

*І. М. Неклонський, к. військ.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-5561-4945)**О. М. Смирнов, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1237-8700)**Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ КАПСУЛЬНИХ ВТУЛОК ДО АРТИЛЕРІЙСЬКИХ ПОСТРІЛІВ

Для підвищення рівня економічності, техногенної та екологічної безпеки під час утилізації боєприпасів запропоновано модернізувати існуючий технологічний процес розряджання капсульних втулок до артилерійських боєприпасів шляхом введення в технологічну лінію спеціальної установки, яка працює в автоматизованому режимі. Для підвищення ефективності процесу управління технологічним процесом під час впровадження відповідної технології запропонована динамічна модель оперативної підтримки темпів виконання робіт за рахунок коригування темпів витрачання ресурсів. Опис взаємовідносин органу управління та функціональних підрозділів, які безпосередньо будуть реалізовувати технологічну схему, здійснено на основі структурно-функціональної та мультиагентної концепцій. Система управління представлена у вигляді безлічі взаємопов'язаних і взаємодіючих агентів (активних елементів), що мають свої локальні цілі та ресурси, які узгоджені з загальною метою системи та наявними ресурсами. Визначено, що одним із найважливіших елементів у цій структурі є функціональний підрозділ, який реалізує відповідну технологію утилізації, як активний агент системи. Діяльність виконуючого елементу функціонального підрозділу описана диференціальним рівнянням. В якості інструменту для розв'язання диференціального рівняння застосовано перетворення Лапласа, що дало можливість отримати відповідну передавальну функцію. Застосування методів побудови мультиагентних динамічних моделей з урахуванням математичного визначення поняття стабільності системи за Раусом-Гурвіцем дало можливість аналітично визначити умову узгодження інерційності виконання робіт та доставки ресурсів з інерційністю реалізації запитів. Впровадження даної моделі в процес підтримки прийняття рішень щодо організації технологічного процесу розряджання капсульних втулок дозволить досягти найкращого балансу безпеки та економічності даного процесу.

Ключові слова: боєприпаси, капсульні втулки, утилізація, технологія, агент, динамічна модель, передавальна функція

1. Вступ

Збройна агресія росії проти України створила нову проблему для національної системи утилізації боєприпасів. Так, за даними Міністерства оборони України (Міноборони), 20–30 % боєприпасів у зоні бойових дій не спрацьовують, що створює значну небезпеку як для військових, так і для цивільного населення. Крім того, з введенням в дію Закону України «Про управління відходами» (№ 2320-IX) Міноборони має посилювати систему екологічного управління відходами. Така ситуація потребує зваженого підходу до процедури як знищення так і утилізації боєприпасів.

Вирішення відповідної проблеми спонукає до перегляду технологічної політики утилізації боєприпасів. Так, з метою удосконалення процедури утилізації боєприпасів та інших вибухонебезпечних предметів, зокрема, вилучених під час проведення розмінування території, передбачається залучення мобільних комплексів безпосередньо у визначених районах розмінування. Передбачається співпраця з великими оборонними концернами, такими як Lockheed Martin, Rheinmetall, а також іншими європейськими постачальниками оборонних систем щодо виробництва боєприпасів та їх утилізації.

Таким чином, проблема вирішується на урядовому рівні шляхом створення спеціальних механізмів для безпечної утилізації та переробки небезпечних боєприпасів. Відповідно, введені механізми передбачають удосконалення, модернізацію існуючих технологій утилізації.

В таких умовах особливо гостро стоїть питання щодо утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів, накопичення яких відбулось в процесі утилізації непридатних до використання боєприпасів у довоєнний період. Крім того, можливе накопичення відповідних виробів після розбирання боєприпасів виявлених у визначених районах розмінування. Відповідний процес потребує адаптації до нових умов утилізації: великі обсяги; застосування мобільних комплексів з утилізації; посилення системи екологічного управління відходами; співпраця з провідними оборонними підприємствами тощо. Це спонукає не тільки перегляду самої технологічної схеми, а й розглядати процес з позиції організаційного об'єкта управління, де важливого значення набуває завдання планування темпів витрачання ресурсів для виконання наміченого обсягу робіт з утилізації.

Таким чином, в умовах модифікації національної технологічної політики утилізації боєприпасів стає актуальною проблема, яка полягає в необхідності обґрунтування нового технологічного підходу до існуючих технологічних процесів утилізації в тому числі і з позиції проектного менеджменту.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз наукових джерел присвячених утилізації боєприпасів, які розглядають світові практики, показує стійку тенденцію щодо переходу від традиційних методів (відкрите спалювання, відкрита детонація) до більш безпечних та екологічних альтернатив. Найкращий баланс безпеки та економічності у довгостроковій перспективі забезпечують промислові технології закритого циклу. Застосування традиційних методів утилізації завжди буде необхідним для невеликої кількості боєприпасів, які стали небезпечними через надмірний вік або пошкодження, і є надто небезпечними для транспортування чи обробки альтернативними технологіями. Окрема роль відводиться використанню мобільних установок.

Так, в роботі [1] проведений аналіз шкідливого впливу так званих відкритих технологій утилізації та впровадження нових. Серед альтернативних набувають подальшого розвитку технології, де присутні спеціальні установки, принцип дії яких оснований на використанні певного типу закритого горіння або локалізованої детонації. Але управління відповідними процесами автори розглядають тільки з позиції нормативно-технічного регулювання організації робіт у сфері захисту навколишнього середовища.

Дослідження технологічних установок з утилізації стрілецької зброї [2], мобільних або модульних установок утилізації [3] стосуються певних технологічних особливостей та ефективності їх роботи. Але авторами не деталізується проблематика утилізації окремих складових артилерійських пострілів, крім того не досліджені питання щодо удосконалення системи управління відповідним процесом.

В документі [4] Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) запропоновано переглянути стандарти для відкритого спалювання/відкритої детонації (OB/OD) вибухових відходів. Акцентована увага на необхідності регуляторного посилення контролю над утилізацією вибухових відходів шляхом максимально можливого переходу на безпечніші альтернативні технології. Агентство пропонує переглянути норми, щоб зменшити обсяги вибухових відходів, які спалюються або детонуються відкритим способом, і посилити контроль за викидами. Для тих невеликих обсягів відходів, для яких OB/OD залишається єдиним безпечним способом утилізації (наприклад, через нестабільність або надмірну чутливість боєприпасів) EPA пропонує встановити нові мінімальні weapons and military equipment. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-2

нічні стандарти (Subpart Y) для установок. ЕРА пропонує нову спрощену структуру ліцензування для мобільних установок. Таким чином, пропозиції спрямовані на підвищення захисту здоров'я людини та навколишнього середовища шляхом зменшення практики ОВ/ОД та забезпечення послідовного та своєчасного впровадження безпечних, закритих альтернативних технологій. Разом з тим, конкретні технології та питання управління технологічним процесом не розглядались.

В роботі [5] автори зосереджуються на значній екологічній шкоді, яку спричиняють традиційні методи утилізації боєприпасів, та необхідності переходу до екологічно прийнятних альтернатив. Автори критикують методи ОВ/ОД через їхню високу токсичність та стійкість забруднення, а також наголошують на необхідності впровадження альтернативних технологій, що відповідають вимогам мінімізації екологічного сліду. Разом з тим, конкретні технології та питання управління технологічним процесом не розглядались.

