

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

ДІБРОВА ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 614.8

**ПІДВИЩЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ПІРОТЕХНІЧНИХ
НІТРАТНО-ТИТАНОВИХ СУМІШЕЙ**

Спеціальність 21.06.02 – Пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кириченко Оксана В'ячеславівна
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки
Бєліков Анатолій Серафимович
Придніпровська державна академія будівництва й архітектури, м. Дніпро,
завідувач кафедри безпеки життєдіяльності

кандидат технічних наук
Марич Володимир Михайлович
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
ДСНС України, м. Львів,
старший викладач кафедри промислової безпеки та охорони праці

Захист відбудеться “18” листопада 2020 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 за електронною адресою: <http://nuczu.edu.ua>

Автореферат розісланий “16” жовтня 2020 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Андрій МИХАЙЛЮК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З кожним роком в Україні та у світі зростає кількість пожеж та вибухів при зберіганні, транспортуванні та застосуванні піротехнічних нітратно-металевих сумішей та їх компонентів, які входять до складу піротехнічних виробів різноманітного призначення (освітлювальних, сигнальних, трасуючих, феєрверочних тощо), що призводить до руйнування об'єктів, травмування та загибелі людей, наносять значні матеріальні збитки. В деяких випадках передчасні вибухонебезпечні спрацьовування як компонентів, так і самих піротехнічних сумішей мають катастрофічні наслідки і навіть можуть впливати на національну безпеку цілої держави. Так, наприклад, в порту м. Бейрут (2020 р.) сталися два потужних вибухи, що створили ударну хвилю, яка повністю зруйнувала припортову інфраструктуру та будівлі і споруди на відстані 10 км. В результаті вибуху загинуло 220 людей, 6000 людей було поранено та 110 людей зникли безвісти. Причиною другого вибуху стали 2750 тон нітрату амонію, що зберігалися в порту та піддалися зовнішнім термічним впливам наслідків першого вибуху, що в свою чергу стався в результаті пожежі на складі піротехніки.

Тому практичне значення мають способи попередження виникнення вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх термічних дій.

Нині дослідження щодо впливу різних технологічних параметрів (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнта ущільнення, діаметра заряду тощо) та зовнішніх умов (температури нагріву, зовнішнього тиску тощо) на процеси загоряння та розвитку горіння нітратно-титанових сумішей, зокрема, швидкість горіння та вибухонебезпечні режими його розвитку практично відсутні.

Тому розроблення наукових положень, які встановлюють основні закономірності процесів нагрівання, загоряння та розвитку горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей, як основи для попередження виникнення пожеж у випадку зовнішніх термодій є актуальною науково-технічною задачею, рішення якої присвячена дана дисертація.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у рамках виконання науково-дослідної роботи у Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України “Розробка рекомендацій щодо підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі нітратно-титанових сумішей в умовах застосування” (номер державної реєстрації 0119U002484), в якій здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета та завдання досліджень. Мета роботи полягає у встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів зразків піротехнічних нітратно-титанових сумішей та зовнішніх умов термічної дії на них, що дозволяють створювати пожежобезпечні піротехнічні вироби на їх основі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз зовнішніх термодій на зразки піротехнічних сумішей та встановити можливі шляхи підвищення їх пожежної безпеки в цих умовах;
- дослідити процеси розподілу температури та термопружних напружень по товщині зарядів піротехнічних сумішей для встановлення критичних значень параметрів зовнішніх термовпливів (теплових потоків, часів дії), що призводять до утворення тріщин, відколів та інших дефектів у поверхневих шарах зарядів та, у кінцевому підсумку, до їх передчасного вибухонебезпечного займання в умовах зовнішніх впливів;
- дослідити вплив технологічних параметрів зразків сумішей та зовнішніх чинників на їх міцність та її граничні значення в умовах підвищених температур нагріву;
- визначити залежності температури продуктів згоряння сумішей та вмісту в них високотемпературного конденсату від технологічних параметрів та зовнішніх умов;
- теоретично узагальнити фізико-хімічні параметри зон горіння зразків сумішей, встановити механізм їх горіння, розробити математичну модель процесу розвитку горіння при зовнішніх термодіях для визначення значень технологічних параметрів їх зразків та зовнішніх умов, перевищення яких призводить до виникнення нестійких, вибухонебезпечних режимів горіння;
- провести експериментальні дослідження для визначення комплексного впливу дисперсності порошків титану, складу, температури та тиску навколишнього середовища на температуру займання та час згоряння їх частинок в газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів;
- експериментально встановити залежності швидкостей та вибухонебезпечних режимів горіння нітратно-титанових сумішей від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень їх технологічних параметрів;
- розробити алгоритм визначення критичних значень технологічних параметрів зразків сумішей та зовнішніх умов, перевищення яких призводить до пожежонебезпечних руйнувань виробів та впровадити на підприємствах України.

Об'єкт дослідження - процеси займання та розвитку горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій при впливі технологічних параметрів на пожежну безпеку виробів.

Предмет дослідження - умови виникнення критичних режимів термічної дії на зразки піротехнічних нітратно-титанових сумішей, що призводять до їх загоряння та пожежонебезпечного руйнування виробів.

Методи досліджень. Для вирішення поставленої задачі використовувались сучасні методи фізико-хімічного аналізу (методи кінозйомки та мікрокінозйомки, методи рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального (МРСА) аналізів, термогравіметричні методи (ТГМ) та метод диференційного термічного аналізу (ДТА), чисельно-аналітичні методи вирішення задач

нелінійної теплопровідності, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних).

Випробування зразків сумішей та дослідження процесів їх спалахування, розвитку горіння та встановлення вибухонебезпечних режимів його протікання в умовах зовнішніх термодій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) здійснювались на стандартному піротехнічному обладнанні.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше:

- встановлено закономірності впливу коефіцієнта надлишку окиснювача та зовнішнього тиску на температуру продуктів згорання сумішей та вміст у них високотемпературного конденсату, що дозволяє на стадії виготовлення сумішей контролювати їх критичні значення та тим самим забезпечувати пожежонебезпечні властивості зарядів піротехнічних виробів при їх застосуванні; попереджати вибухонебезпечний розвиток їх горіння в умовах зовнішніх термодій;

- розроблено математичну модель процесу горіння ущільнених двокомпонентних сумішей титан + нітратовмісний окиснювач, яка враховує: температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей; кінетичні характеристики термічного розкладання окиснювача, спалахування та згорання частинок порошку титану у продуктах розкладання на поверхні горіння та у зоні полум'я, а також високотемпературного окиснення порошку титану у розплаві окиснювача; термодинамічні розрахунки температури та складу продуктів згорання сумішей, що дозволяє більш точно визначати вплив технологічних чинників та зовнішніх умов на швидкість розвитку процесу горіння сумішей та запобігати нестійкому та вибухонебезпечному його розвитку;

- експериментально встановлено, що збільшення температури нагріву від 300 К до 800 К та зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до зростання швидкості горіння сумішей у 1,3...3,5 рази та виникнення вибухонебезпечних режимів розвитку їх горіння; при цьому збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші та середнього розміру частинок металевого пального зменшують швидкість процесу горіння, стабілізуючи його, що дозволяє шляхом регулювання технологічними параметрами зарядів сумішей запобігати передчасному спалахуванню сумішей, а також нестійкому та вибухонебезпечному розвитку процесу їх горіння в умовах зовнішніх термічних дій.

2. Уточнені, отримали подальший розвиток:

- математичні моделі зовнішнього термічного впливу на зразки сумішей шляхом врахування їх геометричної форми (плоскої, циліндричної, сферичної), а також температурних залежностей теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності), що дозволяє більш точно визначати критичні параметри зовнішніх термовпливів, та тим самим запобігати розвитку пожежовибухонебезпечного стану сумішей;

- дослідження закономірностей впливу технологічних параметрів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, природи окиснювача) та зовнішніх чинників (температури нагріву, тиску та складу оточуючого середовища) на температуру займання та час горіння частинок металу в продуктах термічного розкладання окиснювача, що дозволяє визначати критичні діапазони зміни параметрів зовнішніх термічних впливів і технологічних параметрів зарядів сумішей і не допускати передчасних пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів.

