

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВБАСА ВІКТОРІЯ ОЛЕГІВНА

УДК 614.841

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЗАПОБІГАННЯ ПЕРЕДЧАСНОГО ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОГО
ЗАЙМАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ
НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ**

261 – пожежна безпека
26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на джерело



В. О. Ковбаса

Науковий керівник:

Кириченко Оксана В'ячеславівна, доктор технічних наук, професор

Черкаси - 2025

АНОТАЦІЯ

Ковбаса В. О. Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 - Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання в галузі пожежної безпеки, яке полягає у розвитку наукового підґрунтя щодо запобігання передчасних пожежонебезпечних займань піротехнічних виробів із зарядами сумішей на основі порошків металевих палих та фторопластів. Це досягається шляхом встановлення критичних режимів процесів їхнього нагрівання, займання та розвитку горіння, що слугує основою для запобігання виникненню пожежі у випадку зовнішніх термічних дій.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Також показано особистий внесок здобувача та представлено інформацію про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** проведено систематизацію та аналіз випадків пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів, які відбулися у світі протягом останніх десятиліть під час їхнього зберігання, транспортування та застосування. Продемонстровано, що в умовах пожеж внаслідок вимушених зовнішніх термічних дій на вироби відбувається передчасне спалахування та вибухонебезпечний розвиток горіння зарядів сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків. Це спричиняє пожежонебезпечні руйнування навколишніх об'єктів, значні матеріальні збитки та загибель людей. Відповідно, ключовим питанням у

підвищенні пожежної безпеки піротехнічних виробів при їхньому зберіганні, транспортуванні та застосуванні в умовах зовнішніх термічних дій є запобігання передчасних пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів. Для досягнення цієї мети необхідно розробити науково обґрунтований метод визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на вироби, перевищення яких індукує передчасне займання та вибухонебезпечний розвиток горіння зарядів сумішей в умовах зростання температури нагріву та тиску навколишнього середовища. Створення такого методу потребує наявності результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесів зовнішнього нагріву, займання та розвитку горіння ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів, що становлять основу багатьох піротехнічних виробів.

У **другому розділі** представлена загальна методика проведення досліджень щодо підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі двокомпонентних сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів із добавками органічних речовин. Методика сфокусована на визначенні критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій та технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких призводить до їхнього передчасного займання, розвитку вибухового горіння та пожежонебезпечного руйнування виробів. Такий комплексний підхід до вирішення задачі передбачає дослідження наступних процесів: нагріву зразків сумішей зовнішніми тепловими потоками із осередків пожеж при зберіганні або транспортуванні; термічного розкладання окиснювачів – фторопластів; займання та горіння частинок металів у газоподібних продуктах розкладання окиснювачів; а також займання та розвитку горіння зарядів сумішей при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках. В якості зразків використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з порошків металевих пальних та фторопластів із добавками органічних речовин, які були виготовлені різними методами ущільнюючого формування.

У **третьому розділі** представлено результати досліджень температури на поверхнях зарядів сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоско-паралельні пластини, прямокутні елементи різної товщини). Крім того, розроблено нелінійні нестационарні математичні моделі нагріву виробів зовнішніми тепловими потоками, які, на відміну від існуючих моделей, враховують температурні залежності теплофізичних властивостей заряду суміші та враховують вплив основних параметрів термовпливів: величини теплових потоків від зовнішніх джерел тепла та часів їхньої дії. З метою дослідження процесу нагріву виробів в умовах їхнього зберігання або транспортування розроблено математичні моделі нагріву поверхонь зарядів з різних матеріалів. На основі проведених експериментальних досліджень фізико-хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металів та фторопластів, розроблено модель їхнього горіння в умовах зовнішніх термічних дій. Ця модель, на відміну від існуючих моделей горіння піротехнічних сумішей, враховує нові дані про високотемпературне окиснення, займання та горіння частинок металів у продуктах термічного розкладання окиснювачів. За результатами розрахунків були встановлені критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках для різних діапазонів зміни технологічних параметрів, перевищення яких спричиняє вибухонебезпечний розвиток горіння сумішей та пожежонебезпечне руйнування виробів.

