

ISSN 2524-2636



**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ
З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**



**Збірник наукових праць
Національного університету
цивільного захисту України**

«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»

Том 9 № 1 (2025)

DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1>

*Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації,
Серія KB № 22700–12600ПР, видане 04.05.2017 Міністерством юстиції України*

*Зареєстровано в Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: ідентифікатор R30-04832
Рішення Нацради України з питань ТБ і РМ № 1714 від 23.05.2024
(Протокол №16)*

*Включено до переліку фахових видань України, категорія «Б»
Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886*

*Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет
Вченою радою Національного університету цивільного захисту України
(протокол № 10 від 27.03.2025.)*

*Дозволяється публікація матеріалів збірника у відкритому доступі комісією
Національного університету цивільного захисту України
з питань роботи із службовою інформацією
(протокол № 4 від 06.06.2025.)*

**УДК 614.8
Н 17**

Збірник наукових праць Національного університету
цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації:
попередження та ліквідація» : – Черкаси: НУЦЗ України, 2025.
– Том 9 № 1. – 194 с.

СКЛАД РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР – *Роман ШЕВЧЕНКО*, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА – *Андрій КОВАЛЬОВ*, д-р. техн. наук, с.н.с. (Національний університет цивільного захисту України);

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР – *Юрій ГОРБАЧЕНКО*, канд. іст. наук, доцент (Національний університет цивільного захисту України);

РЕДАКТОР ТЕХНІЧНИХ ТЕКСТІВ ЗІ ЗНАННЯМ АНГЛІЙСЬКОЇ МОВИ – *Сергій ХРЯПАК*, канд. філол. наук (Національний університет цивільного захисту України);

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Марцін АНЩАК, д-р. техн. наук (Пожежна академія (м. Варшава, Республіка Польща));

Ярослав БАЛЛО, д-р. техн. наук, с.д. (Національний університет цивільного захисту України);

Олексій БАСМАНОВ, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Анатолій БЄЛІКОВ, д-р техн. наук, проф., Заслужений діяч науки і техніки України (ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (м. Дніпро));

Рікардо ВІВЕР, канд. техн., наук, проф. (Нідерландський інститут громадської безпеки);

Олег ЗЕМЛЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Василь КОВАЛИШИН, д-р техн. наук, проф. (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності);

Андрій КОЗАК, канд. техн. наук, доц. (Київський Національний університет будівництва і архітектури);

Тетяна КОСТЕНКО, д-р техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Максим КУСТОВ, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Олександр ЛЄВТЄРОВ, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Олег МИРОШНИК, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Сергій МОСОВ, д-р військ. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Ольга НЕКОРА, канд. техн. наук, с. н. с. (Національний університет цивільного захисту України);

Вадим НІЖНИК, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Олександр НУЯНЗІН, д-р. техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Сергій ПОЗДЄЄВ, д-р техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Ніна РАШКЕВИЧ, доктор філософії (Національний університет цивільного захисту України);

Станіслав СІДНЕЙ, канд. техн. наук, доц. (Національний університет цивільного захисту України);

Ольга СКОРОДУМОВА, д-р техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Євген ТИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф. (Національний університет цивільного захисту України);

Світлана ФЕДЧЕНКО, доктор філософії (Національний університет цивільного захисту України);

Сергій ЦВІРКУН, канд. техн., наук, доц. (Національний університет цивільного захисту України).

EDITORIAL BOARD:

CHIEF EDITOR – **Roman SHEVCHENKO**, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

DEPUTY CHIEF EDITOR – **Andrii KOVALOV**, doctor of technical sciences, senior researcher (National University of Civil Protection of Ukraine);

RESPONSIBLE SECRETARY – **Yurii HORBACHENKO**, PhD in historical sciences, docent (National University of Civil Protection of Ukraine);

TECHNICAL TEXTS EDITOR WITH ENGLISH LANGUAGE KNOWLEDGE – **Serhii KHRIAPAK**, PhD in philology (National University of Civil Protection of Ukraine);

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Martsin ANSHCHAK, doctor of technical sciences (Fire University (Warsaw, the Republic of Poland));

Yaroslav BALLO, doctor of technical sciences, senior researcher (National University of Civil Protection of Ukraine);

Oleksii BASMANOV, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Anatolii BIELIKOV, doctor of technical sciences, professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" (Dnipro));

Rikardo VIVER, PhD in technical sciences, professor (Netherlands Institute for Public Safety);

Oleh ZEMLIANSKYI, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Vasyl KOVALYSHYN, doctor of technical sciences, professor (Lviv State University of Life Safety);

Andrii KOZAK PhD in technical sciences, docent (Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture);

Tetiana KOSTENKO, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Maksym KUSTOV, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Oleksandr LIEVTIEROV, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Oleh MYROSHNYK, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Serhii MOSOV, doctor of military sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Olha NEKORA, PhD in technical sciences, senior researcher (National University of Civil Protection of Ukraine);

Vadym NIZHNYK, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Oleksandr NUIANZIN, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Serhii POZDIEIEV, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Nina RASHKEVYCH, doctor of philosophy (National University of Civil Protection of Ukraine);

Stanislav SIDNEI, PhD in technical sciences, docent (National University of Civil Protection of Ukraine);

Olha SKORODUMOVA, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Yevhen TYSHCHENKO, doctor of technical sciences, professor (National University of Civil Protection of Ukraine);

Svitlana FEDCHENKO, doctor of philosophy (National University of Civil Protection of Ukraine);

Serhii TSVIRKUN, PhD in technical sciences, docent (National University of Civil Protection of Ukraine).