Обґрунтування та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується:

- використанням сучасних методів математичного та експериментально-статистичного моделювання процесів термічного впливу, займання та розвитку горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей, а також системи рівнянь термопружності, тепло- та масообміну та хімічної кінетики; методів регресійного та кореляційного аналізів, чисельно-аналітичних методів розв'язання рівнянь сучасними комп'ютерами з використанням стандартних пакетів програм;
- відповідністю сучасним уявленням про фізико-хімічні процеси, що протікають у піротехнічних сумішах при їх загорянні, а також задовільною збіжністю результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними (відносна похибка 5...10 %);
- використанням стандартного піротехнічного обладнання та сучасних засобів виміральної техніки, а також широкою апробацією та практичним впровадженням результатів роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні та впровадженні:

- засобів контролю та технологічних рекомендацій для зниження вірогідності пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні з урахуванням зовнішніх термічних дій, які використовуються у роботах Департаменту по запобіганню надзвичайним ситуаціям ДСНС України при здійсненні ринкового нагляду за піротехнічною продукцією, аналізу і відповідності технічному регламенту «Піротехнічні вироби» (акт впровадження від 21.04.2020);
- алгоритму визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів та технологічних параметрів зарядів піротехнічних нітратно-титанових сумішей, який покладено в основу «Рекомендацій щодо підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі нітратно-титанових сумішей в умовах застосування», які доповнюють нормативні документи на проектування, виготовлення, зберігання, транспортування та реалізацію серійних піротехнічних виробів (акт впровадження Державного центру сертифікації ДСНС України від 12.03.2020);

- пропозицій щодо підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових виробів в умовах зовнішніх термічних дій, які використовуються УкрНДІЦЗ під час розроблення та розгляду технічних умов, регламентів, стандартів, пов'язаних з розробленням та обсягом піротехнічних виробів (зберігання, транспортування, застосування), а також будуть впроваджені під час перегляду ДСТУ 4316-2004 “Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи впровадження” у рамках реалізації планів інституту зі стандартизації за своєю компетентністю (акт впровадження від 20.12.2019);
- рекомендацій щодо підвищення пожежної безпеки виробів на основі піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах застосування пройшли апробацію в пожежно-рятувальних підрозділах Дніпропетровської області та мають позитивний результат (акт впровадження ГУ ДСНС України у Дніпропетровській області від 26.03.2020);
- результатів досліджень з визначення критичних температур нагріву окиснювачів, які характеризують процеси початку їх розкладання з утворення токсичних газоутворюючих продуктів, його інтенсифікацію в умовах пожежі в складських приміщеннях, де зберігаються порошки хімічно активних компонентів, що дозволило знизити небезпеку перетворювання сировини, що використовується для отримання продукції, яка випускається в непридатний стан при виникненні пожежі під час зберігання або транспортування (акт впровадження ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» від 16.04.2020);
- результати експериментальних та теоретичних досліджень з визначення критичних умов експлуатації піротехнічних виробів на основі нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів мають практичне значення для технологів ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон» та планується до використання після відповідної їх адаптації для попередньої оцінки пожежної безпеки та визначення граничних умов застосування готових піротехнічних виробів (ХТЦ, термобаричний вміст боєприпасів тощо) під дією аеродинамічного нагріву та змінного тиску (акт впровадження ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон» від 23.04.2020);
- у використанні в навчальному процесі в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту при здійсненні підготовки фахівців для ДСНС за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» освітнього ступеня «бакалавр», «магістр» та при підготовки ад'юнктів під час вивчення дисциплін «Пожежна профілактика технологічних процесів», «Пожежна безпека об'єктів підвищеної небезпеки», «Теорія розвитку та припинення горіння», «Пожежна безпека промислових об'єктів та управління ризиками», «Техногенна безпека об'єктів» (акт впровадження від 12.05.2020).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, які опубліковано у співавторстві особистий внесок здобувача полягає в наступному: проведено аналіз можливих термічних дій на зразки піротехнічних сумішей та сформульовано шляхи виключення їх передчасного загоряння та пожежонебезпечного руйнування [1, 2, 20]; проведено експериментальні дослідження визначення закономірностей впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, ступеня їх ущільнення та ін.) на міцність зразків сумішей та її граничні значення в умовах зовнішніх термічних впливів [6, 9, 15]; проведено термодинамічні розрахунки залежностей температури продуктів згоряння сумішей та вмісту в них високотемпературного конденсату від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску [7, 12, 16]; проведено експериментальні дослідження з визначення закономірностей процесів високотемпературного окиснення, спалахування та горіння титанових порошоків у газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів [8, 10, 18]; проведено експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу технологічних чинників зразків сумішей (коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші, дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення) та зовнішніх умов (підвищених температур нагріву та тисків) на швидкість розвитку процесу горіння, температуру продуктів згоряння та вмісту у них високотемпературного конденсату [4, 5, 13, 16, 17, 19]; розроблено математичні моделі та методи розрахунку процесів нагрівання поверхні зразків піротехнічних нітратно-титанових сумішей зовнішніми тепловими джерелами для визначення їх критичних значень, що призводять до поверхневого руйнування зразків, передчасного їх займання та пожежонебезпечного руйнування виробів [3, 14, 15]; розроблено математичну модель горіння ущільнених сумішей з порошоків титану та нітратновмісних окиснювачів для визначення закономірностей впливу технологічних чинників та зовнішніх умов на стійкі вибухобезпечні режими розвитку горіння сумішей із врахуванням впливу зовнішніх термічних дій [11, 12]; розроблено алгоритм визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів для різних технологічних чинників, перевищення яких призводить до виникнення пожежонебезпечних руйнувань виробів з утворенням багаточисельних локальних пожеж [3, 4].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались та отримали схвалення на науково-практичних конференціях і семінарах: VII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 21 жовтня 2017 р.); VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю “Надзвичайні ситуації: безпека та захист” (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2018 р.); IV International Scientific Conference “High technologies. Business. Society” (Borovets, Bulgaria, 11 – 14.03.2019); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю “Надзвичайні ситуації: безпека та захист” (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 24 – 25 жовтня 2019 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних

ситуацій” (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 11 – 12 квітня 2019 р.); XIV Международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей), ученых (г. Минск, 8 – 9 апреля 2020 г.); XI Міжнародній науково-практичній конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій” (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 10 квітня 2020 р.); 20-м Международном научно-техническом семинаре «Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (г. Тбилиси, 23-28 березня 2020 р.).

Публікації. Результати досліджень, що подані у дисертації, опубліковано у 20 наукових роботах, а саме в 11 статтях, із них 2 статті у іноземних виданнях, 7 у фахових виданнях України, 9 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 143 найменування, містить 246 сторінок друкованого тексту (з них 164 сторінки основного тексту), 38 таблиць, 103 рисунків, 2 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету, задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, показано особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** проаналізовано випадки пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів на основі нітратно-металевих сумішей при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні, що сталися в Україні та у світі за останні десятиліття.

Встановлено, що в умовах пожеж в результаті вимушених зовнішніх термічних впливів на вироби відбувається передчасне спалахування та вибухонебезпечний розвиток горіння їх зарядів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, що призводить до пожежонебезпечних руйнувань навколишніх об'єктів (складів, житлових будівель, пускових установок тощо), великих матеріальних збитків (десятків та сотень мільйонів грн.), загибелі людей.

Тому основним питанням у зниженні пожежної небезпеки піротехнічних нітратно-металевих виробів при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні в умовах зовнішніх термічних впливів є попередження пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів. Для цього необхідно розробити науково обґрунтований метод визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів, перевищення яких призводить до утворення тріщин, відколів та ін. дефектів у поверхневих шарах зарядів сумішей із подальшим передчасним їх займанням та вибухонебезпечним розвитком горіння в умовах зростання температури нагріву та тиску навколишнього середовища.

Для створення такого методу необхідно мати результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів зовнішнього нагріву, займання та розвитку горіння ущільнених нітратно-титанових сумішей, що складають основу багатьох піротехнічних виробів, з визначенням закономірностей впливу зовнішніх умов на їх вибухонебезпечні режими протікання.

Процесами займання та розвитку горіння піротехнічних сумішей у різних зовнішніх умовах займались багато відомих вчених: Бельдюкович П.А., Брауер К.С., Беліков А.С., Ващенко В.А., Григор'єв Ю.М., Деминов Р.С., Елерн М.С., Кириченко О.В., Кашпоров Л.Я., Мадякін Ф.П., Марич В.М., Нігматулін Д.К., Павлишин В.Г., Постовський Д.І., Осборн Ш.Р., Силін Н.А., Сидоров А.І., Шидловський А.А., Шахіджанов Є.С. та ін. Однак, проведений аналіз існуючих досліджень за цими напрямками дозволив встановити, що:

- відсутні дані про розподіли температури та термодинамічних напружень по товщині зарядів піротехнічних нітратно-титанових сумішей в залежності від параметрів зовнішніх термічних впливів (теплового потоку, часів його впливу тощо) з врахуванням температурних залежностей теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності);
- не проведено дослідження впливу технологічних чинників зразків сумішей та зовнішніх умов на їх міцність та її граничні значення в умовах зовнішніх термічних впливів;
- не визначено критичні режими нагріву зарядів сумішей зовнішніми тепловими потоками, перевищення яких призводить до передчасного загоряння сумішей та пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів;
- не визначено закономірності впливу дисперсності порошоків титану та параметрів навколишнього середовища (температури, тиску, відносної концентрації кисню, швидкості газового потоку та ін.) на температуру їх займання та час згоряння у газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ та ін.) при температурах, притаманних конденсованій фазі на поверхні горіння сумішей, що розглядаються;
- відсутні дані про вплив параметрів зовнішніх дій (температури нагріву, зовнішнього тиску, складу навколишнього середовища та ін.) на температуру продуктів згоряння сумішей та вміст у них високотемпературного конденсату для різних співвідношень компонентів;
- відсутні теоретичні дослідження механізму горіння двокомпонентних ущільнених сумішей із порошку титану та нітратовмісного окиснювача та модель процесу їх горіння, що враховують основні з досліджених фізико-хімічних чинників та дозволяють визначати швидкість розвитку стійкого вибухонебезпечного горіння сумішей;
- недостатні та відсутні експериментальні дослідження впливу параметрів зовнішніх термодій та технологічних чинників зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на швидкість розвитку їх процесу горіння для визначення критичних значень останніх.