В роботі [6] авторами запропонована технологія утилізації, яка дозволяє енергетичний матеріал, що вивільняється, включити до складу вибухових речовин, що використовуються для цивільних потреб. Технологія є альтернативою традиційній утилізації, при якій відпрацьований енергетичний матеріал спалюється в статичній печі з обробкою димових газів. Однак, незважаючи на очевидні екологічні переваги, рекомендований авторами підхід може бути не життєздатним з урахуванням того, що використання вибухових речовин, вироблених з переробленого матеріалу різних партій та специфікацій, може привести до деяких варіацій у їхній продуктивності та характеристиках безпеки. Крім того, авторами не розглядається питання управління технологічним процесом.

Стаття [7] містить огляд досвіду, отриманого під час впровадження системного підходу до управління життєвим циклом боєприпасів в Боснії і Герцеговині. Під життєвим циклом автори розглядають увесь процес від планування до закупівлі (виготовлення), управління запасами та утилізації. При цьому основна увага авторів приділена питанню управління ризиками. Це розглядається як фундаментальний компонент системи управління запасами. Представлена інтегрована система управління ризиками, яка базується на міжнародних стандартах. Разом з тим, автори акцентують увагу на взаємозв'язку між різними компонентами управління ризиками. Наводиться пояснення кожного компонента управління ризиками та методів для управління запасами. Саму процедуру управління конкретним технологічним процесом автори не розглядають.

В роботі [8] з метою впровадження нових високоефективних технологій утилізації боєприпасів і їх елементів розроблена технологія розрядження капсульних втулок способом імітації механічного спуску ударника гармати, яка дозволяє раціонально вилучати всі необхідні матеріали. Разом з тим запропонована установка розряджання не містить елементів автоматизації процесу – орієнтована на ручну працю. А дослідження процесу управління ресурсами обмежується методикою оптимального розподілу працівників по робочим місцям з урахуванням ризику виникнення аварії.

Авторами [9] розроблений поетапний технологічний процес розряджання 23 мм або 30 мм артилерійських снарядів, який забезпечує ефективну утилізацію трасуючої сполуки із корпусів. Автоматизація процесу утилізації досягається застосуванням спеціальної установки з випалювання трасуючої сполуки, яка сформована у технологічну лінію. Проведено формалізацію задачі оцінювання ефек-

тивності процесу утилізації, що дозволило оптимізувати рішення щодо управління таким процесом. Запропонований порядок розв'язання задачі оптимізації процесу управління утилізацією артилерійських снарядів для багатоетапної технологічної операції. Розв'язання передбачає вибір раціонального рішення з дотриманням принципу оптимальності, що є основою рішення задач динамічного програмування. Разом з тим, параметризація умов ефективного управління відповідним процесом зводиться до того, що під час планування багатоетапної технологічної операції необхідно вибирати управління на кожному етапі з урахуванням усіх наслідків на майбутніх етапах. А розв'язання задачі динамічного програмування процесу утилізації артилерійських снарядів надано у загальному вигляді. Тобто автори формалізують можливий вплив певних етапів технологічного процесу один на одного, але не враховують взаємодію органу управління, який керує процесом, і функціонального(их) підрозділу(ів), який(і) виконують технологічні операції.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що в даний час існуюча технологія утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів [8] не відповідає сучасним вимогам щодо безпеки та економічності і не може задовольняти сучасні потреби, які стоять перед національною системою утилізації боєприпасів. Крім того, відсутні аналітичні інструменти щодо застосування управлінських рішень з планування темпів витрачання ресурсів для виконання наміченого обсягу робіт з утилізації.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є необхідність модернізації існуючого технологічного процесу утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів до рівня, який дасть можливість, як технологічно так і організаційно, інтегрувати його в систему роботи провідних світових практик з утилізації.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення технологічного процесу утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів, який має передбачати автоматизацію окремих технологічних операцій і моделювання роботи системи управління щодо регулювання темпу виконання робіт з утилізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити поетапний технологічний процес утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів, який передбачає роботу технологічної установки з розряджання капсульних втулок в автоматизованому режимі;
- розробити динамічну модель оперативної підтримки темпів виконання робіт за рахунок коригування темпів витрачання ресурсів.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – технологічний процес утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів. Предмет дослідження – організаційно-технологічна структура процесу утилізації.

Дослідження має підтвердити гіпотезу, що знаючи існуючу технологію утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів, аналізуючи основні технологічні рішення сучасних світових практик можна модифікувати відповідну технологію шляхом введення елементів автоматизації окремих операцій. При цьому найкращий баланс безпеки та економічності даного процесу можна досягти шляхом регулювання темпів виконання робіт за рахунок коригування темпів витра-

чання ресурсів. Для опису взаємовідносин органу управління та функціональних підрозділів, які безпосередньо будуть реалізовувати технологічну схему, можна застосувати мультиагентні динамічні моделі.

Методи дослідження визначаються сукупністю вирішуваних завдань і базуються на принципах конструювання і концепціях структурно-функціонального та мультиагентного моделювання та включають методи аналізу, синтезу, математичного моделювання тощо. Застосування програмних засобів середовищ Microsoft Office Excel та Mathcad дає можливість автоматизувати процес обробки результатів дослідження.

5. Розроблення технології утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів

Технологічним об'єктом є капсульні втулки (КВ), характеристика яких наведена в табл. 1. В табл. 2 наведений перелік операцій під час утилізації капсульних втулок.

Табл. 1. КВ, що застосовуються у артилерійських пострілах

№ з/п	Найменування	Індекс капсуля-запальника (КЗ)	Вага КВ із запальною сполукою (г)	Вага запально-вальної сполуки		Вага корпусу (г)	
				марка	(г)	латунь ЛС-60	сталь Ст35-Н-8 або Ст.15
1	КВ-2У	К-011	12,04	ДРП-2	0,228	10,23	1,192
2	КВ-2	К-011	12,25	ДРП-2,3	0,32	10	1,54
3	КВ-4	54-К-001	67	ДРП-3	3,1	4,17	58
4	КВ-5	54-К-001	91	ДРП-3	1,3	8,6	69,12
5	КВ-5У	мех-м УД	91	ДРП-3	1,3	8,6	69,12
6	КВ-13 латунь	54-К-001	77,41	ДРП-2	2,7	73,98	–
7	КВ-13 сталь	54-К-001	77,41	ДРП-2	2,7	7,88	66,1
8	КВ-13У сталь	К-011	80	ДРП-2	2,9	5,71	71
9	КВ-13У латунь	К-011	80	ДРП-2	2,9	76,71	–
10	ГУВ-7 (4В2) – електрозапал вагою 0,32 г	54-К-001	87,53	ДРП-3	1,56	28,916	56
11	КВ-17 (4В3)	К-011	90,9	ДРП-3	1,4	29,81	59,3

Для проведення робіт мають застосовуватись наступні технологічні засоби: технологічний стіл – 9 шт.; автонавантажувач – 1 шт.; пакетувальник ящиків ПЯ-004 – 1 шт.; ручна тачка типу Т-0,5 – 4 шт.; рольганги ТР-6 – 1 шт.; пластинчатий транспортер ПТ-600 – 1 шт.; збірки під елементи – 8 шт.; ємність під фарбу та розчинник – 5 шт.; сертифікований інструмент для роботи з боєприпасами (пломбір, кусачки, ключ-вилка, ніж, ножиці) – 2 комплекти.

Для виконання технологічних функцій необхідно залучити підготовлений персонал (складальники боєприпасів) у кількості 14 осіб.

Для розряджання КВ, що застосовуються у артилерійських пострілах (табл. 1), пропонується спеціальна установка, модель якої представлена на рис. 1.

