following **results** were obtained. The degree of consistency of the experts' conclusions was assessed using the concordance coefficient. The hypothesis regarding the significance of the concordance coefficient was tested on the basis of a comparison of the calculated value of the concordance coefficient with the tabulated value at the given values of the significance level and the number of degrees of freedom. The most significant factors that should be taken into account when choosing a disposal method are identified (economic efficiency; the possibility of reusing the fuel that is removed; manufacturability; the probability of emergency situations during the implementation of the method; environmental safety; energy intensity), and factors that can be excluded from further analysis (the need for additional special systems, the degree of mastery of the method). **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows: the formalization and mathematical processing of a priori data on the subject of research was conducted, and a comparative assessment of the degree of influence of various criteria on known and promising methods of disposal of solid rocket fuel charges is given. According to the preliminary evaluation, the set of significant selection criteria is most fully met by the cryogenic washing method, the application of which allows the use of solid fuel and crushed substances extracted from solid fuel charges to improve the characteristics of modern detonation engines, to improve the characteristics of the technological processes of applying special refractory coatings, and to organize highly efficient combustion processes in the detonation mode of fuel with the production of thermal and electrical energy.

Keywords: disposal; solid propellant charges of rocket engines; expert assessment; selection criteria; a priori ranking; rank; detonation engines.

Золотько Олена Василівна – канд. техн. наук, доц. каф. безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Золотько Олександр Євгенович – канд. техн. наук, доц. каф. двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Аксьонов Олександр Сергійович – асп. каф. двигунобудування, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна; інженер I категорії, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»», Дніпро, Україна.

Olena Zolotko – Candidate of Technical Science (PhD), Associate Professor at the Department of Life Safety Activity, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: zltkelena@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2482-7574.

Oleksandr Zolotko – Candidate of Technical Science (PhD), Associate Professor at the Department of Engine Construction, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: alexaur61@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5600-500X.

Oleksandr Aksonov – PhD student at the Department of Engines Construction, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; Engineer of the First Category, Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: aksyonov.olexander@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5399-7292.