Результати виконаного аналізу сучасного стану питання пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових виробів дозволили сформулювати мету та визначити задачі досліджень.

У **другому розділі** наведено загальну методику проведення досліджень підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових виробів в умовах зовнішніх термічних впливів шляхом знаходження критичних значень параметрів цих впливів, а також технологічних чинників зарядів сумішей, перевищення яких призводить до їх поверхневого руйнування, передчасного займання та розвитку вибухового горіння та пожежонебезпечного руйнування виробів. Такий підхід до вирішення задачі передбачає дослідження процесів нагріву виробів зовнішніми джерелами теплового впливу (осередки пожежі, ударні теплові впливи в умовах застосування тощо), термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів, а також високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металевго пального у газоподібних продуктах їх розкладання, займання та розвитку горіння зарядів сумішей при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках.

Для проведення досліджень використовувались стандартні у піротехніці методи фізико-хімічного аналізу та сучасні методи математичного моделювання, чисельні методи рішення рівнянь тепло- та масо-переносу, рівнянь термопружності, а також методи математичної статистики з використанням стандартних пакетів прикладних програм. Для моделювання впливу підвищених температур нагріву (до 800 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на швидкість та граничні режими горіння сумішей використовувалось стандартне піротехнічне обладнання.

Як зразки нітратно-титанових сумішей використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з порошків металевго пального (титана) та нітратовмісного окиснювача (нітратів натрію, калію, барію, стронцію), які виготовлялись різними методами ущільнюючого формування, головним чином пресуванням. При вивченні впливу дисперсності порошків металевго пального та окиснювача на характеристики горіння сумішей використовувались стандартні порошки, що випускаються промисловістю. Коефіцієнт ущільнення K_v для зразків складав 0,9...0,95, тобто зразки сумішей, що використовувались, мали практично максимальні значення та були газонепроникними. Діаметр пресованих зразків сумішей складав $d = 2...3 \cdot 10^{-2}$ м. При цьому для забезпечення стійких режимів горіння зразків сумішей висоти запресовок при вказаних діаметрах складали $h = 3...4 \cdot 10^{-2}$ м.

У **третьому розділі** представлено результати теоретичних досліджень з визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій (теплових потоків, часів їх дії тощо) на зразки піротехнічних сумішей різної геометричної форми (плоскі, циліндричні, та сферичні зразки), перевищення яких призводить до руйнування зразків сумішей (утворення тріщин, відшарувань тощо), зменшення їх міцності, а також до вибухонебезпечного розвитку їх займання та горіння при експлуатації піротехнічних виробів.

Спочатку розглядається комплекс нелінійних та нестационарних математичних моделей нагріву зразків різної геометричної форми та розмірів, що враховують на відміну від існуючих моделей, температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей: об'ємної теплоємності $C_V(T) = C_{V0} \cdot T^\nu$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu$, де C_V , λ_0 , ν – емпіричні константи. Наприклад, як рівняння математичної моделі нагріву плоского зразка (рис. 1) використовувались наступні стандартні рівняння теплопровідності та термопружності з урахуванням залежностей $C_V(T)$ та $\lambda(T)$:

$$C_V(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right), \quad 0 < z < H, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$T(z,t)|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = q_n(t), \quad (3)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(\sigma + \frac{\alpha_T E}{1-\hat{\nu}} \cdot T \right) = 0, \quad (5)$$

де σ – термопружні напруження; α_T – коефіцієнт термічного розширення; E – модуль Юнга; $\hat{\nu}$ – коефіцієнт Пуассона.

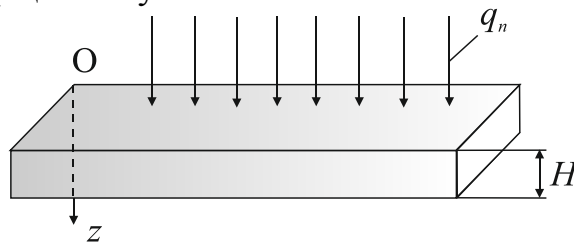


Рис. 1. Схема нагрівання плоского зразка зовнішньою тепловою дією: H – товщина зразка; q_n – сталий зовнішній тепловий потік

Внаслідок проведених розрахунків (рис. 2, 3) було встановлено, що по товщині зразка термопружні напруження істотно нерівномірні: поблизу його поверхні мають місце стискаючі напруження ($\sigma < 0$, $|\sigma|_{max} = 4,9 \cdot 10^6 \dots 5,2 \cdot 10^6$ Н/м² – для Ti + NaNO₃ та $|\sigma|_{max} = 1,8 \cdot 10^6 \dots 3,4 \cdot 10^6$ Н/м² – для Ti + Ba(NO₃)₂), а на нижньому боці – розтяжні напруження ($\sigma > 0$, $|\sigma|_{max} = 1,3 \cdot 10^6 \dots 1,7 \cdot 10^6$ Н/м² – для Ti + NaNO₃ та $|\sigma|_{max} = 0,5 \cdot 10^6 \dots 1,3 \cdot 10^6$ Н/м² – для Ti + Ba(NO₃)₂). При зіставленні значень $|\sigma|_{max}$ з їх критичними значеннями σ^* було встановлено, що при деяких критичних значеннях t^* (так само як і при критичних значеннях q_n^*) починає виконуватись умова $|\sigma|_{max} > \sigma^*$, тобто зразок суміші починає руйнуватись.

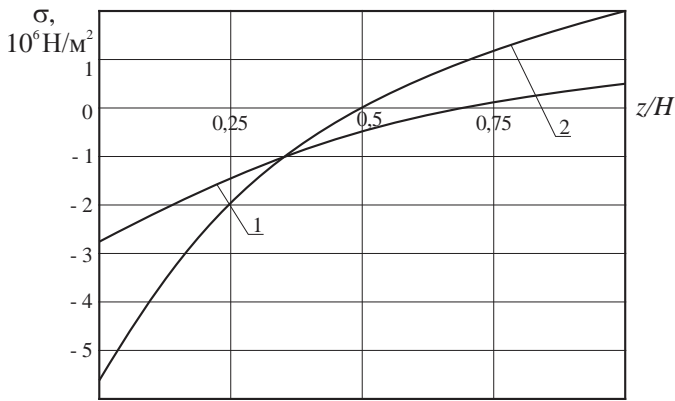


Рис. 2. Розподіл термопружних напружень по товщині плоского зразка $Ti + NaNO_3$ залежно від зовнішнього теплового потоку q_n ($T_0 = 300$ К; $t = 0,6$ с; $H = 4 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha = 0,5$; $d_N = 50$ мкм; $d_m = 45$ мкм): 1 – $q_n = 1,6 \cdot 10^5$ Вт/м²; 2 – $q_n = 2,1 \cdot 10^5$ Вт/м²

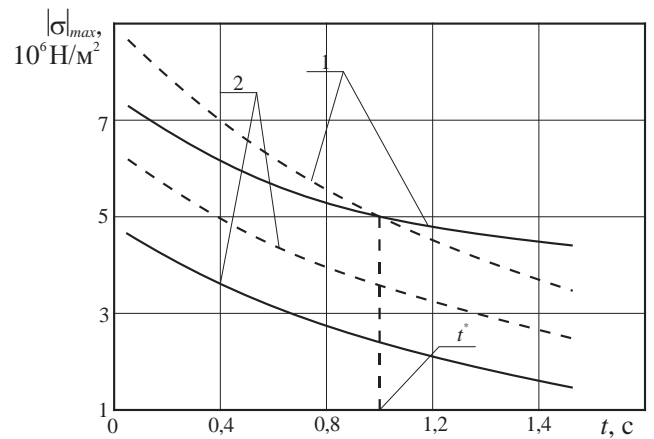


Рис. 3. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоскому зразку $Ti + Ba(NO_3)_2$ від часу зовнішньої теплової дії для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К; $H = 10^{-2}$ м; $\alpha = 0,5$; $d_N = 50$ мкм; $d_m = 45$ мкм): 1 – $q_n = 1,6 \cdot 10^5$ Вт/м²; 2 – $q_n = 2,1 \cdot 10^5$ Вт/м²; --- – критичні значення σ^*

Далі за допомогою термодинамічних розрахунків були вивчені залежності температури продуктів згоряння сумішей T_2 та вмісту в них високотемпературного конденсату g_k від технологічних параметрів та зовнішніх умов (рис. 4, 5): величина T_2 має максимальні значення $T_{2max} = 3290 \dots 4495$ К при коефіцієнтах надлишку окиснювача $\alpha_{T_{2max}} = 0,98 \dots 1,04$; збільшення зовнішнього тиску в діапазоні $P = 10^5 \dots 10^7$ Па призводить до зростання T_2 у 1,3...1,4 рази; величина g_k суттєво залежить від α та P , зокрема, збільшення P до 10^7 Па призводить до зростання g_k у 1,8...2,9 рази.