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення нових закономірностей впливу на температуру займання T_z та час горіння τ_z частинок порошків металів у продуктах розкладання досліджуваних сумішей. Для сумішей $Mg + \Phi - 3$ та $Al + \Phi - 3$ отримано нові дані по впливу температури нагріву T_0 та зовнішнього тиску P на швидкість їх горіння. Представлено також дані про вплив на залежності $u(T_0)$ та $u(P)$ таких технологічних параметрів як природа та величина добавок органічних речовин, коефіцієнт ущільнення

суміші, діаметр і заряду, матеріал оболонки тощо. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі, призначені для формування бази розрахункових даних (з відносною похибкою 4...7 %), які кількісно описують вплив ключових технологічних параметрів (α , ε , d_m , $d_{ок}$, K_y) на швидкість розвитку процесу горіння сумішей за умов зовнішніх термічних впливів. Ці моделі забезпечують можливість підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів на стадії виготовлення шляхом цілеспрямованого регулювання технологічних параметрів в умовах їхнього зберігання, транспортування та застосування. Вперше встановлено, що регулювання технологічних параметрів сумішей на етапі їхнього виготовлення дозволяє запобігати нестійким, вибухонебезпечним режимам розвитку горіння в умовах зовнішніх термічних впливів, які призводять до передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів. Це досягається шляхом керованої зміни швидкості горіння сумішей (або часу дії виробів в умовах їхнього бойового застосування) без необхідності зміни тактико-технічних показників піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластовмісних сумішей.

У **п'ятому розділі** на базі отриманих математичних та експериментально-статистичних моделей вперше розроблено науково обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термічних впливів та керованих технологічних параметрів зарядів сумішей на стадії їхнього виготовлення. Перевищення цих діапазонів призводить до передчасного вибухонебезпечного спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування виробів. Зазначений метод знайшов практичне використання та був впроваджений у діяльність ДСНС України, а також та підприємствах та в організаціях України у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій. Це дозволило на стадії виготовлення піротехнічних виробів шляхом керування технологічними параметрами зарядів сумішей (співвідношення компонентів, дисперсності металевого пального, фторопластів та добавок

органічних речовин) збільшити температуру та часу затримки їх займання у 1,2...1,7 рази та знизити ймовірність виникнення пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів при зберіганні та транспортуванні з врахуванням зовнішніх термічних впливів у 1,5...2,0 рази. Отримані результати також впроваджено в освітній процес Національного університету цивільного захисту України при здійсненні підготовки фахівців для ДСНС України за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» освітнього рівня «доктор філософії», «магістр» та за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» освітнього рівня «бакалавр».

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

1. *Вперше:*

- встановлено закономірності впливу технологічних параметрів сумішей (середнього розміру d_m частинок порошків металевих пальних, коефіцієнта надлишку окиснювача α) та зовнішнього тиску P на ключові характеристики процесів займання (температури займання T_z та часу горіння τ_z частинок металевих пального у продуктах розкладу сумішей): зменшення d_m від 310 мкм до 54 мкм, α від 1,5 до 0,5 та збільшення P від 10^5 Па до 10^7 Па підвищує T_z у 1,3...1,8 рази; зменшення d_m від 310 мкм до 54 мкм, збільшення α від 0,5 до 1,5 та P від 10^5 Па до 10^7 Па зменшує τ_z у 1,3...2,9 рази;
- встановлено залежності швидкості розвитку процесу горіння сумішей від підвищених температур нагріву T_0 та зовнішніх тисків P для практично використовуваних діапазонів зміни технологічних параметрів їх зарядів (співвідношення компонентів у суміші, дисперсність, коефіцієнт ущільнення, діаметр заряду суміші, матеріал оболонки): підвищення T_0 від 293 К до 873 К та P від 10^5 Па до 10^7 Па може збільшувати швидкість горіння у 4...6 разів; при деяких діапазонах параметрів спостерігається також значне зменшення швидкості горіння сумішей (понад у 3...4 рази) та стабілізація процесу, що дозволяє керувати параметрами для запобігання нестійкому та вибухонебезпечному розвитку горіння;

– на отриманій базі теоретично-експериментальних досліджень розроблено науково обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх теплових впливів (теплових потоків, часів їхньої дії) та технологічних параметрів зарядів сумішей, що дозволяє запобігати передчасному пожежонебезпечному спрацьовуванню виробів на їх основі в умовах зовнішніх термічних дій.