ЗМІСТ

<i>Олена АЗАРЕНКО, Юлія ГОНЧАРЕНКО, Михайло ДІВІЗІНІЮК, Олександр ФАРРАХОВ, Анастасія ХМИРОВА, Олександр РАШКЕВИЧ, Юлія ПЯТОВА</i> АНАЛІЗ ТЕРОРИСТИЧНИХ АТАК УДАРНИМИ ДРОНАМИ У ТРАВНІ 2024 РОКУ	6
<i>Olena AZARENKO, Julia HONCHARENKO, Mikhaïlo DIVIZINIUK, Oleksandr FARRAKHOV, Anastasia KHMYROVA, Oleksandr RASHKEVYCH, Yulia PIATOVA</i> ANALYSIS OF TERRORIST ATTACKS BY ATTACK DRONES IN MAY 2024	
<i>Камран АЛМАЗОВ</i> ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ПЕРЕКИДАННЯ ПОЖЕЖНОЇ АВТОЦИСТЕРНИ В УМОВАХ ПЕРЕСІЧЕНОЇ ЛІСОВОЇ МІСЦЕВОСТІ	17
<i>Kamran ALMAZOV</i> ROLL-OVER RISK ASSESSMENT OF A FIRE TANKER IN UNEVEN FOREST TERRAIN	
<i>Андрій ГАВРИСЬ, Віктор КОВАЛЬЧУК, Олександра ПЕКАРСЬКА, Мар'ян ЛАВРІВСЬКИЙ</i> РАНЖУВАННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЧАСТОТИ ВИНИКНЕННЯ ЗАТОПЛЕНЬ.....	34
<i>Andrii HAVRYS, Viktor KOVALCHUK, Oleksandra PEKARSKA, Marian LAVRIVSKYI</i> RANKING OF TERRITORIAL COMMUNITIES OF THE LVIV REGION BASED ON THE FREQUENCY OF FLOODING OCCURRENCES	
<i>Oleh ZEMLIANSKYI, Tetiana KOSTENKO, Maksym PONOMAR, Serhii FELDI</i> COMPREHENSIVE SOLUTIONS FOR AUTOMATIC FIRE SUPPRESSION OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES.....	48
<i>Олег ЗЕМЛЯНСЬКИЙ, Тетяна КОСТЕНКО, Максим ПОНОМАР, Сергій ФЕЛДІ</i> КОМПЛЕКСНІ РІШЕННЯ ЩОДО АВТОМАТИЧНОГО ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	
<i>Андрій КОВАЛЬОВ, Роман ПУРДЕНКО</i> РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	57
<i>Andrii KOVALOV, Roman PURDENKO</i> CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIRE-PROTECTED STEEL STRUCTURES	
<i>Андрій КОВАЛЬОВ, Володимир ТРИГУБ, Дмитро ЖУРБІНСЬКИЙ, Ніна РАШКЕВИЧ, Сергій ЮРЧЕНКО, Денис КОЛОМІЄЦЬ</i> ОБґРУНТУВАННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛІ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	67
<i>Andrii KOVALOV, Volodymyr TRYHUB, Dmytro ZHURBINSKY, Nina RASHKEVICH, Serhii YURCHENKO, Denys KOLOMIETS</i> USTIFICATION OF CRITICAL TEMPERATURE OF STEEL FOR DESIGN OF FIRE-RESISTANT STEEL STRUCTURES	
<i>Вікторія КОВБАСА, Марія КУЦЕНКО, Вячеслав ВАЩЕНКО, Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ, Євгеній ШКОЛЯР, Марина ТОМЕНКО</i> КЕРОВАНА БАЗА ДАНИХ ПО ЧАСАМ ЗГОРЯННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ В ПРОДУКТАХ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ	76
<i>Viktoriia KOVBASA, Oksana KYRYCHENKO, Mariia KUTSENKO, Viacheslav VASHCHENKO, Andriy BEREZOVSKYI, Ievgenii SHKOLIAR, Maryna TOMENKO</i> CONTROLLED DATABASE ON THE BURNING TIME OF METAL PARTICLES IN THE DECOMPOSITION PRODUCTS OF FLUOROPLAST-BASED METALLIZED PYROTECHNIC MIXTURES	
<i>Марія КУЦЕНКО, Ігор РОМАНІЮК, Олег МИРОШНИК, Юрій КУЦЕНКО</i> ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЇ ВОГНЕГАСЯЧИХ СОЛЕЙ ВИСОКОПОРИСТИМИ НОСІЯМИ.....	85
<i>Maria KUTSENKO, Ihor ROMANIUK, Oleh MYROSHNYK, Yurii KUTSENKO</i> RESEARCH OF ADSORPTION FOR FIREEXTINGUISHER SALTS BY HIGH-POROUS TRANSMITTERS	
<i>Олена ЛАВРЕНІЮК, Борис МИХАЛІЧКО</i> ФЕРУМ(III)-АМІННИЙ КОМПЛЕКС ЯК НОВИЙ АНТИПРЕН-ЗАТВЕРДНИК ДЛЯ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	96
<i>Helen LAVRENYUK, Borys MYKHALICHKO</i> IRON(III)-AMINE COMPLEX AS A NEW FLAME RETARDANT-HARDENER FOR EPOXY COMPOSITE MATERIALS	
<i>Олег МИРОШНИК, Олег ЗЕМЛЯНСЬКИЙ, Владислав ДЕНДАРЕНКО, Віталій ЗАЖОМА</i> ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ З ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У ПРИКОРДОННИХ РАЙОНАХ УКРАЇНИ	105