Установка (рис.1) змодельована в технологічну лінію та складається з пластинчатого транспортера (1), на якому на небезпечній щодо детонації відстані одна від одної зафіксовані багатоотвірні одноярусні касети (2) під КВ (3). Над транс-

портером (1) встановлена установка під захисним кожухом (4) із отвором (5) для подачі стислого повітря та входними і вихідними отворами, які перекриті шиберами (6), а під пластинчатим транспортером (1) розміщена система (7) відведення порохових газів. На виході з пластинчатого транспортера (1) встановлений контейнер (8) для збору розряджених (холостих) КВ (9).

Табл. 2. Перелік операцій під час утилізації капсульних втулок

Операція	Зміст операції
№ 1	Приймання ящиків із КВ: зняти ящики із КВ з автомобіля і укласти їх в металеву шафу на пункті робіт
№ 2	Контроль КВ на допустимість до розряджання: ящик із КВ подати до місця відкривання ящиків та виконати заходи: розрізати ножицями по металу стрічку пакувальну і зняти її з ящика; вилучити із замків стопорні вилки і укласти їх в збірки; зняти пломби; відкрити замки і кришку ящика; вилучити КВ з ящиків та передати їх на технологічний стіл; звірити з обліковими документами: марку партію, рік виготовлення; візуально визначити ступінь небезпечності КВ (пошкодження) на розряджання
№ 3	Підготовка до розряджання КВ: в кожне гніздо (18 шт.) касети (сталеві пластина ПТ-600 завтовшки 8–10 мм з отворами Ø 28 мм, для КВ-2У – Ø 10 мм) вкласти рівно і без перекосів по одній КВ обов'язково капсулем-запальником вгору
№ 4	Подача КВ для прострілу: за допомогою ПТ-600 КВ подати до місця їх прострілу – в установку для розряджання
№ 5	Розряджання КВ за допомогою спеціальної установки для розряджання: операцію розряджання КВ проводити автоматично під захисним кожухом за допомогою спеціального пробійника
№ 6	Контроль розряджання КВ: розряджені КВ за допомогою ПТ-600 подаються до місця накопичування у спеціальну збірку – тару. КВ, які не спрацювали (дали осічку) підлягають повторному розряджанню
№ 7	Вилучення холостих КВ: взяти контейнер з розрядженими КВ за спеціальні ручки і перенести до місця пакування
№ 8	Пакування холостих КВ: поставити підготовлений порожній ящик на технологічний стіл; очистити КВ від золи, розсортувати його по вигляду і перевірити на безпеку і повноту згорання запальної сполуки; скласти у підготовлене закупорювання розряджені КВ (однакової кількості) не більше 30 кг; провести контрольний огляд укладання КВ у ящик та покласти пакувальний лист де вказано – марка КВ, кількість (вага), підпис пакувальника; закрити кришку ящика з КВ і закріпити замками; установити стопорні вилки на замки; опломбувати ящик з КВ; нанесення маркування на дерев'яний ящик; ящики з КВ складати у стопку (у стопці має бути не більше 4–6 ящиків); за допомогою тачки (Т-0,5) відвозити ящики з холостими КВ до місць тимчасового зберігання. Не спрацьовані КВ після повторного прострілу підлягають пакуванню в окремі ящики для утилізації шляхом випалювання
№ 9	Видача холостих КВ: ящики з КВ переміщуються до місць постійного зберігання
Допоміжні операції	Різання паперу і просочення її парафіном
	Сортування парафінованого паперу (б/в)
	Нарізання дроту для пломбування на шматки необхідної довжини
	Виготовлення трафаретів і ярликів

Всередині захисного кожуху (4) (рис. 2) встановлена пластина (11) із металевими штирями (12) (пробійниками) – 18 шт., обладнана пружинним механізмом (10), кількість і розміщення яких співпадає з кількістю та розміщенням КВ в касеті (2), а герметичність пневмоприводу (не зображений на рис. 2) забезпечує гумовий ущільнювач (13). У захисному кожуху (4) встановлений кінцевий датчик

(14) переміщення касет (2) із КВ, а також датчики (15) та (16) часу спрацювання пневмоприводу та переміщення пластини (11) із пробійниками відповідно.

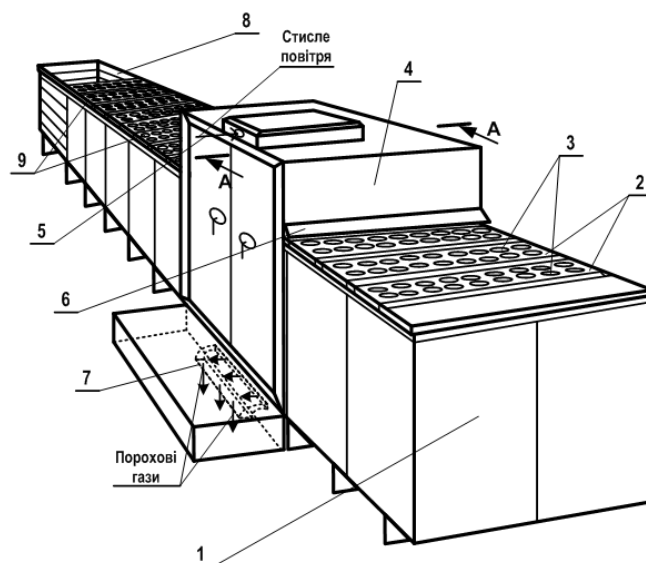


Рис. 1. Установа для розрядження КВ: 1 – транспортер (ПТ-600); 2 – касета з отворами (18 шт.); 3 – КВ (18 шт.); 4 – захисний кожух; 5 – отвір для подачі стислого повітря; 6 – шибер; 7 – відведення порохових газів; 8 – контейнер з розрядженими КВ; 9 – касета з розрядженими КВ (18 шт.)

Функціонує установа в автоматизованому режимі наступним чином. На транспортері (1), що подає (ПТ-600), закріплюються з рівними кроками подання під захисний кожух (4) касети (2), а в їх гніздах розміщуються відібрані для розрядження КВ (3). Запуск транспортера (1) забезпечує переміщення касет (2) з КВ з рівним шагом під захисний кожух (4). При цьому послідовність роботи установки регулюється автоматично за сигналам датчиків (14), (15), (16) таким чином, що після проходження касети (2) через шибер (6) на вході захисного кожуху (4) спрацьовує кінцевий датчик (14) переміщення касет, і касета (2) із КВ (3) стає під пластину (11) напроти штирів (12) та над системою (7) відведення порохових газів. Одночасно із спрацьовуванням кінцевого датчика (14) спрацьовує датчик (15), що із встановленою затримкою у часі (декілька секунд) формує короткочасний сигнал на включення пневмоприводу, який, в свою чергу, утворює імпульс тиску (декілька атмосфер) стислого повітря через отвір (5) для швидкого переміщення пластини (11) із металевими штирями (12) до касети (2) під захисним кожухом (4) і механічного удару штирів (12) по капсулях-запальників КВ в гніздах касети (2) для їх розрядження. Після удару штирів (12) по капсулях-запальників (простріл КВ) пружинний механізм (10) повертає пластину (11) із металевими штирями (12) у початкове положення. При цьому спрацьовує датчик (16) переміщення пластини (11) і формує сигнал на пуск транспортера (1), який подає наступну касету (2) із КВ (3) в захисний кожух (4) під пластину (11) зі штирями (12) для подальшого повторення циклу розрядження, а касети із розрядженими КВ (9) змішуються до контейнеру (8) після проведенням візуального контролю на повноту розрядження. Техногенна та екологічна безпека гарантується здійсненням прострілу КВ пробійником під захисним кожухом (4), ізоляцію якого після входу та виходу касет (2) забезпечують шибери (6) (вхідний та вихідний), а порохові гази, що утворюються під захисним кожухом (4), через систему (7) постійно видаляються примусовою витяжною вентиляцією (не зображена на рис. 1 та рис. 2).