2. *Удосконалено:*

– математичні моделі впливу зовнішніх термічних дій на заряди сумішей, які враховують їхню геометричну форму та розміри (плоско-паралельні пластини, прямокутні елементи різної товщини), а також температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності). Це забезпечує точніше визначення критичних параметрів термічних впливів і дозволяє запобігати розвитку пожежонебезпечного стану виробів.

3. *Набули подальшого розвитку:*

– математична модель процесу горіння двокомпонентних ущільнених сумішей із порошків металевих палив та фторопластів, яка враховує кінетичні характеристики термічного розкладу окиснювачів; закономірності передполум'яного окиснення та горіння частинок металу у продуктах розкладу; термодинамічні розрахунки температури продуктів згоряння та вмісту високотемпературного конденсату. Це дозволяє визначати критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів і зовнішніх термічних впливів, керування якими запобігає вибухонебезпечному розвитку горіння та пожежонебезпечному руйнуванню виробів.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші та вироби, вибух, пожежа, горіння, вогонь, тепловий потік, термодинамічні розрахунки, математична модель, методика, поширення пожежі.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Koziar N., Kyrychenko O., **Kovbasa V.**, Diadiushenko O. Regulations of the Influence of External Thermal Influences on Speed and Explosive Safe Combustion Modes of Pyrotechnic NitrateMetallized Mixtures with Metal Fluoride. *Key Engineering Materials. Fire Safety and Applied Materials*. 2023. Vol. 952. P.155-165. (DOI:10.4028/p-o3twMa).

Особистий внесок - встановлено механізм горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, згідно з яким процес горіння протікає у трьох просторово розділених зонах: у к-фазі, на поверхні горіння та у зоні полум'я.

2. Kyrychenko O., **Kovbasa V.**, Kutsenko M., Shkoliar I. Experimental-Statistical Models for Obtaining a Database on the Ignition Temperatures of Metal Fuel Particles in Gaseous Products of Thermal Decomposition of Fluoroplasts-Based Pyrotechnic Mixtures. *Steel, Alloys, Corrosion Protection and Materials Technologies. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland*. 2025. ISSN: 1662-9752. Vol. 1164. P. 145-153. (DOI:10.4028/p-Fmct9Z)

Особистий внесок – проведено експериментальні дослідження по впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на температуру займання частинок металевих горючих в продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів.

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

3. **В. О. Ковбаса.** Вплив технологічних параметрів та зовнішніх умов на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. *Вісник Черкаського державного технологічного*

університету. 2023. № 2. С. 119–134. (DOI:10.24025/2306-4412.2.2023.278992).

4. **Ковбаса В.О.**, Кириченко О. В., Куценко М.А., Ващенко В. А., Березовський А.І., Школяр Є. В., Мотрічук Р.Б. Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей металевих пальних з фторопластами в умовах зовнішніх термічних впливів. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*. Дрогобич: ДВНЗ «ДНТУ». 2025. № 1(56). С. 31-47. (DOI: 10.31474/1999-981X-2025-1-31-46).

Особистий внесок - встановлено механізм горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів, а також розроблено математичну модель їх горіння в умовах зовнішніх термодій, що дозволяє визначати закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на стійкі вибухобезпечні режими розвитку горіння сумішей.

5. Козяр Н., Кириченко О., **Ковбаса В.**, Ващенко В., Куценко М., Школяр Є., Ножко І. Визначення процесів займання частинок металевих пальних у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8 № 2. С. 44–56. (DOI:10.31731/2524.2636.2024.8.2.44.56)

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження температури займання та часу індукції частинок металевих пальних у продуктах розкладання сумішей.

6. Н. М. Козяр, О. В. Кириченко, **В. О. Ковбаса**, Є. П. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, В. В. Цибулін. Закономірності впливу чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на

основі кисневмісних окиснювачів та металевих паливних. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 1. С. 72–81. (DOI: 10.24025/2306-4412.1.2023.271133).

Особистий внесок - проаналізовано наявні дані по впливу розглянутих чинників на швидкість розвитку процесу горіння інших металізованих піротехнічних сумішей для співставлення з отриманими даними.

7. **В. О. Ковбаса**, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, Є. В. Школяр, М. Г. Томенко, А. А. Хижняк, С. О. Колінько. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкостям розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі металевих паливних, фторопластів та добавок органічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Том 7 № 2. С. 119–132. (DOI: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.119.132).