Oleh MYROSHNYK, Oleh ZEMLIANSKYI, Vladyslav DENDARENKO, Vitalii ZAZHOMA ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE CIVIL DEFENSE SYSTEM FOR PREVENTION AND ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF EMERGENCIES IN THE BORDER AREAS OF UKRAINE	
Serhii POZDIEIEV, Olha NEKORA, Alina NOVHORODCHENKO, Roman YAKOVCHUK, Nazarii TUR BASIC CALCULATIONS OF DYNAMIC INTERACTION OF MECHANICAL SYSTEMS OF MODULAR SHELTERS ARE IMPLEMENTED IN THE LS-DYNA PROGRAM	115
Сергій ПОЗДЄЄВ, Ольга НЕКОРА, Аліна НОВГОРОДЧЕНКО, Роман ЯКОВЧУК, Назарій ТУР ОСНОВНІ РОЗРАХУНКИ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ МОДУЛЬНИХ УКРИТТІВ РЕАЛІЗОВАНІ У ПРОГРАМІ LS-DYNA	
Ніна РАШКЕВИЧ, Роман ШЕВЧЕНКО, Катерина КАРПЕНКО, Ольга ШЕВЧЕНКО, Іван РУЩАК, Олександр ДМИТРИЄНКО МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВНАСЛІДОК НАДЗВИЧАЙНИХ ПОДІЙ	127
Nina RASHKEVICH, Roman SHEVCHENKO, Kateryna KARPENKO, Olga SHEVCHENKO, Ivan RUSHCHAK, Oleksandr DMYTRIENKO METHODOLOGY FOR RAPID ASSESSMENT OF DAMAGE TO BUILDING STRUCTURES DUE TO EMERGENCY EVENTS	
Валерій СТІПЛЕЦЬ, Сергій СТЕПАНЧУК, Андрій ХИЖНЯК, Роман ШЕВЧЕНКО, Вікторія ЛУКАШЕНКО РОЗРОБКА КЕРУЮЧОГО АЛГОРИТМУ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНОГО МЕТОДУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ В УМОВАХ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ.....	138
Valery STRELEC, Serhii STEPANCHUK, Andrii KHYZHNIYAK, Roman SHEVCHENKO, Viktoriia LUKASHENKO DEVELOPMENT OF A CONTROL ALGORITHM FOR AN INFORMATION AND TECHNICAL METHOD FOR ENSURING HUMANITARIAN DEMINING IN CONDITIONS OF RADIATION CONTAMINATION	
Дмитро ТРЕГУБОВ, Юліана ГАПОН, Віталій НУЯНЗІН, Артем МАЙБОРОДА, Флора ТРЕГУБОВА ПРОГНОЗУВАННЯ НЕБЕЗПЕК АМОНІАКУ З ВРАХУВАННЯМ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЇ БУДОВИ.....	153
Dmytro TREGUBOV, Yuliana HAPON, Vitalii NUIANZIN, Artem MAIBORODA, Flora TREHUBOVA PREDICTION OF AMMONIA DANGERS TAKING INTO ACCOUNT THE SUPRAMOLECULAR STRUCTUR	
Максим УДОВЕНКО, Владислав ДЕНДАРЕНКО, Валентин МЕЛЬНИК, Олександр НУЯНЗІН, Дмитро КРИШТАЛЬ, Сергій Цвіркун АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РОЗРАХУНКУ ВИТРАТ НА ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ.....	165
Maksym UDOVENKO, Vladyslav DENDARENKO, Valentyn MELNYK, Oleksandr NUIANZIN, Dmytro KRYSH TAL, Serhii TSVIRKUN AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING FIREFIGHTING COSTS	
Ігор ФЕДЧЕНКО, Світлана ФЕДЧЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН В УМОВАХ ПОЖЕЖІ	173
Igor FEDCHENKO, Svetlana FEDCHENKO RESEARCH ON THE BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COLUMNS IN FIRE CONDITIONS	
Андрій ХИЖНЯК, Роман МОТРИЧУК, Дмитро ФЕДОРЕНКО, Іван ІЩЕНКО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА МОБІЛЬНОЇ ПОЖЕЖНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ СІГВЕЮ ПРИ ГАСІННІ ПОЖЕЖ	184
Andrii KHYZHNIYAK, Roman MOTRICHUK, Dmytro FEDORENKO, Ivan ISHCHEENKO SOLUTION TO THE PROBLEM OF IDENTIFYING THE DYNAMIC PARAMETERS OF A HUMAN OPERATOR OF A MOBILE FIRE-FIGHTING UNIT BASED ON SEGWAY WHILE EXTINGUISHING FIRES	

Вікторія КОВБАСА¹ (ORCID: 0000-0002-9479-669X)

Оксана КИРИЧЕНКО¹, д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0002-0240-1807)

Марія КУЦЕНКО¹, канд. екон. наук, доцент (ORCID: 0000-0001-6879-9187)

Вячеслав ВАЩЕНКО², д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0003-0722-9353)

Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ¹, канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0002-4043-1206)

Євгеній ШКОЛЯР¹, канд. психол. наук (ORCID: 0000-0002-7304-1677)

Марина ТОМЕНКО¹, канд. пед. наук (ORCID: 0000-0002-2354-9106)

¹Національний університет цивільного захисту України

²Черкаський державний технологічний університет

КЕРОВАНА БАЗА ДАНИХ ПО ЧАСАМ ЗГОРЯННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ В ПРОДУКТАХ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ

Аналіз новітніх досліджень виявив закономірності, як різні параметри впливають на час горіння частинок магнію, алюмінію та цирконію в продуктах розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. Вперше були створені експериментально-статистичні моделі для передбачення впливу технологічних параметрів на час горіння частинок металів, що дало змогу сформуванню бази даних про пожежонебезпечні властивості в умовах зовнішніх термічних дій.

Для виконання завдання використовувалися методи експериментально-статистичного моделювання та спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє розраховувати часи згоряння металевих частинок у продуктах розкладання сумішей, підвищуючи точність прогнозування пожежонебезпечних властивостей в умовах інтенсивного зовнішнього нагрівання. Отримані результати забезпечують практичне використання моделей для оцінювання та зниження пожежонебезпечних ризиків. Крім того, такі моделі сприятимуть розробці нових, більш безпечних піротехнічних матеріалів та виробів. Це дослідження є важливим кроком у забезпеченні належного рівня захисту під час транспортування, зберігання та використання піротехнічних виробів у різних умовах. Завдяки цим результатам можна також оптимізувати технологічні процеси виробництва та підвищити ефективність використання ресурсів.

Моделі враховують вплив ключових керованих параметрів, таких як розмір частинок металевих пального, коефіцієнт надлишку окиснювача, зовнішній тиск та швидкість потоку, на час згоряння частинок металів, включаючи магній, алюміній та цирконій, у продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. Під час розробки моделей також враховані зовнішні термічні впливи на поверхню виробів.

Ключові слова: пожежна безпека, термічне розкладання, піротехнічні металізовані суміші, фторопласти, горіння металів.