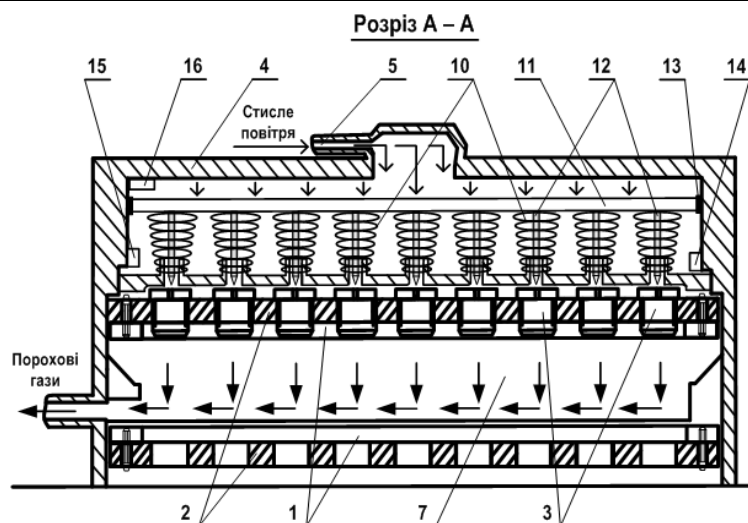


Рис. 2. Захисний кожух установки для розрядження КВ в розрізі: 1 – транспортер (ПТ-600); 2 – касета з отворами (18 шт.); 3 – КВ (18 шт.); 4 – захисний кожух; 5 – отвір для подачі стислого повітря; 6 – шибєр; 7 – відведення порохових газів; 8 – контейнер з розрядженими КВ; 9 – касета з розрядженими КВ (18 шт.); 10 – пружина; 11 – пластина пробійника; 12 – металевий штир пробійника (18 шт.); 13 – гумовий ущільнювач; 14 – кінцевий датчик; 15, 16 – датчики часу спрацювання пневмоприводу

Устаткування й оснащення, що використовуються в роботі, має бути справними і налаштованим на конкретну номенклатуру КВ, що розряджаються. Висота установки столів, конвеєрів і рольгангів у зоні робочих місць не повинна перевищувати 0,8 м. Столи повинні мати борти висотою не менше 50 мм. Усі матеріали, які застосовуються при роботі з КВ мають пройти вхідний контроль відповідно до ДСТУ ISO 9001:2009. Матеріали на робочих місцях повинні знаходитися в типових, пристосованих ємностях.

Приміщення цеху (пункту розрядження), в якому проводяться роботи з боеприпасами, повинні бути не нижче I ступеня вогнестійкості. Особливо відповідальними є операції № 2, 5. Роботу необхідно планувати таким чином, щоб було неможливе одночасне знаходження на робочому місці, де відбувається розрядження КВ: більше 18 шт. капсульних втулок КВ-4, КВ-5(У), КВ-13(У), КВ-17, ГУВ-7; більше 5 кг за масою порошу (запалювальної сполуки).

6. Розроблення моделі оперативної підтримки темпів виконання робіт

Для дослідженні організаційної структури системи управління процесом утилізації доцільно використати структурно-функціональну [10] та мультиагентну [11, 12] концепції. Система управління представляється у вигляді безлічі взаємопов'язаних і взаємодіючих агентів (активних елементів), що мають свої локальні цілі та ресурси, які узгоджені з загальною метою системи та наявними ресурсами.

Одним із найважливіших елементів у цій структурі є функціональний підрозділ (ФП), який реалізує відповідну технологію утилізації, як активний агент системи. При чому, ФП може розглядатись і як самоврядний агент. Тобто він може самостійно формувати, виконувати та контролювати свої дії щодо реалізації ресурсів, спрямованих на виконання наміченого обсягу робіт. Тоді процес утилізації, як об'єкт управління, трансформується на певний обсяг робіт, після виконання якого буде виконане поставлене завдання. Саме ФП як автономний самоврядний агент буде системою управління, що складається з таких елементів, як плануючий (ПЕ), прямого управління (ЕПУ), керуючий (КЕ), виконуючий (ВЕ), weapons and military equipment. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-2

аналізу та інформування (ЕАІ). Структура управління процесом виконання робіт у ФП буде будуватись за комбінованим принципом: поєднання прямого управління із замкнутим управлінням за принципом зворотного зв'язку. Як елементи-агенти тут виступають як окремі особи, так і група людей, оснащених відповідними технічними засобами.

В такому випадку діяльність ВЕ можна описати наступним диференціальним рівнянням:

$$T_{0i} \cdot \frac{d^2 V_i(t)}{dt^2} + \frac{dV_i(t)}{dt} = k_{0i} \cdot \left[T_i \cdot \frac{\dot{R}_i \cdot (t - \tau_i)}{dt} + R_i \cdot (t - \tau_i) \right] + f(t), \quad (1)$$

де T_{0i} – постійна часу, що відображає інерційність переходу від одного темпу виконання робіт до іншого; T_i – постійна часу, що відображає такі характеристики діяльності ВЕ як рівень професіоналізму робітників, використання сучасних технологій та високопродуктивного обладнання, рівень організації робіт; τ_i – чисте запізнення в часі, пов'язане з тимчасовими витратами на аналіз ситуації, характеру та ефективності виконуваних робіт, на передислокацію людей і техніки; k_{0i} – коефіцієнт, що відображає вплив темпів витрати ресурсів на виконання робіт; $f(t)$ – вплив на об'єкт управління різних факторів, що заважають виконанню робіт (складні природні умови, брак ресурсів, поломка техніки, хвороба і травми людей і т. д.) і сприяють зниженню темпу виконання робіт.

Застосовуючи перетворення Лапласа [13] при нульових початкових умовах, отримаємо передавальну функцію [14, 15] у вигляді:

$$W_{0i}(s) = \frac{k_{0i} \cdot (T_i s + 1)}{s \cdot (T_0 s + 1)} \cdot e^{-\tau_i s}. \quad (2)$$

Якщо до процесу утилізації залучено декілька ФП, то систему управління необхідно розглядати як взаємодію органу управління (центру управління – ЦУ) з відповідними ФП. Тоді процес організації утилізації необхідно розглядати з позиції організаційного об'єкта управління, для переведення якого з поточного у стан ефективної роботи потрібно здійснення низки організаційних заходів направлених на виконання деякого обсягу робіт із необхідним темпом.

Тоді концепція взаємодії ЦУ із ФП зводиться до наступного:

- ЦУ управляє ФП як активними агентами шляхом планування та розподілу ресурсів та темпів їх поставок між ними за їх запитами;

- ЦУ забезпечує доставку ресурсів та визначає робочу зону для діяльності ФП;

ФП реалізують видані ресурси на виконання запланованого обсягу робіт з максимальною ефективністю, складають звіт (дають інформацію) про витрачені ресурси та роблять новий запит. При цьому, кожний ФП самостійно визначає для себе запити ЦУ на планові темпи витрати ресурсів залежно від: потрібних темпів робіт; темпів зростання постачання виробів для утилізації; наявного обсягу ресурсів.

Надалі будемо вважати, що кожне ФП використовує цілком певні типи ресурсів: трудові, матеріальні, технічні, технологічні, паливно-енергетичні, інформаційні тощо. З тієї чи іншої причини може виявитися, що витрата окремих ресурсів

на утилізацію буде перевищувати заплановані, тобто ресурси витрачались неефективно. Для ЦУ важливо прогнозувати цю ситуацію і будь-коли точно знати, як витрачає ресурси кожний ФП. Тому дуже важливого значення набувають завдання планування темпів витрачання ресурсів.