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів та зовнішніх умов (температури нагріву, складу, тиску та ін.).

8. N. Kozyar, O. Kyrychenko, **V. Kovbasa**, V. Vaschenko, S. Kolinko, T. Butenko, V. Tsybulin. Combustion model for burning multicomponent pyrotechnic nitrate-metallized mixtures. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2023. № 3. С. 69–84. (DOI: 10.24025/2306-4412.3.2023.284319).

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння сумішей.

9. Н. М. Козяр, О.В. Кириченко, **В.О. Ковбаса**, О.О. Дядюшенко, В.А. Ващенко, С.О. Колінько. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2(16). С. 42–56. (DOI:10.33269/nvcz.2023.2.42-57).

Особистий внесок - визначено критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів (теплового потоку, часу його дії) для різних технологічних параметрів.

10. О. Kyrychenko, O. Zemlianskyi, R. Motrichuk, Y. Shkoliar, **V. Kovbaca**. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Том 7 № 1. С. 191–201. (DOI:10.31731/2524.2636.2023.7.1.191.200).

Особистий внесок - проведено термодинамічні розрахунки температури продуктів згорання суміші, вмісту в них високотемпературного конденсату для різних значень технологічних параметрів та зовнішніх умов, що дозволяє шляхом контролю за їх рівнем підвищувати пожежовибухобезпечні властивості сумішей при застосуванні виробів.

11. Н. Козяр, О. Кириченко, В. Ващенко, Є. Кириченко, **В. Ковбаса**, С. Колінько, М. Томенко. Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Том 6 № 2. С. 15–26. (DOI:10.31731/2524.2636.2022.6.2.15-26).

Особистий внесок - проаналізовано методи експериментально-статистичного моделювання з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм для проведення розрахунків.

12. Є. П. Кириченко, В. М. Гвоздь, О. В. Кириченко, **В. О. Ковбаса**, В. А. Ващенко, Т. І. Бутенко. Підвищення стійкості процесу горіння піротехнічних сумішей шляхом введення добавок органічних речовин. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. № 3. С. 73–83. (DOI:10.24025/2306-4412.2.2022.263233).

Особистий внесок - проведено аналіз добавок органічних речовин, що використовуються в технічному виробництві для проведення досліджень,

обрано добавки, що здійснюють найбільш значний вплив на швидкість і режими розвитку процесу горіння сумішей.

Статті в інших виданнях, що додатково відображають результати дисертації

13. **В. Ковбаса**, О. Кириченко, М. Куценко, В. Ващенко, А. Березовський, Є. Школяр, М. Томенко. Керована база даних по часам згоряння частинок металевих пальних в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. *Збірник наукових праць Національного університету Цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2025. Том 9 № 1. С. 76-85. (DOI:10.52363/2524-2636.2025.9.1.7).

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на час згоряння частинок металевих пальних в продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

14. **В. Ковбаса**, Є. Кириченко, Є. Школяр, А. Хижняк. Аналіз швидкостей горіння піротехнічних сумішей з урахуванням компонентів, таких як металеві пальні, фторопласти та органічні добавки, за допомогою розробки експериментальних статистичних моделей і створення бази даних. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2023. С. 120 – 122.

Особистий внесок - розроблено та експериментально-статистичні моделі для визначення діапазонів зміни критичних значень швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

15. **Ковбаса В. О.**, Кириченко О. В. Закономірності впливу широкого класу добавок речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей. *Проблеми*

пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022). Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків. 2022. С. 25 – 26.

Особистий внесок - експериментально визначено ступінь впливу широкого класу добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, ідитолу, уротропіну та ін.) на залежності швидкості горіння сумішей на основі фторопластів від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

16. Н. Козяр, **В. Ковбаса**, Є. Кириченко, О. Дядюшенко, Д. Георгієвський. Критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах транспортування. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси. 2023. С. 126 – 127.*

Особистий внесок - розроблено методи визначення критичних значень технологічних параметрів в умовах зовнішніх термовпливів на заряди ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів різної геометричної форми та розмірів.

17. **Ковбаса В. О.**, Кириченко О. В. Визначення закономірностей впливу теплового потоку на поверхні піротехнічних виробів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси. 2022. С. 33 – 35.*

Особистий внесок - розроблено математичні моделі теплового впливу на поверхню металевих оболонок піротехнічних виробів на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів в умовах їх зберігання або транспортування з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій.