Постановка проблеми. Проблема полягає в надзвичайній небезпеці, яку становлять піротехнічні суміші, що включають металеві пальні матеріали, такі як магній, алюміній і цирконій, у поєднанні з фторопластами (Ф-3, Ф-4 тощо) під дією зовнішнього примусового нагрівання. Такі умови можуть виникати під час зберігання, транспортування, пострілу та польоту піротехнічних виробів. У результаті нагрівання такі суміші здатні займатися, що приводить до неконтрольованого горіння, яке відрізняється стрімким поширенням та утворенням високотемпературних продуктів згоряння.

Ці продукти згоряння розлітаються з великою швидкістю, створюючи серйозну загрозу для технічних об'єктів, зокрема будівель, пускових установок, а також для обслуговуючого персоналу. Подібні ситуації можуть призвести до руйнування виробів, що не лише ставить під загрозу матеріальні об'єкти, але й створює значні ризики для життя та здоров'я людей, які перебувають у зоні впливу.

Крім того, такі процеси спричиняють ускладнення в контролі та прогнозуванні характеристик горіння металевих частинок у складі піротехнічних сумішей. Зокрема, це стосується визначення часу горіння частинок у газоподібних продуктах розкладання, що є ключовим для розробки ефективних заходів безпеки. Відсутність систематизованих знань про ці параметри робить неможливим належний контроль над пожежними ризиками, які виникають при експлуатації та застосуванні таких матеріалів.

Отже, проблема дослідження полягає у необхідності поглибленого аналізу та розробки методів прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей, зокрема в умовах примусового нагрівання. Це дозволить розв'язати низку практичних завдань, пов'язаних із забезпеченням техногенної безпеки в галузях, де використовуються подібні матеріали, а також з мінімізацією ризиків для персоналу, інфраструктури та довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі інформація про часи горіння частинок металів, таких як магній, алюміній і цирконій, у газоподібних середовищах під дією підвищених температур розпорошена в різних наукових джерелах.

Зокрема, у [1] розглядаються фундаментальні аспекти горіння металізованих систем, зокрема механізми термічного розкладання й горіння. Це дослідження є важливим для розуміння впливу металевих компонентів, таких як магній і алюміній, на тривалість горіння частинок та утворення високотемпературних продуктів. Ці аспекти слугують основою для аналізу фізико-хімічних параметрів, які необхідні для розробки керованої бази даних.

У [2] акцент зроблено на аспектах пожежної безпеки піротехнічних виробів у випадках зовнішніх теплових впливів. У роботі аналізується взаємодія компонентів, що дозволяє прогнозувати тривалість горіння частинок у продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів. Методики, наведені авторами, можуть стати базою для структурування даних у контексті вашої теми.

Автори [3] зосереджуються на вивченні впливу механічних характеристик піротехнічних зарядів на їхню горючість і пожежну безпеку. Ця робота допомагає дослідити параметри піротехнічних сумішей із металевими частинками та визначити ключові чинники, що впливають на час горіння частинок у продуктах термічного розкладання, що є цінним для створення відповідної бази даних.

У [4] розглядаються процеси горіння алюмінієвого порошку в складі піротехнічних сумішей, з акцентом на характеристиках горіння частинок алюмінію. Це безпосередньо пов'язано з нашою темою, оскільки дослідження надає важливі дані про параметри горіння металевих компонентів, які є ключовими для створення керованої бази даних.

Автори [5] провели термодинамічні розрахунки для визначення температури продуктів горіння піротехнічних виробів. Отримані результати дозволяють оцінити вплив складу піротехнічних сумішей на швидкість реакції та температуру горіння, що сприяє ефективному моделюванню цих процесів у рамках бази даних.

Робота [6] присвячена методам запобігання передчасному займанню піротехнічних виробів. Аналіз умов, що призводять до передчасного згоряння металевих компонентів, є важливим для врахування потенційних ризиків і адаптації даних при створенні бази.

У [7] представлено модель розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей, які включають металеві пальні та оксиди металів. Ця модель забезпечує глибоке розуміння механізмів горіння, що сприяє точному прогнозуванню часових характеристик горіння в умовах термічного розкладання, що безпосередньо відповідає завданням дослідження.

Усі проаналізовані джерела дійсно є цінними для дослідження, адже вони висвітлюють ключові параметри горіння піротехнічних сумішей, а також пропонують методики аналізу й моделі, які можуть бути інтегровані у створення керованої бази даних.

Однак їхнє застосування у специфічному контексті дослідження пожежонебезпечних властивостей сумішей за умов інтенсивного зовнішнього нагрівання стикається з низкою обмежень. Основна складність полягає в адаптації існуючих методів до умов, що характеризуються високими температурами нагрівання, швидкими термічними змінами та різноманітним продуктів розкладання, які значною мірою впливають на динаміку процесу горіння.

Тому, хоча ці праці формують важливу теоретичну основу, є необхідність подальшого опрацювання специфічних характеристик, притаманних саме таким екстремальним умовам, і розробки додаткових методів прогнозування, що враховують особливості зовнішнього примусового нагрівання. Це може передбачати створення нових експериментальних даних та модифікацію існуючих моделей для отримання повноцінної картини поведінки піротехнічних матеріалів у критичних умовах.

Постановка задачі та її розв'язання. У результаті аналізу літературних джерел, була поставлена мета узагальнити наявні дані про часи горіння частинок металів (магній, алюміній, цирконій) у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей, що, у свою чергу, дозволяє створити керовану базу даних для практичного застосування. Це сприятиме прогнозуванню поведінки таких матеріалів в екстремальних умовах, підвищуючи безпеку їх використання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- узагальнити наявну інформацію про ключові параметри горіння частинок металів у продуктах термічного розкладання;
- розробити експериментально-статистичні моделі, які описують ці параметри з використанням методів регресії та інтерполяції;
- адаптувати отримані моделі до програмного забезпечення, що дозволяє проводити розрахунки в режимі діалогу;
- створити інтерактивну базу даних для підтримки прогнозів та аналізу безпечності процесів за різних умов експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для розрахунку залежностей часу горіння (τ , с) від розміру частинок металу (d_m , мкм), коефіцієнта надлишку окиснювача (α) в суміші, швидкості потоку (V , м/с) та зовнішнього тиску (P , Па) розроблені відповідні моделі. У дослідженні розглядаються експериментальні дані для температур навколишнього середовища від 1100 до 1300 К, характерних для реакційної зони та температури поверхні горіння розглянутих сумішей [5, 8, 9]. Використані експериментальні дані були отримані на стандартному піротехнічному обладнанні із застосуванням відомих фотографічних методів, а також методів мікрокінозйомки (кінокамера СКС-1М, швидкість зйомки 3000...5000 кадр/с) [6 – 8].