Розглянемо окремі етапи взаємодії ЦУ з ФП та опишемо цю взаємодію аналітично.

Нехай над утилізацією працюють n ФП, які виконують n обсягів робіт $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ з відповідними темпами. При цьому для роботи ФП планується використовувати m видів ресурсів $\{R_1^0, R_2^0, \dots, R_m^0\}$, які поставляються теж з відповідними темпами. Вирішення даної задачі має важливе значення для координації дій ФП на рівні планування.

Тоді рівняння для планових темпів виконання робіт у матрично-векторній формі буде мати наступний вигляд:

$$\dot{V}^0 = A \cdot \dot{R}^0, \quad (3)$$

де $A = [a_{ij}]$ – матриця коефіцієнтів планових темпів поставки n видів ресурсів для виконання робіт; V^0, R^0 – матриці планових темпів виконання робіт і поставки ресурсів відповідно.

ФП завжди має прагнути виконання умови (3). Вважатимемо, що в результаті транспортування ресурсів забезпечується точна підтримка темпів доставки ресурсів до ФП, тобто справедливе зворотне співвідношення

$$\dot{R}^0 = A^{-1} \cdot \dot{V}^0. \quad (4)$$

Реальний темп виконання робіт визначатиметься співвідношенням

$$\dot{V} = B \cdot \dot{R}^0, \quad (5)$$

де $B = [b_{ij}]$ – матриця коефіцієнтів фактичних темпів виконання робіт, яка відображає ефективність використовуваної технології підтримки темпів; V – фактичний темп виконання робіт.

На практиці найчастіше фактичний темп виконання робіт нижче запланованого, тобто $V < V^0$ з ряду об'єктивних причин: низька ефективність виконання робіт, технологічні збої, слабка організація робіт і т. д. З цієї причини $B < A$. Отже, для виконання робіт з запланованим темпом потрібен більш високий темп постачання ресурсів.

Для цієї мети в системі управління має бути передбачений канал для вироблення додаткових планових темпів постачання ресурсів ΔR_p . Ця корекція може бути здійснена, наприклад, пропорційно недобраним темпам виконання робіт, тобто пропорційно неузгодженості (помилці) за темпами.

Рівняння для додаткових планових темпів постачання ресурсів матиме такий вигляд

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}^0 &= A \cdot \left(\dot{R}^0 + \Delta \dot{R}_n^0 \right); \\ \Delta \dot{R}_n &= C \cdot E \dot{v}; \\ E \dot{v} &= \dot{V}^0 - \dot{V}, \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де $C = [c_y]$ – вектор наявних у ЦУ обсягів всіх видів ресурсів.

Структурну схему підтримки планових темпів виконання робіт представлено на рис. 3.

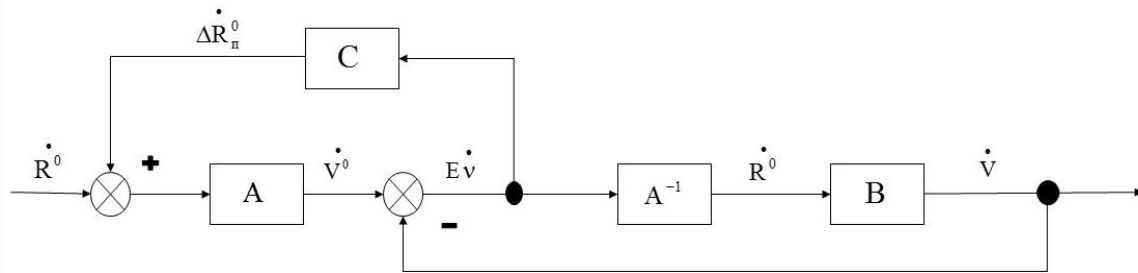


Рис. 3. Система підтримки планових темпів виконання робіт з урахуванням відхилення $E v$, що виникло

Завдання полягає в тому, щоб визначити матрицю коефіцієнтів таку, за якої виконується умова (4). Записавши передатну функцію $\Phi(s) = \frac{V}{R^0}$ та прирівнявши її до матриці A , отримаємо вираз для матриці C :

$$C = A^{-1}. \quad (7)$$

Тоді

$$V = A \cdot R^0 = V^0. \quad (8)$$

Таким чином, справді поповнення планових темпів витрат ресурсів йде пропорційно відставанню фактичних темпів $V(t)$ від планових $V^0(t)$. При цьому запит ФП, що дорівнює відставанню, ЦУ задовольняє повністю.

Далі розглянемо систему підтримки планових темпів, побудовану за комбінованим принципом (рис. 4).

Визначимо матрицю числових коефіцієнтів цих структур за умови забезпечення рівності (3).

Для системи (рис. 4, а) матриця дорівнює:

$$C = [A - B]^{-1} \cdot [1 + (B \cdot A^{-1})^2]. \quad (9)$$

Для системи (рис. 4, б):

$$C = A^{-1} \cdot [1 + (B \cdot A^{-1})^2]. \quad (10)$$

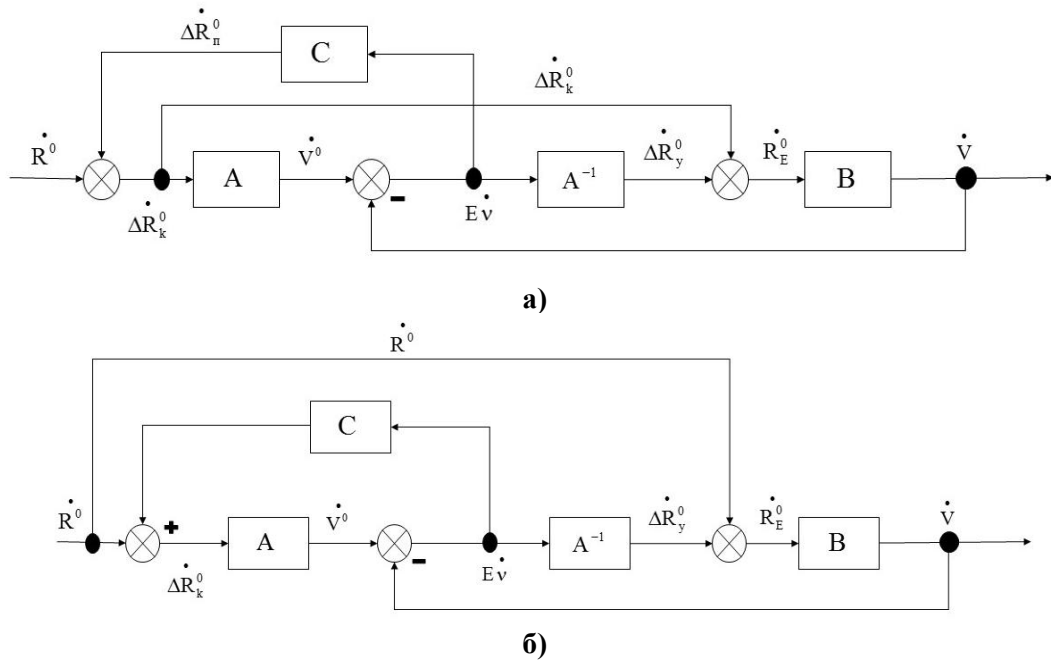


Рис. 4. Системи підтримки планових темпів (а, б), побудовані за комбінованим принципом

При отриманих значеннях матриці C в одному й іншому випадку забезпечується підтримка необхідних темпів виконання, тобто $\dot{V} = A \cdot \dot{R}^0$.