Отримані результати термодинамічних розрахунків можуть бути використані для визначення пожежонебезпечних ситуацій при позаштатному спрацьовуванні піротехнічних виробів (наприклад, при спалахуванні складських приміщень, де зберігаються вироби, або при їх запуску на стартових майданчиках).

На основі проведених експериментальних досліджень механізму горіння сумішей, що розглядаються представлено нову модель їх горіння, яка відрізняється від відомих моделей горіння піротехнічних сумішей урахуванням наступних чинників: кінетичних процесів термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів, а також високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок порошку металевого пального у газоподібних продуктах розкладання; затримки частинок металу на поверхні горіння аж до їх повного згоряння в результаті агломерації при підвищених температурах

нагріву; результатів термодинамічних розрахунків температури продуктів згоряння сумішей та вмісту в них високотемпературного конденсату.

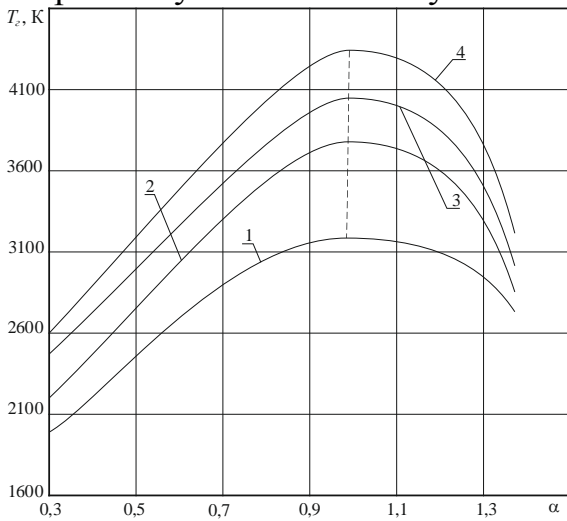


Рис. 4. Залежність температури продуктів згоряння суміші $T_i + \text{NaNO}_3$ від коефіцієнта надлишку окиснювача при тисках: 1 – $P = 10^5$ Па, 2 – $P = 10^6$ Па, 3 – $P = 0,5 \cdot 10^7$ Па, 4 – $P = 10^7$ Па

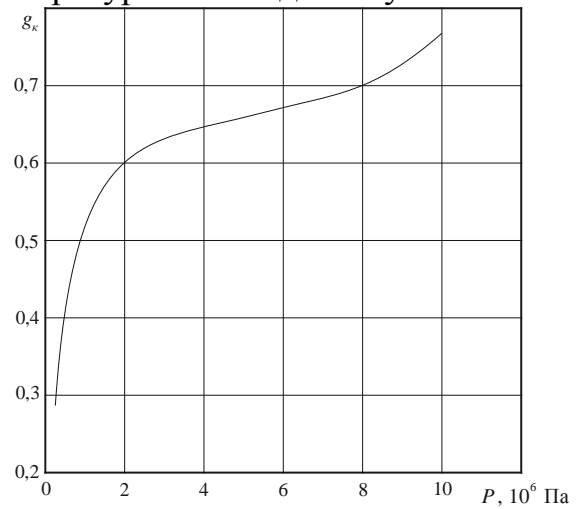


Рис. 5. Залежність відносного масового вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння стехіометричних сумішей $T_i + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ від зовнішнього тиску

В основу запропонованої моделі горіння сумішей було покладено систему рівнянь тепло та масо-переносу та хімічної кінетики:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_c \frac{dT}{dx} \right) - \rho_c c_c \frac{dT}{dx} - H_{ок} \rho_c u \zeta_{ок} \frac{d\psi_1}{dx} + H_M \rho_c \zeta_M u \frac{d\psi_2}{dx} = 0; \quad (6)$$

$$u \frac{d\psi_1}{dx} = K_1 e^{-E_1/(RT)}; \quad (7)$$

$$u \frac{d\psi_2}{dx} = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{\rho}_e^n e^{-E_2/(RT)} \quad (8)$$

з граничними умовами:

$$T = T_0, \psi_1 = \psi_2 = 0 \text{ при } x \rightarrow -\infty; \quad (9)$$

$$T = T_n, \psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n}; \lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = q_n + q_k + q_R \text{ при } x = 0. \quad (10)$$

Тут ρ_c , c_c , λ_c – густина (кг/м^3), питома теплоємність ($\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$) і коефіцієнт теплопровідності ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$) суміші; $H_{ок}$, H_M – теплові ефекти реакцій розкладання окиснювача та окиснення металевого пального (Дж/кг); ψ_i , K_i та E_i ($i = \overline{1,2}$) – відносні ступені розкладання окиснювача та окиснення металевого пального (по масі) та їх кінетичні константи (с^{-1} , кДж/моль) відповідно; $E_i \gg RT$; $\zeta_{ок}$, ζ_M – відносні масові вмісти окиснювача та металевого пального в суміші відповідно; q_n – тепловий потік від частинок металу, що згорають на поверхні горіння, Вт/м^2 ; q_k , q_R – кондуктивний та радіаційний теплові потоки з зони полум'я відповідно, Вт/м^2 ; $\bar{\rho}_e$ – густина газового середовища;

C_{O_2} – відносна концентрація кисню у продуктах розкладання окиснювача; m , n – емпіричні константи. $\alpha = \zeta_{ок} / (\zeta_M \cdot l_c)$ – коефіцієнт надлишку окиснювача (l_c – стехіометричний коефіцієнт); $\alpha < 1$ – суміш

з надлишком металевого пального; $\alpha > 1$ – суміш з надлишком окиснювача; $\alpha = 1$ – стехіометрична суміш.

В результаті проведених теоретико-експериментальних досліджень було встановлено, що для нітратно-титанових сумішей виконується умова: $q_n \gg q_k, q_R$, тобто у рівняннях системи (6) – (10) тепловими потоками q_k та q_R можна у першому наближенні знехтувати.

З використанням необхідних значень фізико-хімічних параметрів сумішей та їх компонентів по вказаним вище рівнянням було проведено розрахунки залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності металевого пального), а також основних параметрів зовнішніх термодій (температури нагріву, зовнішнього тиску) (рис. 6).

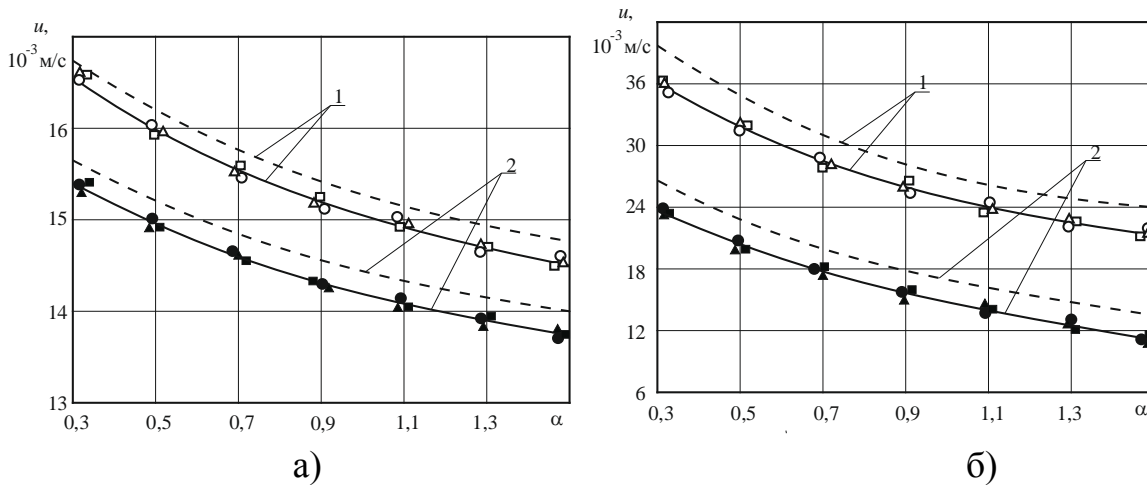


Рис. 6. Залежності швидкості горіння суміші $Ti + NaNO_3$ від коефіцієнта надлишку окислювача для різних температур нагріву T_0 та зовнішніх тисків P : а) – вплив T_0 (1 – $T_0 = 800$ К; 2 – $T_0 = 400$ К; $d_m = 45$ мкм; $P = 10^5$ Па); б) – вплив P (3 – $P = 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $T_0 = 300$ К; $d_m = 135$ мкм); – – – – розрахункова крива; ————— експериментальна крива; ■, □, △, ▲, ○, ● – експериментальні дані

За результатами проведених розрахунків було встановлено наступні критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей, перевищення яких призводить до нестабільного вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння в умовах зовнішніх термодій:

$$u^{**} \leq u \leq u^*, \quad (11)$$

де $u^* = 5,4 \cdot 10^{-2} \dots 6,9 \cdot 10^{-2}$ м/с та $u^{**} = 2,3 \cdot 10^{-3} \dots 3,8 \cdot 10^{-3}$ м/с – для усіх досліджених діапазонів зміни технологічних чинників та параметрів зовнішніх дій.