Моделі для розглядуваних металів, зокрема магнію, алюмінію та цирконію, наведені нижче. Відносна похибка цих моделей становить 5-7%, що забезпечує високу точність прогнозування часу згоряння частинок металів у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів за умов зовнішніх термічних впливів. Перераховані моделі стали основою для прогнозування поведінки піротехнічних сумішей за різних умов, що дозволяє оптимізувати процеси виробництва та підвищити безпеку експлуатації піротехнічних виробів. Вони також забезпечують інструмент для подальших досліджень, що можуть бути використані для розробки нових, більш безпечних матеріалів та технологій.

Магній

$$\begin{aligned} \tau_r(d_m, \alpha, V, P) = & \left(0,019 - 4,3 \frac{P}{V}\right) \alpha^2 + (0,47 + 0,01PV^{0,01})\alpha + \\ & + 0,84 + 0,2VP^{0,3} + 10^{-5} \frac{d_m}{P} + P^{0,2}(0,03 + 0,1V^{1,1})(V + \alpha + 0,5)^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Алюміній

$$\tau_r(d_m, \alpha, V, P) = \left(0,021 - 4,2 \frac{P}{V}\right) \alpha^2 + (1,17 + 0,01 \cdot P \cdot V^{0,02}) \alpha + 0,87 + 0,4VP^{0,3} + 2 \cdot 10^{-5} \frac{d_m}{P} + P^{0,3}(0,13 + 0,07 \cdot V^{1,23})(V + \alpha + 0,15)^{-1}. (2)$$

Цирконій

$$\tau_r(d_m, \alpha, V, P) = \left(0,017 - 3,4 \frac{P}{V}\right) \alpha^2 + (0,27 + 0,03 \cdot P \cdot V^{0,01}) \alpha + 0,65 + 0,07 \cdot V \cdot P^{0,2} + 9 \cdot 10^{-6} \frac{d_m}{P} + P^{0,54}(0,021 + 0,09V^{1,25})(V + \alpha + 0,18)^{-1}. (3)$$

Результати розрахунків що здійснювалися за формулами (1) – (3) продемонстровано на рис. 1 – 3. Ці дослідження дозволили встановити діапазони зміни часу горіння металевих частинок у продуктах термічного розкладання піротехнічних нітратно-металевих сумішей за різних умов. Визначено, що тривалість горіння суттєво залежить від природи металевого пального, дисперсності частинок, концентрації окиснювача та параметрів зовнішнього середовища, таких як температура та тиск ($\alpha = 0,5 - 1,5$; $P = 10^5 - 10^7$ Па; $V = 1 - 10$ м/с):

для частинок магнію $\tau_r = 3,45 \cdot 10^{-2} \dots 41,2 \cdot 10^{-2}$ с при $d_m = 50 \dots 300$ мкм;

для частинок алюмінію $\tau_r = 1,5 \cdot 10^{-2} \dots 5,9 \cdot 10^{-2}$ с при $d_m = 50 \dots 300$ мкм;

для частинок цирконію $\tau_r = 7,8 \cdot 10^{-3} \dots 2,7 \cdot 10^{-2}$ с при $d_m = 5 \dots 15$ мкм.

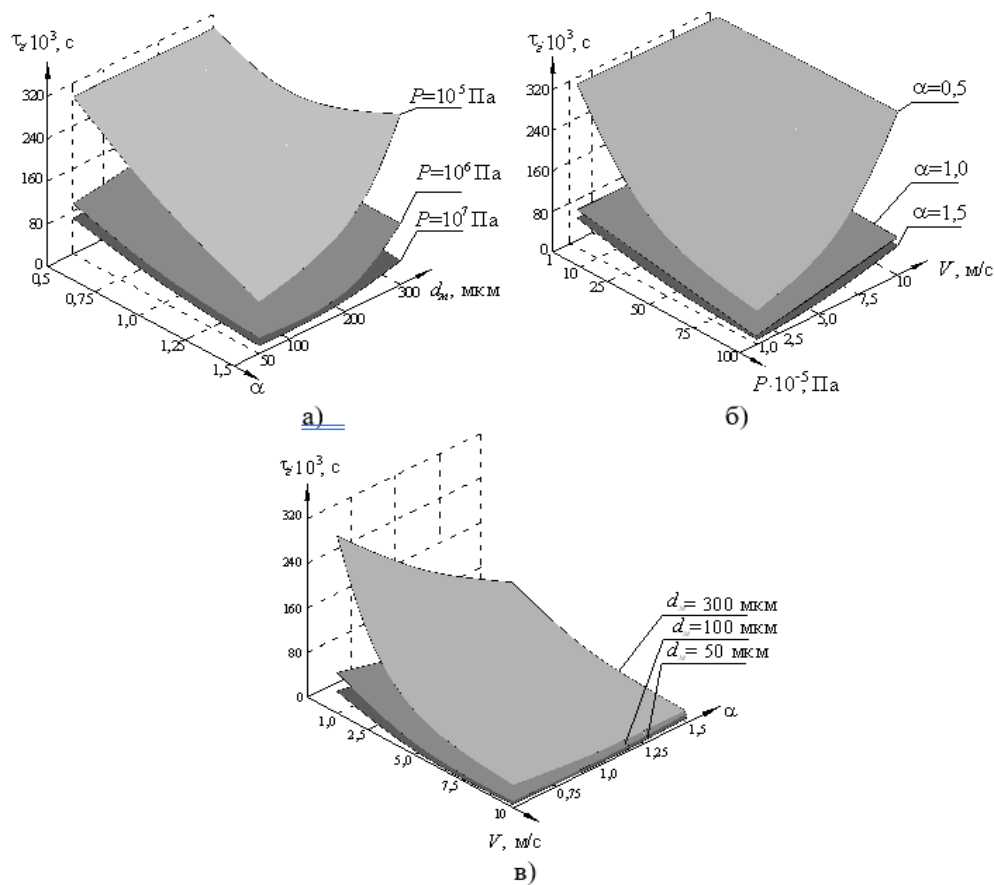


Рисунок 1 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок магнію від таких параметрів: а – від d_m та α ($V = 1$ м/с); б – від V та P ($d_m = 50$ мкм); в – від α та V ($P = 10^5$ Па)