Далі розглянемо динамічну модель системи підтримки планових темпів з урахуванням динаміки виконання робіт, транспортування ресурсів та здійснення замовлень на темпи ресурсів. Структура такої системи представлена на рис. 5.

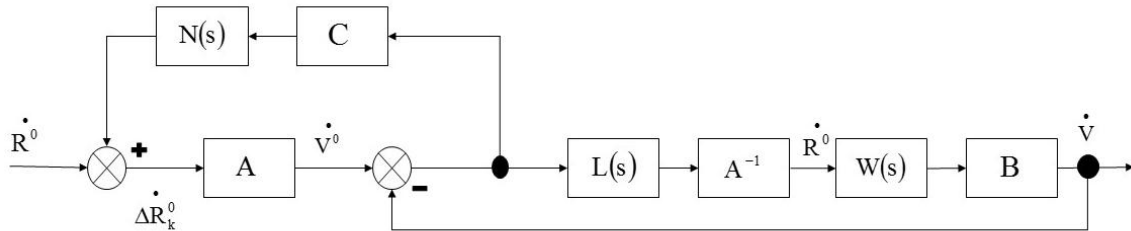


Рис. 5. Динамічна модель системи підтримки планових темпів

На рис. 5 через $W(s)$ позначено матричну передавальну функцію виконання робіт ФП з темпом $V(t)$ при темпі витрачання ресурсів $R^0(t)$. $L(s)$ – транспортування ресурсів до місця проведення робіт. $N(s)$ – матрична передавальна функція надходження запитів на коригування планових темпів доставки ресурсів з урахуванням фактичного темпу їх витрачання.

Технічні вимоги до динамічних параметрів $W(s)$, $L(s)$, $N(s)$ полягають у тому, щоб вони були узгоджені з матрицями A і B , тобто з плановими та фактичними темпами витрати ресурсів за умови забезпечення сталого функціонування системи загалом.

Для розуміння логіки запропонованої аналітики розглянемо взаємодію ЦУ та діяльність ФП щодо підтримки темпу робіт $V(t)$ при темпі витрати ресурсу $R^0(t)$ за структурною схемою, представленою на рис. 6.

Динамічна модель діяльності ФП (рис. 6) має наступну математичну інтерпретацію:

$$W_0(s) = \frac{b}{T_0 s + 1}; W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}; W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}; k_1 = k_2 = \frac{1}{a}.$$

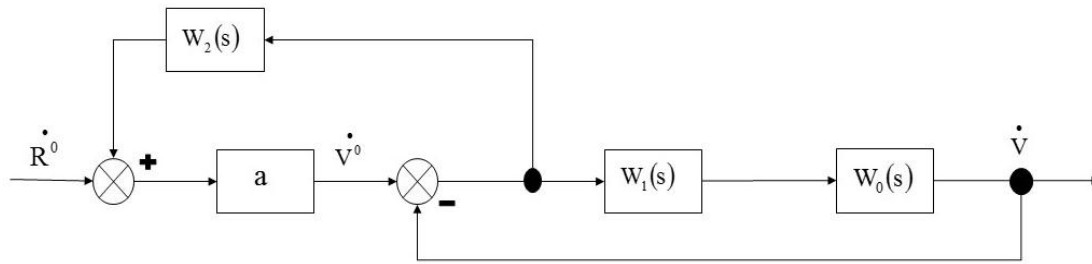


Рис. 6. Динамічна модель діяльності ФП

З урахуванням математичного визначення поняття стабільності системи за Раусом-Гурвіцем [16] запишемо характеристичну функцію системи

$$D(s) = 1 + W_1(s) \cdot W_0(s) - a W_2(s). \quad (11)$$

Підставляючи значення передавальних функцій та враховуючи, що $a \cdot k_2 = 1$, отримаємо характеристичне рівняння системи:

$$T_1 \cdot T_0 \cdot T_2 \cdot s^3 + (T_1 + T_0) \cdot T_2 \cdot s^2 + T_2 \cdot (1 + k_1 \cdot b) \cdot s + k_1 \cdot b = 0. \quad (12)$$

За умови стійкості за Раусом-Гурвіцем

$$T_2^2 \cdot (T_1 + T_0) \cdot (1 + k_1 \cdot b) > k_1 \cdot b \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_0. \quad (13)$$

Тоді маємо таку нерівність:

$$T_2 \cdot \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1} \right) > \frac{b}{a + b}. \quad (14)$$

Ця нерівність визначає умови узгодження динамічних параметрів з темпами реалізації ресурсів. При $b = a$ отримаємо:

$$\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1} > \frac{0,5}{T_2}. \quad (15)$$

Таким чином, нерівність (15) вимагає узгодження інерційності виконання робіт та доставки ресурсів з інерційністю реалізації запитів.

Аналогічно можна дослідити з урахуванням динамічних параметрів схеми, представлені на рис. 4 (а, б).

7. Обговорення результатів дослідження організаційно-технологічної структури процесу утилізації

Отримані результати пояснюються необхідністю удосконалити національну систему утилізації боєприпасів шляхом модернізації існуючого технологічного

процесу утилізації капсульних втулок шляхом введення елементів автоматизації окремих операцій та моделювання управлінських рішень з планування темпів витрачання ресурсів для виконання наміченого обсягу робіт з утилізації.

Особливістю запропонованого технологічного процесу утилізації є представлення його як багатоетапну операцію в ході якої забезпечується раціональне виділення всіх необхідних компонентів для подальшого використання у новій якості. При цьому для підвищення рівня економічності та екологічної безпеки в технологічний процес інтегрована спеціальна установка розряджання капсульних втулок, яка працює в автоматизованому режимі.

Найкращий баланс безпеки та економічності даного процесу досягається шляхом регулювання темпів виконання робіт за рахунок коригування темпів витрачання ресурсів. Для моделювання взаємовідносин органу управління та функціональних підрозділів, які безпосередньо будуть реалізовувати технологічну схему, застосовуються структурно-функціональна та мультиагентна концепції. Представлення системи управління у вигляді безлічі взаємопов'язаних і взаємодіючих агентів (активних елементів), що мають свої локальні цілі та ресурси, які узгоджені з загальною метою та наявними ресурсами, дає можливість побудувати відповідні мультиагентні динамічні моделі діяльності органу управління та функціональних підрозділів.

Разом з тим, застосування методів математичного моделювання на основі вказаних концепцій має певні обмеження та припущення.

Так, якщо обмежитись побудовою динамічної моделі функціонального підрозділу як активного агента, то моделювання має ґрунтуватись на таких припущеннях:

- процес виконання обсягу робіт вважається безперервним та його динаміка може бути описана диференціальними рівняннями;
- параметри та характеристики виконуючого елемента можуть змінюватись в процесі функціонування в певному діапазоні;
- на малому відрізку часу параметри виконуючого елемента як об'єкта управління вважаються постійними;
- за технологічну підготовку фронту робіт та за готовність технічних та транспортних засобів відповідають інші функціональні підрозділи, діями яких керує центр управління;
- функціональний підрозділ будує своє управління таким чином, щоб до заданого терміну виконати намічений (запланований) обсяг робіт, наприклад шляхом підтримки певного темпу виконання робіт.