Зіставлення результатів розрахунків із отриманими експериментальними даними показує, що розроблена математична модель на практиці дозволяє більш точно (відносна похибка складає 5...9 % замість 10...12 % у існуючих моделей горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей) визначати вплив підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків (для різних співвідношень компонентів у суміші та їх дисперсності) на швидкість горіння сумішей, а також

критичні режими стійкого розповсюдження горіння в умовах зовнішніх впливів та пожежонебезпечних ситуацій, що виникають в умовах зберігання, транспортування та застосування піротехнічних виробів різного призначення.

У **четвертому розділі** в результаті проведених експериментальних досліджень встановлено наступні нові залежності міцності зразків сумішей від їх технологічних параметрів та зовнішніх чинників: міцність зразків на розтяг нижче у напрямку пресування, а їх міцність на стиснення в цьому напрямку вище; при збільшенні вмісту порошку металевого пального у суміші міцність її зразків монотонно зростає, прямуючи до одного й того ж граничного значення; при збільшенні дисперсності порошоків титана та окиснювача від 45 мкм до 250 мкм міцність зразків сумішей зменшується у 1,3...1,6 рази незалежно від їх природи; при збільшенні температури нагріву T_0 суміші до 800 К величина граничних термопружних напружень σ^* зменшується у 1,6...2,7 рази; найбільш сильний вплив на залежність $\sigma^*(T_0)$ надає параметр α – при збільшенні α від 0,15 до 1,86 σ^* зменшується у 2,1...3,7 рази.

На основі отриманих експериментальних даних показано, що для робочих діапазонів зміни технологічних чинників ($\alpha = 0,3...1,4$; $K_V = 0,9...0,95$; $d_m = 45...280$ мкм; $d_N < 280$ мкм) та параметрів навколишнього середовища ($C_{O_2} = 0,2...0,8$; $P = 10^5...10^7$ Па) при застосуванні піротехнічних нітратно-титанових сумішей процеси займання металевих палих у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача, а також розвиток процесу горіння сумішей протікають стабільно та не носять вибухонебезпечного характеру.

Встановлено наступні закономірності комплексного впливу на температуру займання T_3 та час горіння τ_2 частинок металу у газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісного окиснювача наступних параметрів (рис. 7): збільшення розміру частинок від $d_m = 45$ мкм до 280 мкм призводить до зменшення T_3 у 1,1...1,2 рази; збільшення відносного вмісту кисню від $C_{O_2} = 0,2$ до $C_{O_2} = 0,8$ призводить до зменшення T_3 у 1,25...1,3 рази; підвищення зовнішнього тиску від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па призводить до зростання T_3 у 1,3...1,35 рази; збільшення d_m від $d_m = 45$ мкм до $d_m = 280$ мкм призводить до зростання τ_2 у 4...6 разів; збільшення C_{O_2} та P – до зменшення τ_2 у 1,8...3,2 (для C_{O_2}) та у 1,6...3,3 рази (для P).

По отриманим даним були розроблені нові експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 5...8 %) для розрахунку впливу основних параметрів (d_m , C_{O_2} , P), а також швидкості газового потоку продуктів розкладання V (для τ_2) на температуру займання та час згоряння частинок металевого пального (титана) у газоподібному середовищі $O_2 + N_2$ в умовах зовнішніх термічних дій на поверхню зарядів сумішей:

$$T_3(d_m, C_{O_2}, P) = A_0 + A_1 \cdot C_{O_2} + A_2 \cdot C_{O_2}^2 + A_3 \cdot d_m + A_4 \cdot d_m^2 + A_5 \cdot P + A_6 \cdot P^2 + A_7 \cdot C_{O_2} \cdot d_m, \quad (12)$$

$$\tau_z(d_m, C_{O_2}, P, V) = (B_0 + B_1 \cdot P \cdot V^{B_2}) \cdot C_{O_2} + \left(B_3 - B_4 \cdot \frac{P}{V} \right) \cdot C_{O_2}^2 + B_5 + B_6 \cdot V^{B_7} + B_7 \cdot \frac{d_m}{P} + P^{B_8} \cdot (B_9 + B_{10} \cdot V^{B_{11}}) \cdot (V + C_{O_2} + B_{12})^{-1}, \quad (13)$$

де A_i ($i=\overline{0,7}$), B_j ($j=\overline{0,12}$) – емпіричні коефіцієнти, що залежать від природи окиснювача.

Розроблені моделі (12), (13) дозволяють формувати базу даних по критичним значенням технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів) в умовах підвищених температур нагріву, перевищення яких призводить до передчасного займання та розвитку вибухового горіння (фрагментації) частинок металевого пального (титана) в продуктах розкладання сумішей.

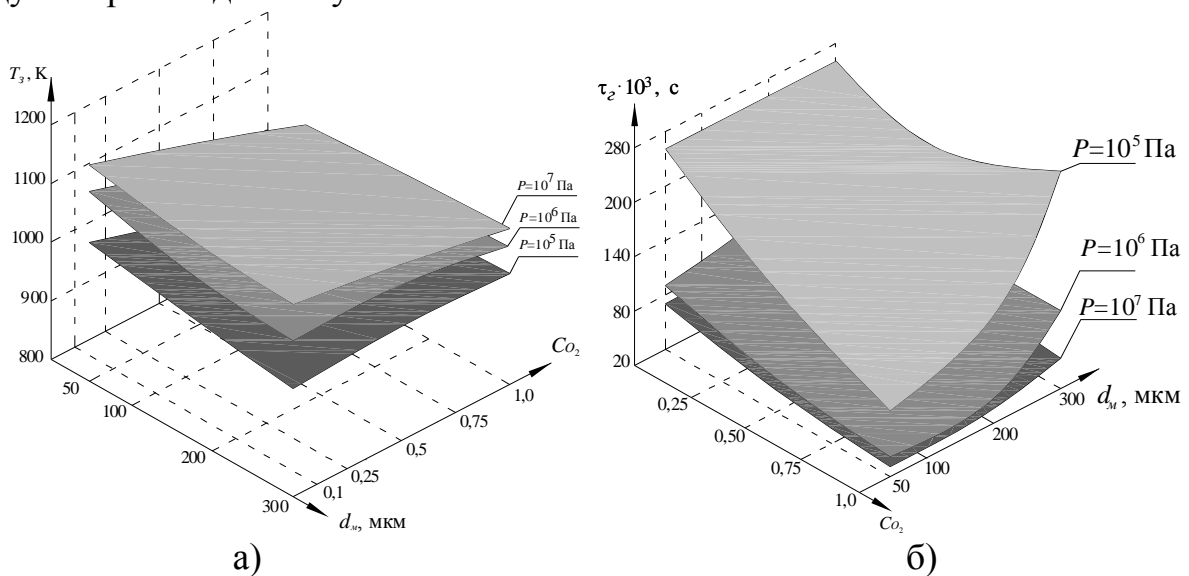


Рис. 7. Залежності температури займання (а) та часу згоряння (б) частинки титана у газовому середовищі $O_2 + N_2$ від параметрів d_m та C_{O_2} для різних значень P

Експериментально встановлено нові закономірності впливу коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші α та зовнішнього тиску P на відносний масовий вміст високотемпературного конденсату g_k у продуктах згоряння суміші: збільшення α від $\alpha = 0,3$ до $\alpha = 1,4$ та P від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па призводить до збільшення g_k у 2...3 рази; при цьому залежності $g_k(\alpha, P)$ мають екстремальний характер – максимальне значення g_{kmax} знаходиться при $\alpha = 0,95...1,05$ та $P = 10^5...10^7$ Па; повний склад конденсованих продуктів згоряння містить TiO_2 , Ti та TiN та повністю визначається співвідношенням компонентів у суміші незалежно від зміни зовнішнього тиску $P = 10^5...10^7$ Па.