ABSTRACT

Kovbasa V. O. Prevention of premature fire-hazardous ignition of pyrotechnic metalized mixtures based on fluoroplastics. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 - Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The thesis is dedicated to solving a relevant scientific problem, which is to develop a scientific basis for preventing premature fire-hazardous ignition of pyrotechnic products with charges of mixtures based on metal combustible powders and fluoroplastics. This is achieved by establishing critical modes of their heating, ignition and combustion processes, which serves as the basis for preventing fire in case of external thermal effects.

The **introduction** substantiates the relevance of the research topic, formulates the goal and objectives of the research, outlines the scientific novelty and practical significance of the results obtained. It also shows the personal contribution of the applicant and presents information on the approval of the results of the dissertation research..

The **first chapter** systematizes and analyzes cases of fire and explosion-hazardous destruction of pyrotechnic products that have occurred in the world over the past decades during their storage, transportation and use. It has been demonstrated that in conditions of fires due to forced external thermal effects on products, premature ignition and explosive development of combustion of mixture charges occur under conditions of increased heating temperatures and external pressures. This causes fire-hazardous destruction of surrounding objects, significant material damage and death of people. Accordingly, the key issue in improving fire safety of pyrotechnic products during their storage, transportation and use under conditions of external thermal effects is the prevention of premature fire and explosion-hazardous destruction of products. To achieve this goal, it is necessary to develop a scientifically based method for determining the critical

values of the parameters of external thermal effects on products, the excess of which induces premature ignition and explosive development of combustion of mixture charges under conditions of increasing heating temperature and ambient pressure. The creation of such a method requires the availability of the results of theoretical and experimental studies of the processes of external heating, ignition and combustion development of compacted mixtures of metal combustible powders and fluoroplastics, which form the basis of many pyrotechnic products.

The **second chapter** presents a general methodology for conducting research on improving the fire safety of pyrotechnic products based on two-component mixtures of metal combustible powders and fluoroplastics with additives of organic substances. The methodology is focused on determining the critical values of the parameters of external thermal effects and technological parameters of the charges of the mixtures, the excess of which leads to their premature ignition, the development of explosive combustion and fire-hazardous destruction of the products. Such a comprehensive approach to solving the problem involves studying the following processes: heating of mixture samples by external heat flows from fire sources during storage or transportation; thermal decomposition of oxidants - fluoroplastics; ignition and combustion of metal particles in gaseous decomposition products of oxidants; as well as ignition and development of combustion of mixture charges at elevated heating temperatures and external pressures. The samples used were compacted two-component mixtures of metal powders and fluoroplastics with additives of organic substances, which were manufactured by various compaction molding methods..

The **third chapter** presents the results of studies of the temperature on the surfaces of charges of mixtures of various geometric shapes and sizes (plane-parallel plates, rectangular elements of various thicknesses). In addition, nonlinear non-stationary mathematical models of heating products by external heat flows have been developed, which, unlike existing models, take into account the temperature dependences of the thermophysical properties of the charge of the mixture and take into account the influence of the main parameters of thermal

influences: the magnitude of heat flows from external heat sources and the times of their action. In order to study the process of heating products under the conditions of their storage or transportation, mathematical models of heating the surfaces of charges from various materials have been developed. Based on experimental studies of the physicochemical processes occurring in different combustion zones of two-component densified mixtures of metal powders and fluoroplastics, a model of their combustion under external thermal action has been developed. This model, unlike existing models of pyrotechnic mixture combustion, takes into account new data on high-temperature oxidation, ignition and combustion of metal particles in the products of thermal decomposition of oxidizers. According to the results of calculations, critical ranges of changes in the combustion rate of mixtures at elevated heating temperatures and external pressures for different ranges of changes in technological parameters were established, the excess of which causes explosive development of combustion of mixtures and fire-hazardous destruction of products.