Принциповим обмеженням в роботі моделі оперативної підтримки темпів виконання робіт є пропорційний принцип корегування відповідних темпів витрат запланованих і фактичних ресурсів. При цьому допускається ситуація, коли фактичний темп виконання робіт нижче запланованого. В такому випадку для виконання робіт з запланованим темпом моделюється більш високий темп постачання ресурсів. Модель не передбачає опис можливого варіанту коли темп постачання ресурсів перебільшує темп виконання робіт і відбувається накопичення відповідних ресурсів. Тобто, коли темп постачання ресурсів непропорційний певному темпу їх витрачання, але корелюється з витратою запасу ресурсів. Введення відповідного обмеження, в першу чергу, обумовлено необхідністю врахування умови дотримання безпеки на робочих місцях – обсяг накопичення вибухонебезпечних речовин і предметів на місці проведення робіт не має перевищувати потреби на

одну робочу зміну, а все перероблене має бути прибрано з робочих місць наприкінці робочої зміни.

Крім того, зазначимо, що при застосуванні даної моделі у разі переходу від одного типу робіт до іншого типу того ж профілю, наприклад до утилізації інших боєприпасів за певною технологією, яка передбачає інший технологічний процес, параметри об'єкта управління можуть значно змінитися. В такому разі вираз (1) слід розглядати як загальний випадок.

Недостатню варіативність представленої моделі можна усунути шляхом її корегування під час моделювання різних варіантів діяльності функціональних підрозділів. Так у випадку, якщо функціональні підрозділи діють автономно, тобто окремо здійснюють запити ресурсів і самостійно підтримують темпи виконання робіт, тоді зміниться вид матриць – матриці A , B і C будуть діагональними.

Якщо здійснюється взаємопов'язане розподілення темпів при реалізації колективної заявки функціональних підрозділів, то завдання формування центром управління планових темпів витрати ресурсів ускладнюється.

Якщо формування скоригованих планових темпів йде за двома запитами, пропорційними відхиленням фактичних темпів від планових для двох функціональних підрозділів, то розподіл планових скоригованих темпів також триває на два підрозділи.

Інша ситуація виникає, коли порушується симетрія у плануванні. Тоді один функціональний підрозділ недоотримуватиме ресурси, а інший отримуватиме більше, а отже, підтримуватиме великі темпи виконання робіт. У такий спосіб можна здійснювати регулювання темпів виконання робіт різними підрозділами лише на рівні планування. Це завдання може ускладнюватись впливом динамічних чинників на процеси виконання робіт, транспортування ресурсів та формування запитів при несиметричних взаємодіях функціональних підрозділів.

Таким, чином, перспективами для розвитку відповідного напрямку дослідження є розгляд різноманітних схем планування темпів надання ресурсів функціональним підрозділам, впливу динамічних параметрів на стабільність системи підтримки планових темпів виконання робіт.

Слід зауважити, що зниження темпу витрачання ресурсів, погана організація виконання робіт можуть призвести до суттєвого уповільнення процесу утилізації. Крім того, кінцеві результати також суттєво залежать від: наявності ресурсів функціональних підрозділів, професійного рівня та психофізіологічного стану агентів відповідних підрозділів. При цьому формалізація впливу професійного рівня та психофізіологічного стану агентів може мати труднощі математичного характеру, пов'язані з пошуком способу аналітичного опису лінгвістичної інформації.

Для отримання позитивного кінцевого результату важливе своєчасне отримання достовірної інформації про завдання, яке потрібно виконати, а також точна оцінка трудомісткості запланованих і реально виконаних робіт. Це дозволить під час моделювання коректно задати вхідну і вихідні змінні – темп витрати ресурсів виконавчим елементом функціонального підрозділу та темп і обсяг робіт, що виконуються, відповідно.

Для обробки отриманих результатів можуть бути застосовані програмні апарати середовищ Microsoft Office Excel та Mathcad. Результати першого наукового завдання реалізовано у вигляді патентного впровадження на етапі отримання патенту на корисну модель № 146812 «Технологічна лінія для розряджання капсу-

льних втулок артилерійських пострілів».

Апробацію в натуральних (лабораторних) умовах та подальше впровадження результатів дослідження доцільно провести на спеціальних виробничих майданчиках. Натуральні дослідження мають дати розвиток даного дослідження та відповісти на питання як виявлені недоліки можуть бути усунуті в перспективі.

Результати дослідження можуть бути реалізовані як виконавцями робіт з утилізації, так і відповідними органами державного нагляду у сфері техногенної та пожежної безпеки в процесі проведення експертизи утилізації боєприпасів і вибухівки під час здійснення заходів контролю, погодження нормативних та інших документів з питань утилізації.

Робота є продовженням циклу досліджень направлених на розроблення та впровадження нових високоефективних технологій утилізації боєприпасів.

8. Висновки

1. Для підвищення рівня економічності, техногенної та екологічної безпеки під час утилізації боєприпасів запропоновано модернізувати існуючий технологічний процес розряджання капсульних втулок артилерійських боєприпасів шляхом введення в технологічну лінію спеціальної установки, яка працює в автоматизованому режимі. Орієнтована продуктивність модернізованого процесу розряджання капсульних втулок артилерійських пострілів складає від 50400 шт. до 54000 шт. у зміну, що, як мінімум, у 18 разів перевищує продуктивність розряджання існуючим ручним способом. Наприклад, процес утилізації 100000 шт. КВ-13У або КВ-13 (33 робочих дні) дасть змогу додатково отримати металобрухту: 6,61 т при утилізації КВ-13 (корпус сталевий (Ст35-Н-8)); 7,398 т при утилізації КВ-13 (корпус латунний (ЛС-60)); 7,1 т при утилізації КВ-13У (корпус сталевий (Ст35-Н-8)); 7,674 т при утилізації КВ-13У (корпус латунний (ЛС-60)).

2. Для підвищення ефективності процесу управління технологічним процесом під час впровадження відповідної технології запропонована динамічна модель оперативної підтримки темпів виконання робіт за рахунок коригування темпів витрачання ресурсів. Впровадження даної моделі в процес підтримки прийняття рішень щодо організації технологічного процесу розряджання капсульних втулок дозволить досягти найкращого балансу безпеки та економічності даного процесу. Опис взаємовідносин органу управління та функціональних підрозділів, які безпосередньо будуть реалізовувати технологічну схему, здійснено на основі структурно-функціональної та мультиагентної концепцій.

Література

1. Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2019. 132 p. doi: 10.17226/25140

2. Danssaert P., Wood B. Surplus and Illegal Small Arms, Light Weapons and their Ammunition: the consequences of failing to dispose and safely destroy them, 2020. 20 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/341767347_Surplus_and_Illegal_Small_Arms_Light_Weapons_and_their_Ammunition_the_consequences_of_failing_to_dispose_and_safely_destroy_them

3. Alternative Treatment Technologies to Open Burning and Open Detonation of Energetic Hazardous Wastes – Final Report. U.S. Environmental Protection Agency

(EPA), 2019. 83 p. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-12/documents/final_obod_alttechreport_for_publication_dec2019_508_v2.pdf

4. Revisions to Standards for the Open Burning/Open Detonation of Waste Explosives, Proposed Rule. Federal Register. 2024. Vol. 89. № 55. P. 19952–20030. URL: <https://www.federalregister.gov/d/2024-05088>

5. Cottrell Linsey, Dupuy Kendra. Alternatives to Open Burning and Open Detonation: The Disparity Between HMA and Commercial Best Practices. The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2021. Vol. 25. Issue 1. Article 22. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol25/iss1/22>

6. Ferreira C., Ribeiro J., Clift R., Freire F. A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Material from Ammunition Disposal through Incorporation in Civil Explosives. Sustainability. 2019. Vol. 11. P. 255. doi:10.3390/su11010255

7. Carapic J., Deschambault E., Holtom P., King B. Life-Cycle Management of Ammunition: Safety, Security, and Sustainability. The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2018. Vol. 22. Issue 2. Article 2. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol22/iss2/2>