Також, результати розрахунків для діапазонів зміни параметрів (d_m , α , P та V), що мають застосування в практичній складовій, демонструють, що механізм горіння частинок металів відбувається стало без вибухових фрагментацій. Модифікація згаданих параметрів значуще впливає на час згоряння частинок металів. Наприклад, збільшення розміру частинок металу d_m призводить до значного зростання часу згоряння τ_r (у 9 – 11 разів). З іншого боку, збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача α , зовнішнього тиску P та швидкості потоку V , призводить до зменшення часу згоряння τ_r відповідно у 1,6 – 1,9 разу (для V), у 1,9 – 3,2 разу (для α) та у 10 – 12 разів (для P).

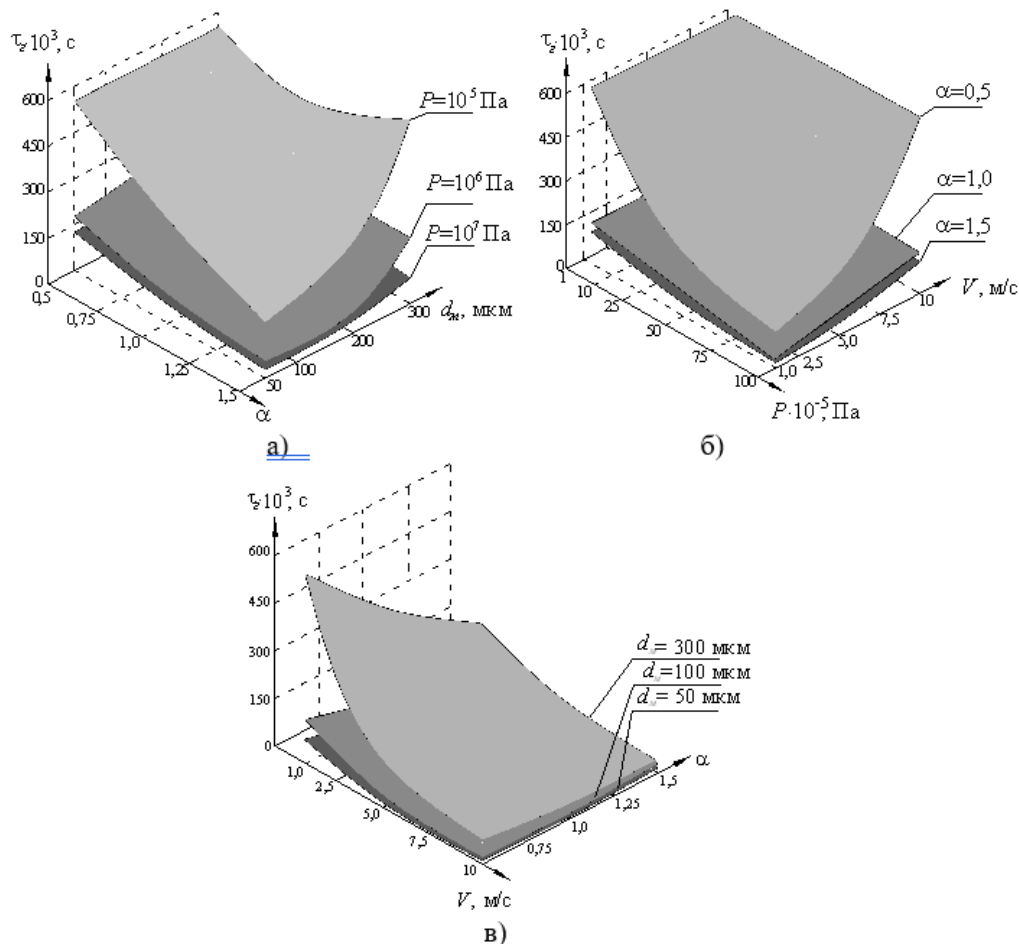


Рисунок 2 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок алюмінію від таких параметрів: а – від d_m та α ($V = 1 \text{ м/с}$); б – від V та P ($d_m = 50 \text{ мкм}$); в – від α та V ($P = 10^5 \text{ Па}$)

Розроблені експериментально-статистичні моделі (1) – (3) дають можливість створювати керовану базу даних щодо часу згоряння металевих частинок у продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів під впливом зовнішнього нагріву. Це стало можливим завдяки застосуванню стандартного спеціалізованого програмного забезпечення, що працює у діалоговому режимі на персональних комп'ютерах.

Дані моделі дозволяють оперативно аналізувати вплив технологічних параметрів сумішей (дисперсності металевого пального, співвідношення компонентів, природи окиснювача) та зовнішніх умов (температури середовища, тиску) на швидкість і тривалість процесу горіння.

Розроблена база даних може слугувати основою для створення загальної керованої системи експериментально-статистичних даних, призначеної для прогнозування пожежонебезпечних характеристик піротехнічних виробів різного призначення в умовах впливу зовнішніх термічних факторів. Це стосується ситуацій, пов'язаних із тепловим випромінюванням і конвекцією, що виникають під час пожеж, а також із впливом ударних термових дій надзвукових газових потоків на поверхню виробу в процесі пострілу та польоту.

Такі моделі та бази даних є важливими для подальшого розвитку безпечних піротехнічних матеріалів та технологій. Завдяки їм можна ефективніше прогнозувати поведінку піротехнічних виробів в екстремальних умовах, що сприятиме підвищенню їх безпеки та надійності.