Встановлено наступні закономірності впливу температури нагріву $T_0 = 293...800$ К на швидкість розвитку процесу горіння сумішей для розглядуваних робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача

$$\alpha = 0,3...1,4; \text{ коефіцієнта ущільнення суміші } K_V =$$

0,9...0,95; середнього розміру частинок металевго пального $d_m = 45...280$ мкм та нітратовмісного окиснювача ($d_N < 140$ мкм) та зовнішнього тиску ($P = 10^5...10^7$ Па) (рис. 8): збільшення T_0 від $T_0 = 293$ К до $T_0 = 800$ К призводить до зростання швидкості горіння у 1,5...3,6 рази; при цьому із зростанням T_0 залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,3...2,1 рази; збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача від $\alpha = 0,35$ до $\alpha = 1,4$ призводить до зменшення швидкості горіння у 1,6...3,9 рази та послаблення залежності $u(T_0)$ у 2,0...2,3 рази; зменшення дисперсності порошку металевго пального від $d_m = 280$ мкм до $d_m = 45$ мкм призводить до зростання швидкості горіння у 1,3...2,8 рази та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,1...1,9 рази; збільшення дисперсності порошку окиснювача від $d_N = 50$ мкм до $d_N = 140$ мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 1,2...3,6 рази та послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,8...2,1 рази тільки для діапазонів зміни $\alpha = 0,35...0,40$, а при $\alpha > 0,35...0,40$ – величина швидкості горіння та характер залежності $u(T_0)$ практично не змінюється; зміна зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па для усіх досліджуваних діапазонів зміни α , d_m та d_N призводить до збільшення швидкості горіння у 1,8...3,0 рази та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...2,1 рази.

Вперше встановлено наступні закономірності впливу зовнішнього тиску $P = 10^5...10^7$ Па на швидкість розвитку процесу горіння сумішей (рис. 9): збільшення P від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па призводить до зростання швидкості горіння у 1,3...3,5 рази, при цьому із зростанням P , залежність $u(P)$ підсилюється у 1,2...1,5 рази; при збільшенні коефіцієнта надлишку окиснювача від $\alpha = 0,3$ до $\alpha = 1,4$ величина швидкості горіння зменшується у 1,3...5,3 рази; збільшення дисперсності порошку металевго пального від $d_m = 45$ мкм до $d_m = 280$ мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 1,1...2,1 рази та послаблення залежності $u(P)$ у 1,09...1,7 рази; зменшення величини d_N від $d_N = 140$ мкм до $d_N = 45$ мкм призводить до зростання швидкості горіння у 2,7...3,4 рази та підсилення залежності $u(P)$ у 1,9...2,1 рази тільки для значень $\alpha = 0,35...0,40$, а при $\alpha > 0,40...0,45$ величина швидкості горіння та характер залежності $u(P)$ стають практично незалежними від величини d_N ; зміна температури нагріву від $T_0 = 293$ К до $T_0 = 800$ К призводить до зростання швидкості горіння у 1,5...2,7 рази та підсилення залежності $u(P)$ у 1,1...1,8 рази.

Для отримання бази даних по критичним значенням швидкостей горіння сумішей для широкого діапазону зміни температур нагріву та зовнішніх тисків, які характеризують виникнення вибухонебезпечних режимів їх горіння розроблено нові експериментально-статистичні моделі (відносна похибка складає 3...5 %):

$$u(T_0, P) = C_0 + C_1 P + C_2 T_0 + C_3 P^2 + C_4 T_0^2 + C_5 P^3 + C_6 P T_0 + C_7 P T_0^2 + C_8 P^2 T_0 + C_9 P^2 T_0^2 + C_{10} P^3 T_0 + C_{11} P^3 T_0^2 \quad (14)$$

де C_i ($i = \overline{0,11}$) – емпіричні коефіцієнти, що отримані для трьох найбільш характерних значень α для сумішей, що розглядаються: $\alpha_{ВПГ}$ характеризує нестійкий, вибухонебезпечний режим горіння сумішей; $\alpha = 1,0$ – стійке стабільне їх горіння; $\alpha_{НПГ}$ характеризує нестійке, затухаюче горіння сумішей (для $(d_m)_{min} = 45$ мкм). Розрахунки за формулою (14) дозволяють комплексно оцінювати критичні діапазони зміни технологічних параметрів ($\alpha^{(1)} \leq \alpha \leq \alpha^{(2)}$), де α^i ($i = 1, 2$) – граничні значення критичних діапазонів зміни параметрів α та d_m відповідно), які не призводять до різкого збільшення швидкості горіння сумішей із зростанням температури нагріву та зовнішнього тиску, що спостерігається при вимушеному спрацьовуванні виробів в умовах зовнішніх теплових впливів.

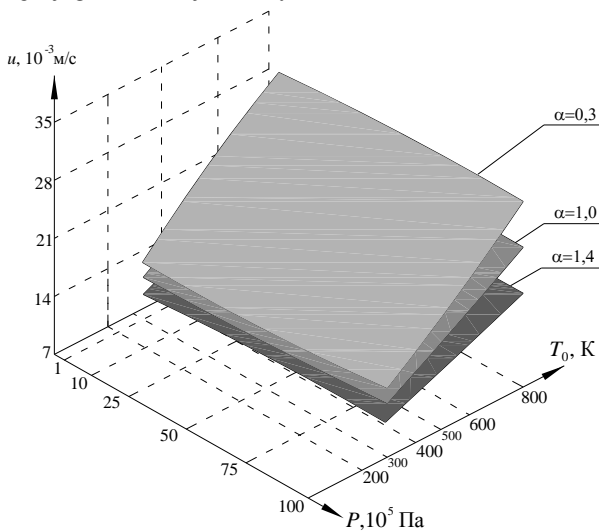


Рис. 8. Залежності швидкості горіння суміші титан + нітрат натрію від температури нагріву та зовнішнього тиску для різних значень коефіцієнту надлишку окиснювача ($d_m = 45$ мкм)

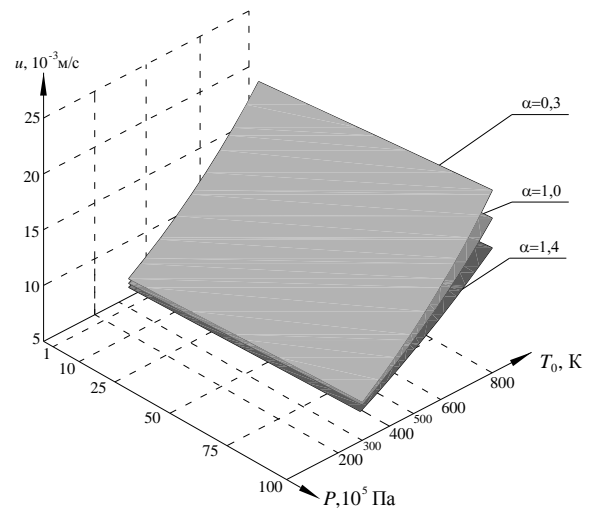


Рис. 9. Залежності швидкості горіння суміші титан + нітрат барію від температури нагріву та зовнішнього тиску для різних значень коефіцієнту надлишку окиснювача ($d_m = 45$ мкм)

У п'ятому розділі на базі розроблених математичних та експериментально-статистичних моделей вперше розроблено алгоритм визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термодій та керованих технологічних параметрів зарядів нітратно-титанових сумішей на стадії їх виготовлення, перевищення яких призводить до передчасного спрацьовування в умовах зовнішніх термічних дій та пожежонебезпечного руйнування виробів.

Вказаний метод знайшов практичне використання та впровадження в установах та на підприємствах України (Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям України (м. Київ), Державний центр сертифікації ДСНС України (м. Київ), УкрНДІЦЗ (м. Київ), ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон» (м. Київ), ГУ ДСНС України у Дніпропетровській області; ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (м. Кривий Ріг), ТОВ «Вогнебізахист» (м. Київ) у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій, що дозволило на стадії виготовлення загальнопромислових піротехнічних виробів (освітлювані та

сигнальні патрони та снаряди, трасувальні та спалахувальні засоби тощо) шляхом оптимізації технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення компонентів, дисперсності металевого пального та природи нітратовмісного окиснювача) збільшити температуру їх займання у 1,5...2,8 рази та знизити вірогідність виникнення пожежонебезпечних руйнувань виробів при зберіганні та транспортуванні з урахуванням зовнішніх термічних впливів у 2...3 рази.

Розроблені пропозиції щодо підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових виробів в умовах зовнішніх термічних дій, які плануються до впровадження під час перегляду ДСТУ 4316-2004 “Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи впровадження” у рамках реалізації планів інституту зі стандартизації за своєю компетентністю (акт впровадження УкрНДІЦЗ). Крім цього, результати дисертації використовуються в навчальному процесі при здійсненні підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» освітнього ступеня «бакалавр», «магістр» та при підготовки ад’юнктів під час вивчення дисциплін «Пожежна профілактика технологічних процесів», «Пожежна безпека об’єктів підвищеної небезпеки», «Теорія розвитку та припинення горіння», «Пожежна безпека промислових об’єктів та управління ризиками», «Техногенна безпека об’єктів» у Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено узагальнення та практичне рішення актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає у розвитку наукових основ підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових сумішей шляхом встановлення основних закономірностей процесів їх нагріву, загоряння та розвитку горіння як основи для попередження виникнення пожеж у випадку зовнішніх термодій.

Основні наукові та практичні результати роботи зводяться до наступного.