The **fourth chapter** presents the results of experimental studies aimed at establishing new patterns of influence on the ignition temperature. T_3 and burning time τ_2 of metal powder particles in decomposition products of the studied mixtures. For mixtures $\text{Mg} + \text{F} - 3$ and $\text{Al} + \text{F} - 3$ new data on the influence of heating temperature was obtained T_0 and external pressure P on their burning rate. Data on the influence on the dependences $u(T_0)$ and $u(P)$ of such technological parameters as the nature and amount of organic substance additives, the density coefficient of the mixture, the diameter and charge, the shell material, etc are also presented. New experimental and statistical models have been developed, designed to form a database of calculated data (with a relative error of 4...7%), which quantitatively describe the influence of key technological parameters (α , ε , d_m , d_{ok} , K_Y) on the rate of development of the combustion process of mixtures under conditions of external thermal influences. These models provide the opportunity to increase the fire safety of pyrotechnic products at the manufacturing stage by purposeful regulation of technological parameters in the

conditions of their storage, transportation and use. It has been established for the first time that regulation of technological parameters of mixtures at the stage of their manufacturing allows to prevent unstable, explosive combustion regimes under conditions of external thermal influences, which lead to premature fire-hazardous destruction of products. This is achieved by controlled change of the burning rate of mixtures (or the time of action of products under conditions of their combat use) without the need to change the tactical and technical indicators of pyrotechnic products based on metallized fluoroplastic-containing mixtures.

In the **fifth chapter**, based on the obtained mathematical and experimental-statistical models, a scientifically substantiated method for determining the critical ranges of changes in the parameters of external thermal influences and controlled technological parameters of mixture charges at the stage of their manufacture was developed for the first time. Exceeding these ranges leads to premature explosive operation and fire-hazardous destruction of products. The specified method has found practical use and has been implemented in the activities of State Emergency Service of Ukraine, as well as in enterprises and organizations of Ukraine in the form of control tools and technological recommendations. This allowed, at the stage of manufacture of pyrotechnic products, by controlling the technological parameters of mixture charges (ratio of components, dispersion of metal fuel, fluoroplastics and additives of organic substances), to increase the temperature and delay time of their ignition by 1.2...1.7 times and reduce the probability of fire-explosive destruction of products during storage and transportation, taking into account external thermal influences, by 1.5...2.0 times. The results obtained were also implemented in the educational process of National University of Civil Protection of Ukraine when training specialists for State Emergency Service of Ukraine in specialty 261 "Fire Safety" at the educational level of "Doctor of Philosophy", "Master" and in specialty 263 "Civil Security" at the educational level of "Bachelor".

The scientific novelty of the obtained results lies in the following.

1. For the first time:

- the regularities of the influence of technological parameters of mixtures (average particle size d_m of metal fuel powders, oxidant excess coefficient α) and external pressure P on key characteristics of ignition processes (ignition temperature T_i and burning time τ_b of metal fuel particles in the decomposition products of mixtures) were established: a decrease d_m from 310 μm to 54 μm , α from 1,5 to 0,5 and increase of P from 10^5 Pa to 10^7 Pa increases T_i by 1.3...1.8 times; decreasing d_m from 310 μm to 54 μm , increasing α from 0,5 to 1,5 and P from 10^5 Pa to 10^7 Pa reduces τ_b by 1.3...2.9 times;
- the dependence of the rate of development of the combustion process of mixtures on elevated heating temperatures was established T_0 and external pressures P for practically used ranges of changes in technological parameters of their charges (ratio of components in the mixture, dispersion, compaction coefficient, diameter of the mixture charge, shell material): increasing T_0 from 293 K to 873 K and P from 10^5 Pa to 10^7 Pa can increase the burning rate by 4...6 times; in some ranges of parameters, a significant decrease in the burning rate of mixtures (more than 3...4 times) and stabilization of the process are also observed, which allows controlling the parameters to prevent unstable and explosive combustion development;
- on the basis of theoretical and experimental research, a scientifically substantiated method has been developed to determine the critical ranges of changes in the parameters of external thermal influences (heat flows, times of their action) and technological parameters of mixture charges, which allows preventing premature fire-hazardous operation of products based on them under conditions of external thermal influences.

2. Improved:

- mathematical models of the influence of external thermal effects on the charges of mixtures, which take into account their geometric shape and dimensions (plane-parallel plates, rectangular elements of different thicknesses),

as well as temperature dependences of the thermophysical properties of mixtures (volumetric heat capacity, thermal conductivity coefficient). This provides a more accurate determination of critical parameters of thermal effects and allows preventing the development of a fire-hazardous state of products.