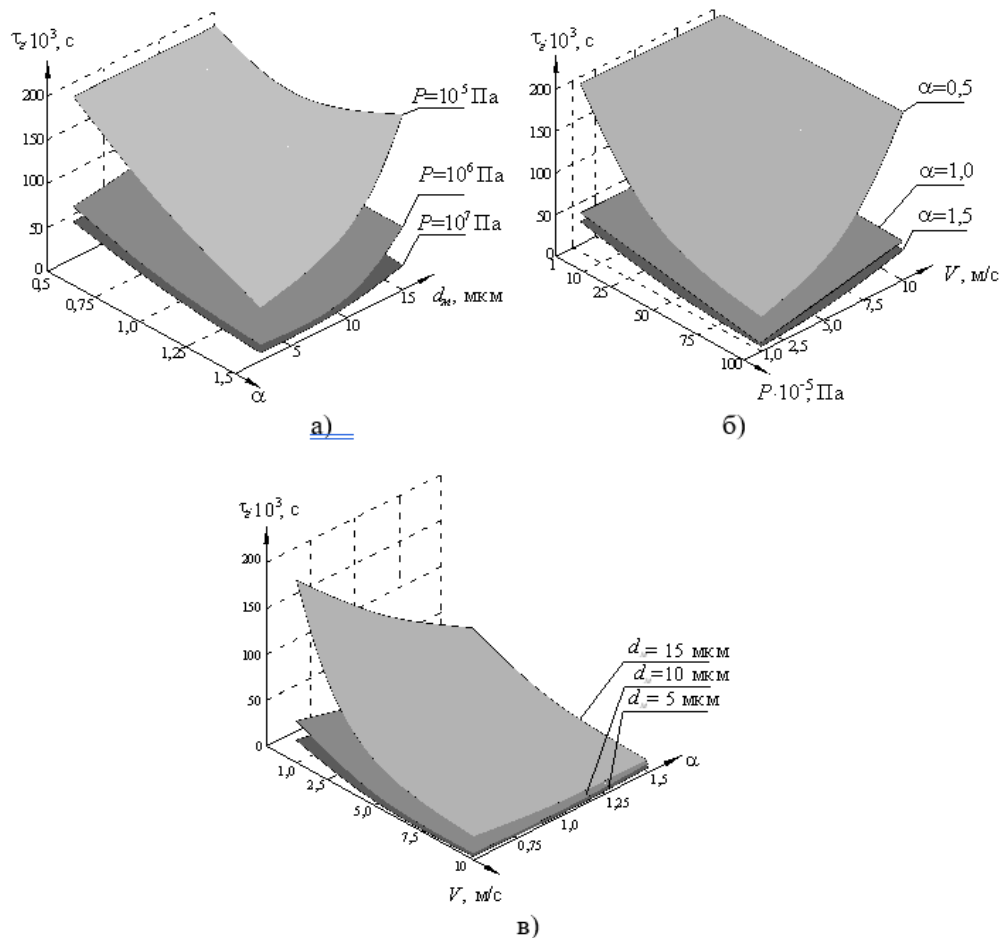


Рисунок 3 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок цирконію від таких параметрів: а – від d_m та α ($V = 1 \text{ м/с}$); б – від V та P ($d_m = 5 \text{ мкм}$); в – від α та V ($P = 10^5 \text{ Па}$)

Усі представлені графіки надають цілісне та глибоке уявлення про взаємодію ключових фізичних параметрів, таких як середній діаметр частинок, коефіцієнт теплопередачі, швидкість газового потоку і тиск, на процес горіння частинок металів. Ця інформація є критично важливою для розробки високоточних математичних моделей, які враховують специфічні умови горіння піротехнічних сумішей у газоподібному середовищі. Виявлення закономірностей та побудова таких моделей дозволяє прогнозувати динаміку горіння частинок металів, що особливо актуально для оцінки пожежонебезпечних характеристик піротехнічних сумішей у різноманітних умовах їх експлуатації. Це не тільки

сприяє підвищенню безпеки використання таких матеріалів, але й відкриває нові можливості для удосконалення їх складу та розробки більш стабільних технологічних процесів.

Висновки. Встановлено закономірність комплексного впливу різних фізичних параметрів на тривалість горіння частинок металів (магній, алюміній, цирконій) у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей. Зокрема, збільшення розміру частинок металевго пального від 5 мкм до 300 мкм незалежно від коефіцієнта надлишку окиснювача, швидкості потоку продуктів розкладання та зовнішнього тиску значно подовжує час їх горіння, збільшуючи його у 9–11 разів. У свою чергу, зростання коефіцієнта надлишку окиснювача від 0,5 до 1,5, швидкості потоку від 2 м/с до 9 м/с та зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па незалежно від розміру частинок металу призводить до зменшення часу їх горіння у 1,9–3,2 разу для коефіцієнта α , у 1,6–1,9 разу для швидкості та у 10–12 разів для тиску. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі з відносною похибкою 5–7%, які враховують вплив основних керованих параметрів, таких як розмір частинок металевго пального, коефіцієнт надлишку окиснювача, зовнішній тиск та швидкість потоку, на тривалість горіння частинок металів у продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів за умов зовнішніх термічних впливів на поверхню виробів. Створено інтерактивну базу розрахункових даних, яка дозволяє проводити точні розрахунки часу горіння частинок металів, що забезпечує практичне застосування отриманих результатів для прогнозування поведінки піротехнічних сумішей в екстремальних умовах. Виконані дослідження сприяють удосконаленню процесів та розробці більш безпечних матеріалів, мінімізуючи ризики пожежонебезпечних ситуацій у реальних умовах використання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ващенко В. А., О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заїка. Процеси горіння металізованих конденсованих систем. Монографія. – К.: Наукова думка, 2008 – 745 с.
2. Кириченко О. В., П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратомісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія. – К.: Наукова думка, 2012 – 318 с.
3. Кириченко О.В., Діброва О.С., Мотрічук Р.Б., Ващенко В.А., Колінько С.О. Цибулін В.В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки. 2019. № 3, С. 56-67. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874>
4. Belikov, A., Shkoliar, Ie., Motrychuk, R., Tomenko, M. Combustion processes of aluminum powder in pyrotechnic mixtures. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», 2024. №8(1), 122-130. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21888>
5. Kyrychenko, O.V., Zemliansky, O.M., Motrychuk, R.B., Shkoliar, Ie.V., Kovbasa V.O. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», 2023. №7(1), 191-201. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21883>
6. Кириченко Є., Гвоздь В., Кириченко О., Дядюшенко О. Попередження передчасного спрацьовування піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2022. № 2 (14) С. 35-43. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43>
7. Кириченко Є. П., Ковалишин В. В., Гвоздь В. М., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях.

Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 4. С. 68-82. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602>

8. N. Kozyar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk, Ya. Ballo, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar. Mathematical modelling of the combustion process of particles of two-component metal alloys in the decomposition products of pyrotechnic mixtures. Вісті Донецького гірничого інституту, 2024. №1(54), 50-62. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21894>

9. Н. Козяр, О. Кириченко, В. Ващенко, Є. Школяр, М. Куценко. Закономірності процесу горіння частинок металевго пального у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. Вісті Донецького гірничого інституту, 2024. №2(55), 92-105 <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24568>

REFERENCES

1. V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, Yu. H. Leha, P. I. Zaika. Protsesty horinnia metalizovanykh kondensovanykh system. Monohrafiia. – K.: Naukova dumka, 2008. – 745 s.

2. Kyrychenko O. V., P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, Yu. H. Leha. Osnovy pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnikh termovplyviv. Monohrafiia. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 s.

3. Kyrychenko, O.V., Dibrova, O.S., Motrychuk, R.B., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V.. Investigation of the influence of strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on fire safety of products on their basis, Bulletin of the Cherkasy State Technological University, 2019. №3, 56-67. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874>

4. Belikov, A., Shkoliar, Ie., Motrychuk, R., Tomenko, M. Combustion processes of aluminum powder in pyrotechnic mixtures. Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety, 2024. №8(1), 122-130. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21888>

5. Kyrychenko, O.V., Zemliansky, O.M., Motrychuk, R.B., Shkoliar, Ie.V., Kovbasa V.O. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety, 2023. №7(1), 191-201. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21883>

6. Kyrychenko, I., Hvoz, V., Kyrychenko, O., & Diadiushenko, O.. Prevention of previous operation of charges of pyrotechnical products based on mixtures of magnesium, aluminum powder and metal waste in the conditions of external thermal actions, Civil defense and fire safety, 2022. №2(14), 35-43. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43>

7. Kyrychenko, Y.P., Kovalyshyn, V.V., Gvoz, V.M., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V.. Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects. Bulletin of the Cherkasy State Technological University, 2021. №4, 68-82. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602>.

8. N. Kozyar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk, Ya. Ballo, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar. Mathematical modelling of the combustion process of particles of two-component metal alloys in the decomposition products of pyrotechnic mixtures. Visti Donetskoho hirnychoho instytutu, 2024. № 1(54), 50-62. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21894>

9. N. Kozyar, O. Kyrychenko, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar, Kutsenko M. Regularities of the combustion process of metallic fuel particles in the decomposition products of pyrotechnic multicomponent nitrate-metallized mixtures. Visti Donetskoho hirnychoho instytutu, 2024. №2(55), 92-105. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24568>

Viktoriia KOVBASA¹

Oksana KYRYCHENKO¹, doctor of technical sciences, professor

Mariia KUTSENKO¹, PhD in economics sciences, dotsent

Viacheslav VASHCHENKO², doctor of technical sciences, professor

Andriy BEREZOVSKIY¹, PhD in technical sciences, dotsent

Ievgenii SHKOLIAR¹, PhD in psychological sciences

Maryna TOMENKO¹, PhD in pedagogical sciences

¹National University of Civil Defense of Ukraine

²Cherkasy State Technological University

CONTROLLED DATABASE ON THE BURNING TIME OF METAL PARTICLES IN THE DECOMPOSITION PRODUCTS OF FLUOROPLAST-BASED METALLIZED PYROTECHNIC MIXTURES

The article explores new patterns in the complex influence of various parameters on the burning time of magnesium, aluminum, and zirconium particles in the decomposition products of fluoroplastic-based metallized pyrotechnic mixtures. Experimentally-statistical models have been developed for predicting the influence of technological parameters on the burning time of metal particles, enabling the formation of a database of fire hazard properties under external thermal effects. Under forced external heating conditions, pyrotechnic mixtures may ignite, causing accelerated combustion and destruction of products, posing a fire hazard to surrounding objects. Systematizing the obtained data allows for more accurate prediction of the fire hazard properties of pyrotechnic mixtures and the development of effective risk reduction measures.

To address the task, experimental-statistical modeling methods and specialized software were used to calculate the burning times of metal particles in the decomposition products of mixtures, enhancing the accuracy of predicting fire hazard properties under intense external heating conditions. The obtained results provide practical use of models for assessing and reducing fire hazard risks. Additionally, these models will contribute to the development of new, safer pyrotechnic materials and products. This research is an important step in ensuring safety during the transportation, storage, and use of pyrotechnic products in various conditions.

The obtained results ensure the practical application of models for evaluating and reducing fire hazard risks. Additionally, these models will contribute to the development of new, safer pyrotechnic materials and products. This research is an important step in ensuring safety during the transportation, storage, and use of pyrotechnic products under various conditions. These results also provide an opportunity to optimize technological production processes and improve resource efficiency.

The models take into account the influence of key controllable parameters (d_m , α , P , and V) on the burning time of metal fuel particles (magnesium, aluminum, zirconium) in the thermal decomposition products of fluoroplastic-based metallized pyrotechnic mixtures. External thermal effects on the surface of the products were also considered in the development of the models.

Key words: pyrotechnic mixtures, metal fuels, nitrate-containing oxidizers, organic and inorganic substances, ignition and burning processes.