1. Проведено аналіз процесів термічної дії на заряди сумішей загальнопромислових піротехнічних виробів в умовах їх зберігання, транспортування та застосування, що дозволило встановити причини передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів та сформулювати шляхи їх подолання.
2. Розроблено математичні моделі зовнішніх термічних дій на заряди піротехнічних нітратно-титанових сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоскі пластини, циліндричні та сферичні елементи), які відрізняються від відомих тим, що вони враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу (об’ємної теплоємності $C_V(T)$, коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$), які дозволяють більш точно визначати (відносну похибку знижено з 12...15 % до 8...10 %) розподіли температури, термопружних напружень по товщині зарядів піротехнічних сумішей та критичні значення зовнішніх теплових потоків та тривалостей їх впливу,

попереджаючи можливі їх руйнування (утворення тріщин, відшарувань тощо), які призводять до вибухонебезпечного розвитку процесу займання сумішей при спрацьовуванні піротехнічних виробів.

3. Експериментально встановлено нові закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на міцність зразків пресованих сумішей: при збільшенні вмісту порошку металу у суміші міцність її зразків монотонно зростає прямуючи до граничного значення; ступінь збільшення міцності зразків сумішей зі зміною дисперсності порошку титана або окиснювача не залежить від природи окиснювача та складає 1,3...1,6 рази при зменшенні d_m або d_N від 250 мкм до 45 мкм; з підвищенням температури нагріву суміші до 800 К незалежно від співвідношення компонентів та їх дисперсності міцність зразків зменшується, при цьому зі збільшенням вмісту металевого пального ступінь впливу температури нагріву послаблюється у 1,9...2,3 рази.

4. Вперше в результаті проведених термодинамічних розрахунків встановлено: температура продуктів згорання T_2 піротехнічних нітратно-титанових сумішей має максимальні значення $T_{2max} = 3290...4495$ К при коефіцієнтах надлишку окиснювача $\alpha_{T_{2max}} = 0,98...1,04$; збільшення зовнішнього тиску в діапазоні $P = 10^5...10^7$ Па незалежно від співвідношення компонентів призводить до зростання температур продуктів згорання, зокрема T_{2max} зростає у 1,3...1,4 рази; вміст високотемпературного конденсату у продуктах згорання сумішей суттєво залежить від α та P , зокрема, для стехіометричних сумішей збільшення тиску від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до зростання відносного вмісту конденсату у 1,8...2,9 рази, що дозволяє визначати пожежонебезпечні ситуації при позаштатному спрацьовуванні піротехнічних виробів, споряджених зарядами сумішей (наприклад, при спалахуванні складських приміщень, де зберігаються вироби, або при їх запуску на стартових майданчиках).

5. Вперше встановлено механізм та розроблено математичну модель горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей титан + нітратовмісний окиснювач, що базуються на проведених експериментальних дослідженнях процесів термічного розкладання нітратовмісного окиснювача, а також високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок титану у його продуктах розкладання в умовах зовнішніх термодій.

Зіставлення результатів розрахунків по математичній моделі залежностей швидкостей горіння сумішей від температури нагріву та зовнішнього тиску для використовуваних в піротехнічному виробництві діапазонів зміни технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів) з експериментальними даними показало, що розроблена математична модель може бути використана як інженерний метод (відносна похибка не перевищує 5...9 %) для прогнозування швидкостей горіння сумішей в умовах зовнішніх термодій, а також критичних діапазонів їх зміни, перевищення яких призводить до нестабільного, вибухонебезпечного розвитку процесу горіння сумішей.

6. Отримані нові експериментальні дані і розроблені експериментально-статистичні моделі для визначення залежностей температури займання частинок металевих палих T_3 та часу їх згорання τ_2 у газоподібних продуктах термічного

розкладання окиснювача від їх середнього розміру d_m , відносного вмісту кисню у продуктах розкладання C_{O_2} , швидкості газового потоку V та зовнішнього тиску P . Встановлено, що: T_3 у 1,2...1,7 рази, а збільшення P від 10^5 Па до 10^7 Па – до збільшення T_3 у 1,4...1,6 рази; збільшення d_m від 45 мкм до 280 мкм призводить до зростання τ_2 у 4...6 рази, а збільшення C_{O_2} , V , P – до зменшення τ_2 у 1,8...3,2 рази (для C_{O_2}), у 1,6...3,8 рази (для V) та у 1,6...3,3 рази (для P). Розроблені моделі дозволяють з відносною похибкою 5...7% формувати базу даних по критичним значенням технологічних параметрів зарядів сумішей в умовах підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків, перевищення яких призводить до займання частинок металевого пального і передчасного вибухонебезпечного спрацьовування сумішей.

7. Отримані нові експериментальні дані і розроблені експериментально-статистичні моделі для визначення залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів і зовнішніх чинників (підвищених температур нагріву T_0 і тисків P). Встановлено, що зростання T_0 (до 800 К) і P (до 10^7 Па) призводить до збільшення швидкості горіння сумішей у 1,3 ... 3,6 рази, при цьому збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача від $\alpha = 0,35$ до $\alpha = 1,4$, середнього розміру частинок металевого пального від $d_m = 45$ мкм до $d_m = 280$ мкм та окиснювача від $d_N = 50$ мкм до $d_N = 140$ мкм (тільки для $\alpha = 0,35...0,40$) – зменшують її значення у 1,3...3,9 рази. Розроблені моделі дозволяють з відносною похибкою 2...4% визначати критичні діапазони зміни технологічних параметрів, перевищення яких призводить до різкого зростання швидкості горіння сумішей і пожежонебезпечного руйнування виробів.

8. Розроблено алгоритм визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термодій на заряди нітратно-титанових сумішей та керованих технологічних параметрів, перевищення яких призводить до пожежонебезпечних руйнувань виробів. Ці результати знайшли практичне використання на підприємствах України у вигляді розроблених засобів контролю та технологічних рекомендацій, що дозволило збільшити температуру їх займання у 1,5...2,8 рази та знизити вірогідність виникнення пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні з врахуванням зовнішніх термічних впливів у 2...3 рази. Розроблено зміни та доповнення до ДСТУ 4316-2004.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Yatsenko I. V. Perspective development tendencies of electron beam technology in precision instruments industry / I.V. Yatsenko, O.V. Kyrychenko, V.A. Vashchenko, O.S. Dibrova, V.P. Melnyk. // Int. Sci. J. "INDUSTRY 4.0" (Technical University of Sofia, , Bulgaria, ISSN 2534-8582), Issue 2/2019. – P. 78 – 81.
2. Yatsenko I. Regularities of influence of electron-beam technology on technical and operational characteristics of optoelectronic devices / I. Yatsenko, O. Kyrychenko, V. Vashchenko, A. Sytnik, O. Dibrova // Int. Sci. J. "MACHINES.

TECHNOLOGIES. MATERIALS” (Scientific and technical union of mechanical engineering, Sofia, Bulgaria, ISSN 1313-0226), Vol. 13 (2019), Выпуск 12, 546 – 549.

3. Діброва О.С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О.С. Діброва, О.В. Кириченко, Р.Б. Мотрічук, В.А. Ващенко // International Scientific Journal “Internauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
4. Діброва О.С. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О.С. Діброва, О.В. Кириченко, Р.Б. Мотрічук, В.А. Ващенко // International Scientific Journal “Internauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
5. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES (ISSN 2664-9969), 2020. – № 1/1(51). – P.44 – 49.
6. Кириченко О.В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, Є.О. Тищенко, В.В. Цибулін // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту, 2018. – № 2. – С. 5 – 11.
7. Кириченко О.В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, О.С. Барановський, В.В. Цибулін // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. 2018. – Вип. 19. – С. 323 – 332.
8. Кириченко О.В. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, В.А. Ващенко, С.О. Колінько // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 2019. – № 2 (8), – С. 81–85.
9. Кириченко О.В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, В.А. Ващенко, С.О. Колінько, В.В. Цибулін // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту, 2019. – № 3. – С. 56 – 67.
10. Кириченко О.В. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального у продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах / О.В. Кириченко, Р.Б. Мотрічук, О.С. Діброва, В.П. Мельник, В.А. Ващенко, Т.І. Бутенко // Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности, 2020. – № 47.– С. 50 – 59.
11. Кириченко О.В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, В.А. Ващенко, С.О.