3. *Further developed:*

– a mathematical model of the combustion process of two-component compacted mixtures of metal fuel and fluoroplastic powders, which takes into account the kinetic characteristics of thermal decomposition of oxidizers; the regularities of pre-flame oxidation and combustion of metal particles in decomposition products; thermodynamic calculations of the temperature of combustion products and the content of high-temperature condensate. This allows determining the critical ranges of changes in the burning rate of mixtures for different values of technological parameters and external thermal influences, the control of which prevents explosive combustion development and fire-hazardous destruction of products.

Key words: fire safety, pyrotechnic mixtures and products, explosion, fire, combustion, flame, heat flow, thermodynamic calculations, mathematical model, methodology, fire spread.

ЗМІСТ

ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ СТАНУ ПИТАННЯ	44
1.1. Найбільш характерні інциденти, що відбулись в результаті передчасних пожежовибухонебезпечних займань піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні в Україні та у всьому світі за останні десятиліття	44
1.2. Сучасний стан досліджень з поведінки компонентів сумішей в умовах зовнішніх термічних дій	54
1.3. Огляд та аналіз теоретичних та експериментальних досліджень процесів займання та розвитку горіння піротехнічних металовмісних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.	84
Висновки до розділу 1, мета та завдання досліджень.	110
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРАЗКІВ УЩІЛЬНЕНИХ СУМІШЕЙ З ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ ТА ФТОРОПЛАСТІВ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЙ	115
2.1. Загальна методика досліджень.	115
2.2. Основні фізико-хімічні властивості металевих пальних, фторопластів та характеристики їх порошків.	118
2.3. Характеристики зразків ущільнених сумішей.	137
2.4. Методики досліджень та обладнання, що моделюють процеси займання та розвитку горіння зразків сумішей в умовах зовнішніх термічних дій	139
Висновки до розділу 2.	143

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВУ, ЗАЙМАННЯ ТА РОЗВИТКУ ГОРІННЯ ДВОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ З ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ ТА ФТОРОПЛАСТІВ	144
3.1. Математичні моделі процесів зовнішніх термічних дій на зразки сумішей.....	144
3.2. Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, перевищення яких призводить до передчасного загоряння зразків сумішей та пожежонебезпечних руйнувань виробів.....	155
3.3. Дослідження впливу технологічних чинників та зовнішніх умов на температуру та вміст конденсованих продуктів згоряння сумішей.....	158
3.4. Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесів горіння ущільнених сумішей металеве пальне + фторопласт в умовах зовнішніх термічних дій.....	163
3.5. Визначення критичних діапазонів зміни швидкості горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій.....	177
Висновки до розділу 3.....	180
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРІННЯ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ УМОВ	183
4.1. Закономірності впливу технологічних параметрів на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку процесу горіння сумішей.....	183
4.2. Закономірності впливу зовнішніх умов на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку процесу горіння сумішей.....	192
4.3. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по температурам займання частинок металевих пальних в газоподібних продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей.....	200

4.4. Керована база даних по часам згоряння частинок металевих пальних в продуктах термічного розкладання сумішей.	208
4.5. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкостям розвитку процесу горіння сумішей.	213
Висновки до розділу 4.	221
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.	228
5.1. Розробка науково обґрунтованого методу визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій та технологічних параметрів сумішей, перевищення яких призводить до їх передчасного займання, вибухонебезпечного розвитку горіння та пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів.	229
5.2. Застосування методу для зниження кількості пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні в умовах зовнішніх термічних дій.	236
Висновки до розділу 5.	243
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ.	245
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.	248
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.	272
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертації.	279

Вступ

Обґрунтування актуальності теми дослідження. Сучасні ущільнені суміші на основі порошків металевих палих компонентів (Mg, Al, Ti, Zr тощо) у поєднанні з фторопластами (Ф – 3, Ф – 4 та ін.) набули широкого застосування в піротехнічних виробках різного призначення. Зокрема, їх використовують у запалювальних патронах і снарядах, як тверді палива для ракетних двигунів (РД, ПВРД тощо), а також у складових ракетно-космічної техніки.