8. Неклонський І. М., Смирнов О. М. Розроблення технології утилізації капсульних втулок до артилерійських пострілів з урахуванням ризику виникнення аварії та економічної ефективності робіт. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2017. Вип. 25. С. 73–84. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2017_25_14

9. Неклонський І. М., Смирнов О. М. Оптимізація технології випалювання траєкторій із артилерійських снарядів малих калібрів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2(36). С. 349–362. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-25

10. Vytvytska O. D., Martynyuk O. A., Shpak N. O., Karcheva G. T., Medynsky I. P., Nodzhak L. S. Structural-functional modeling for the determination of the company's equilibrium conditions in the dynamic business environment. Mathematical modeling and computing. 2020. Vol. 7. № 1. С. 104–111. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmc_2020_7_1_13

11. Hosny Ahmed Abbas, Samir Ibrahim Shaheen, Mohammed Hussein Amin. Organization of Multi-Agent Systems: An Overview. International Journal of Intelligent Information Systems. 2015. 4(3). P. 46–57. doi: 10.11648/j.ijis.20150403.11

12. Fan W., Chen P., Shi D., Guo X., Kou L. Multi-Agent Modeling and Simulation in the AI Age. Tsinghua Science and Technology. 2021. 26(5). P. 608–624. doi: 10.26599/TST.2021.9010005

13. Antonio Armenta. Introduction to Transfer Functions for Control System Analysis. Technical Articles. Control.com. URL: <https://control.com/technical-articles/introduction-to-transfer-functions-for-control-system-analysis/>

14. Jalili N., Candelino N. W. System Transfer Function Analysis. In Dynamic Systems and Control Engineering. Cambridge: Cambridge University Press. 2023. P. 312–374. doi: 10.1017/9781108923156.007

15. Gribkova N., Zitikis R. Assessing Transfer Functions in Control Systems. Journal of Statistical Theory and Practice. 2019. Vol. 13. Article 35. doi: 10.1007/s42519-018-0035-2

16. Farhan Hashosh A., Basirzadeh H. Routh stability criterion and Lyapunov-Routh method in control theory. International Journal of Nonlinear Analysis and Applications. 2024. 15(5). P. 111–120. doi: 10.22075/ijnaa.2023.31372.4570

*I. Neklonskyi, PhD, Lecturer of the Department**O. Smyrnov, Senior Lecturer of the Department**National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

MODERNIZATION OF THE PROCESS OF DISPOSAL OF CAPSULE BUSHINGS FOR ARTILLERY SHOTS

To increase the level of efficiency, technogenic and environmental safety during the disposal of ammunition, it is proposed to modernize the existing technological process of discharging artillery ammunition capsule shells by introducing a special installation into the technological line, which operates in an automated mode. To increase the efficiency of the technological process management process during the implementation of the corresponding technology, a dynamic model of operational support of the pace of work performance by adjusting the pace of resource consumption is proposed. The description of the relationship between the management body and functional units that will directly implement the technological scheme is carried out on the basis of structural-functional and multi-agent concepts. The control system is presented in the form of a set of interconnected and interacting agents (active elements) that have their own local goals and resources that are consistent with the general goal of the system and available resources. It is determined that one of the most important elements in this structure is the functional unit. It implements the corresponding disposal technology as an active agent of the system. The activity of the executive element of the functional unit is described by a differential equation. The Laplace transform was used as a tool for solving the differential equation. This made it possible to obtain the corresponding transfer function. The use of methods for constructing multi-agent dynamic models taking into account the mathematical definition of the concept of system stability according to Rous-Hurwitz made it possible to analytically determine the condition for coordinating the inertia of work execution and resource delivery with the inertia of request implementation. The implementation of this model in the decision-making support process for organizing the technological process of discharging capsule sleeves will allow achieving the best balance of safety and efficiency of this process.

Keywords: ammunition, capsule sleeves, disposal, technology, agent, dynamic model, transfer function, work rate

References

1. Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions. (2019). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, The National Academies Press. doi: 10.17226/25140
2. Danssaert, P., Wood, B. (2020). Surplus and Illegal Small Arms, Light Weapons and their Ammunition: the consequences of failing to dispose and safely destroy them. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341767347_Surplus_and_Illegal_Small_Arms_Light_Weapons_and_their_Ammunition_the_consequences_of_failing_to_dispose_and_safely_destroy_them
- 3 Alternative Treatment Technologies to Open Burning and Open Detonation of Energetic Hazardous Wastes – Final Report. (2019). U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Available at: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-12/documents/final_obod_alttechreport_for_publication_dec2019_508_v2.pdf
4. Revisions to Standards for the Open Burning/Open Detonation of Waste Explosives, Proposed Rule. (2024). Federal Register, 89, 55, 19952–20030 Available at: <https://www.federalregister.gov/d/2024-05088>
5. Cottrell, Linsey and Dupuy, Kendra. (2021). Alternatives to Open Burning and Open Detonation: The Disparity Between HMA and Commercial Best Practices. The Journal of Conventional Weapons Destruction, 25, 1, 22. Available at: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol25/iss1/22>
6. Ferreira, C., Ribeiro, J., Clift, R., Freire, F. (2019). A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Material from Ammunition

Disposal through Incorporation in Civil Explosives. *Sustainability*, 11, 255. doi: 10.3390/su11010255

7. Carapic, J., Deschambault, E., Holtom, P., King, B. (2018). Life-Cycle Management of Ammunition: Safety, Security, and Sustainability. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*, 22, 2, 2. Available at: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol22/iss2/2>

8. Neklonskyi, I., Smirnov, O. (2017). Development of technology for the disposal of capsule shells for artillery shots, taking into account the risk of an accident and the economic efficiency of the work. *Problems of emergency situations*, 25, 73–84. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2017_25_14

9. Neklonskyi, I., Smirnov, O. (2022). Optimization of the technology for firing tracers from small-caliber artillery shells. *Problems of emergency situations*, 2(36), 349–362. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-25

10. Vytvytska, O., Martynyuk, O., Shpak, N., Karcheva, G., Medynsky, I., Nodzhak, L. (2020). Structural-functional modeling for the determination of the company's equilibrium conditions in the dynamic business environment. *Mathematical modeling and computing*, 7, 1, 104–111. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mmc_2020_7_1_13

11. Hosny, A., Samir, I., Mohammed, H. (2015). Organization of Multi-Agent Systems: An Overview. *International Journal of Intelligent Information Systems*, 4(3), 46–57. doi: 10.11648/j.ijis.20150403.11

12. Fan, W., Chen, P., Shi D., Guo, X. , Kou, L. (2021). Multi-Agent Modeling and Simulation in the AI Age. *Tsinghua Science and Technology*, 26(5), 608–624. doi: 10.26599/TST.2021.9010005

13. Armenta, A. (2023). Introduction to Transfer Functions for Control System Analysis. *Technical Articles*. Available at: <https://control.com/technical-articles/introduction-to-transfer-functions-for-control-system-analysis/>

14. Jalili, N., Candelino, N. W. (2023). System Transfer Function Analysis. In *Dynamic Systems and Control Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781108923156.007

15. Gribkova, N., Zitikis, R. (2019). Assessing Transfer Functions in Control Systems. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 13, 35. doi: 10.1007/s42519-018-0035-2

16. Farhan Hashosh, A., Basirzadeh, H. (2024). Routh stability criterion and Lyapunov-Routh method in control theory. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 15(5), 111–120. doi: 10.22075/ijnaa.2023.31372.4570

Надійшла до редколегії: 11.09.2025

Прийнята до друку: 14.10.2025