- Колінко, Бутенко, В.В. Цибулін // Вісн. Черкас, держ. технол. ун-ту, 2020. – №2. – С. 123 – 133.
12. Діброва О.С. Особливості проведення розрахунків температури і складу продуктів згоряння піротехнічних сумішей / О.С. Діброва, О.С. Барановський, О.В. Кириченко // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, 21 жовтня 2017, Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля. – С. 59 – 60.
 13. Діброва О.С. Вплив технологічних параметрів на швидкість горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей / О.С. Діброва, О.В. Кириченко // Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю “Надзвичайні ситуації: безпека та захист”, 2018, Черкаси. – С. 32 – 34.
 14. Yatsenko I. V. Perspective development tendencies of electron beam technology in precision instruments industry / I.V. Yatsenko, O.V. Kyrychenko, V.A. Vashchenko, O.S. Dibrova, V.P. Melnyk // IV International Scientific Conference HIGH TECHNOLOGIES. BUSINESS. SOCIETY, 11 – 14.03.2019, Borovets, Bulgaria. – P. 70 – 73.
 15. Діброва О.С. Пожежна небезпека піротехнічних виробів при відповідному впливі міцності зарядів піротехнічних сумішей / О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, О.В. Кириченко // Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю “Надзвичайні ситуації: безпека та захист”, 24 – 25.10.2019, Черкаси. – С. 48 – 49.
 16. Dibrova O.S. Fire hazard pyrotechnic products / O.S. Dibrova, O.V. Kyrychenko // Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю “Надзвичайні ситуації: безпека та захист”, 24 – 25.10.2019, Черкаси. – С. 225 – 226.
 17. Діброва О.С. Методика досліджень процесів розвитку горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей / О.С. Діброва, О.В. Кириченко // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій”, 11 – 12.04.2019, Черкаси. – С. 176 – 177.
 18. Диброва А.С. Исследование процессов воспламенения пиротехнических нитратосодержащих смесей из порошков металлических горючих / А.С. Диброва, Р.Б. Мотричук, О.В. Кириченко // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы. Сб. материалов XIV международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей и адъюнктов (аспирантов, соискателей), ученых. 8 – 9 апреля 2020, Минск. – С. 50 – 52.
 19. Яценко И.В. Определение оптимальных режимов электронно-лучевой обработки поверхностей оптических элементов / И.В. Яценко, В.А. Ващенко, О.В. Кириченко, А.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук // Материалы 20-го Международного научно-технического семинара “Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте”, 23 – 28.03.2020, Тбилиси. – С. 213 – 216.

20. Кириченко О.В. Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей /О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій”, 09 – 10.04.2020, Черкаси. – С. 260 – 262.

Анотація

Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових сумішей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.02 – Пожежна безпека (261 – Пожежна безпека). – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, ДСНС України, Харків, 2020.

Дисертацію присвячено розв’язанню актуальної науково-прикладної задачі, що полягає у розробленні наукових положень, які встановлюють основні закономірності процесів нагріву, займання та розвитку горіння зарядів сумішей як основи для попередження пожеж у разі зовнішніх термічних дій. Розроблено математичні моделі та методи розрахунку критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії на заряди сумішей, перевищення яких призводить до поверхневого руйнування останніх. Розроблено експериментально-статистичні моделі для розрахунку впливу на температуру спалахування та час згоряння частинок металу у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача їх дисперсності та параметрів навколишнього середовища (концентрації кисню, температури нагріву, зовнішнього тиску). Проведено термодинамічні розрахунки впливу коефіцієнта надлишку окиснювача та зовнішнього тиску на температуру продуктів згоряння та вміст у них високотемпературного конденсату. Розроблено нову модель горіння двокомпонентних сумішей титан + нітратовмісний окиснювач, що дозволяє визначати залежності швидкості горіння сумішей від технологічних чинників та зовнішніх параметрів (температур нагріву, зовнішніх тисків), а також стабільні режими розвитку горіння сумішей. Встановлено нові закономірності впливу технологічних чинників та зовнішніх умов на швидкість горіння сумішей. Розроблено алгоритм, який дозволяє в режимах діалогу та реального часу формувати базу даних по критичним значенням параметрів зовнішніх термодій на заряди сумішей, перевищення яких призводить до вибухонебезпечного їх спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування виробів. Алгоритм знайшов практичне використання на вітчизняних підприємствах при розробці засобів контролю та технологічних рекомендацій щодо зниження небезпеки впливу пожеж на серійні вироби на основі нітратно-титанових сумішей при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні. Розроблено зміни та доповнення у Державний стандарт України ДСТУ 4316-2004 «Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки та методи впровадження».

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні нітратно-металеві суміші, термоміцнісні процеси, термічне розкладання, спалахування та згоряння частинок компонентів.

Анотація

Диброва А. С. **Повышение пожарной безопасности пиротехнических нитратно-титановых смесей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 21.06.02 – Пожарная безопасность (261 – Пожарная безопасность). – Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ГСЧС Украины, Харьков, 2020.

Приведены теоретическое обобщение и практическое решение актуальной научно-прикладной задачи, которая состоит в развитии научных основ повышения пожарной безопасности пиротехнических нитратно-титановых смесей путем установления основных закономерностей процессов их нагрева, загорания и развития горения как основы для предупреждения возникновения пожаров в случае внешних термовоздействий. Разработаны математические модели внешних термических воздействий на заряды пиротехнических нитратно-титановых смесей различной геометрической формы и размеров, которые позволяют определять критические значения внешних тепловых потоков и длительностей их воздействий, предупреждая возможные разрушения зарядов, которые приводят к взрывоопасному развитию процесса воспламенения смесей. Проведены термодинамические расчеты температуры продуктов сгорания и содержания в них высокотемпературного конденсата для различных соотношений компонентов и внешних давлений. Впервые установлен механизм развития горения смесей в условиях внешних термовоздействий и разработана математическая модель горения двухкомпонентных смесей титан + натратосодержащий окислитель для расчета зависимостей скоростей горения смесей от температуры нагрева и внешнего давления для различных значений технологических параметров, а также критических диапазонов их изменения, превышение которых приводит к нестабильному, взрывоопасному развитию процесса горения смесей. Установлены новые закономерности влияния технологических параметров и внешних факторов на термopрочность зарядов смесей. Получены новые экспериментальные данные по влиянию на температуру воспламенения и время сгорания частиц металлического горючего в продуктах разложения окислителя от его дисперсности, относительного содержания кислорода, скорости газового потока и внешнего давления. Экспериментально установлены новые закономерности влияния соотношении компонентов, их дисперсности, температуры нагрева и внешнего давления на скорость и предельные режимы горения смесей. Разработаны новые экспериментально-статистические модели, которые позволяют в режиме диалога и реального времени проводить расчеты температуры воспламенения и времени сгорания частиц металлического горючего, скорости горения смесей, которые

характеризуют способность к ускорению процесса их горения в условиях внешних термических воздействий. Разработан алгоритм на базе полученных математических и экспериментально-статистических моделях и специализированном программном обеспечении в виде стандартных пакетов прикладных программ, который позволяет на компьютере формировать необходимую для практического использования базу данных по критическим диапазонам изменения параметров внешних термовоздействий на заряды смесей, превышение которых приводит к пожароопасным разрушениям изделий. Этот алгоритм нашел практическое применение на предприятиях Украины в виде разработанных средств контроля и технологических рекомендаций, который позволяет снизить вероятность возникновения пожароопасных разрушений изделий при хранении и транспортировании с учетом внешних термических воздействий в 2...3 раза. Разработаны изменения и дополнения в Государственный стандарт Украины (ДСТУ 4316-2004 «Изделия пиротехнические бытового назначения. Требования пожарной безопасности и методы внедрения»).

Ключевые слова: пожарная безопасность, пиротехнические нитратно-металлические смеси, термопрочностные процессы, термическое разложение, воспламенение и сгорание частиц компонентов.

Abstract

Dibrova O. S. **Improving Fire Safety of Pyrotechnic Nitrate and Titanium Mixtures. - Manuscript.**

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 21.06.02 - Fire Safety (261 - Fire Safety). - Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine, SES of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving an actual scientific and applied problem, which consists in the development of scientific provisions that establish the basic laws of heating, ignition and combustion of mixtures as a basis for fire prevention in case of external thermal actions. Mathematical models and methods for calculating the critical values of external heat fluxes and the times of their action on the charges of mixtures, the excess of which leads to the surface destruction of these mixtures were created. Experimental and statistical models were developed to calculate the effect on the flash point and combustion time of metal particles in gaseous products of thermal decomposition of the oxidant, their dispersion and environmental parameters (oxygen concentration, heating temperature, external pressure). Thermodynamic calculations of the influence of the oxidant excess coefficient and external pressure on the temperature of combustion products and the content of high-temperature condensate in them are carried out. A new model of combustion of two-component mixtures titanium + nitrate-containing oxidizer was developed, which allows to determine the dependences

of combustion rate of mixtures on technological factors and external parameters (heating temperatures, external pressures), as well as stable combustion modes. New regularities of influence of technological factors and external conditions on the rate of combustion of mixtures are established. An algorithm that allows in dialog and real-time modes to form a database of critical values of parameters of external thermal actions on the charges of mixtures, the excess of which leads to their explosive operation and fire-hazardous destruction of products was developed. The algorithm has found practical use in a number of domestic enterprises in the development of controls and technological recommendations to reduce the risk of fires on serial products based on nitrate and titanium mixtures during storage, transportation and use. Changes and additions to the State Standard of Ukraine DSTU 4316-2004 «Household pyrotechnic articles. Fire safety requirements and implementation methods» were developed.

Key words: fire safety, pyrotechnic nitrate and metal mixtures, thermosetting processes, thermal decomposition, ignition and combustion of component particles.

Підписано до друку 17.10.2020 р. Формат 60x84/16.

Папір 80г/м². Друк цифровий. Ум. друк. арк. 0,9.

Наклад 100 прим. Зам. № 23/09.

Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту
України 61023 м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