Водночас останніми роками як в Україні, так і за кордоном спостерігається зростання кількості пожеж і вибухів під час зберігання, транспортування та використання таких виробів. Подібні інциденти спричиняють руйнування об'єктів, численні травми та людські жертви, а також значні матеріальні збитки, про що свідчать події, що мали місце в США в 2025 р., в Індії в 2024 р., в Іспанії в 2024 р., в Таїланді в 2023 р., в Лівані в 2020 р., в Мексиці в 2019 р., в Ізраїлі в 2017 р., в Україні та інших країнах. У багатьох випадках передчасне вибухонебезпечне спрацьовування піротехнічних виробів призводило до катастрофічних наслідків, оскільки гасіння зайнятих зарядів таких сумішей є надзвичайно складним. Це зумовлено тим, що їх горіння відбувається за рахунок власного окиснювача без участі кисню навколишнього повітря, а температура продуктів згоряння є дуже високою.

Аналіз зазначених інцидентів свідчить, що займання та подальше пожежовибухонебезпечне руйнування піротехнічних виробів зазвичай передують зовнішні термічні впливи. Вони виникають під час пожеж у складських приміщеннях, під час транспортування в умовах загоряння сусідніх об'єктів, у процесі пострілу чи польоту, а також під час бойових дій, де постійно фіксуються ударні термічні навантаження та локальні зони підвищених температур, спричинені артилерійськими обстрілами.

Через війну в Україні значно зросла кількість вибухів та пожеж, спричинених піротехнічними виробами, зокрема, боєприпасами.

З початком повномасштабної війни в Україні загроза значно зросла через масштабне забруднення територій вибухонебезпечними предметами – касетними боєприпасами, мінними загородженнями, нерозірваними піротехнічними боєприпасами та іншими вибухонебезпечними залишками війни. Ці предмети становлять особливу небезпеку для цивільного населення, зокрема в умовах інтенсивного нагрівання або різких кліматичних змін, які можуть спричинити їх передчасне спрацювання.

Загалом наведені приклади підтверджують, що ризики ураження та загибелі людей під час обігу піротехнічних виробів із зарядами зазначених сумішей залишаються вкрай високими. Багато питань, пов'язаних із забезпеченням їх пожежної безпеки під час зовнішніх термічних впливів, досі не розв'язані.

Саме тому винятково важливим є розроблення ефективних способів запобігання вимушених пожежонебезпечних руйнувань таких виробів при дії зовнішніх теплових факторів. Ці способи мають базуватися на науково обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів термічних впливів та технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких призводить до їх передчасного вибухонебезпечного спрацювання. Для цього необхідно мати результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагрівання оболонок зарядів за різних значень зовнішніх теплових потоків і тривалості їх дії, а також досліджень займання та розвитку горіння сумішей в різних зовнішніх умовах, зокрема при підвищених температурах і тисках. У той час як властивості сировини та особливості технологій виготовлення зарядів таких сумішей досліджені достатньо ґрунтовно, вплив технологічних параметрів — зокрема співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, діаметра заряду та інших факторів — на ключові характеристики процесів займання і розвитку горіння все ще залишається недостатньо вивченим. До таких характеристик належать температура займання частинок металу, тривалість їх горіння у продуктах розкладання

окиснювачів, температура та склад продуктів згоряння сумішей, швидкість розвитку процесу горіння тощо. Не дослідженими залишаються і науково обґрунтовані методи визначення вибухонебезпечних режимів розвитку горіння сумішей за умови зовнішніх термічних впливів.

У зв'язку з цим особливої значущості набуває формування наукових положень, що дозволять встановити основні закономірності процесів нагрівання, займання та розвитку горіння ущільнених сумішей порошків металевих палих і фторопластів. Саме такі положення слугуватимуть основою для створення ефективних методів запобігання пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів у разі дії зовнішніх теплових впливів, що підкреслює актуальність проведення відповідних досліджень.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання в галузі пожежної безпеки, яке полягає у розвитку наукового підґрунтя щодо запобігання передчасних пожежонебезпечних займань піротехнічних виробів із зарядами сумішей на основі порошків металевих палих та фторопластів. Це досягається шляхом встановлення критичних режимів процесів їхнього нагрівання, займання та розвитку горіння, що слугує основою для запобігання виникненню пожежі у випадку зовнішніх термічних дій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано відповідно до Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011–2015 роки (розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 № 2348-р), згідно з «Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами», що ратифікована на підставі Закону України № 1678-VII від 16.09.2014; «Стратегією розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року», затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 22.09.2021 № 1145-р., а також у рамках науково-дослідної

роботи, що виконувалася в Черкаському інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України (ДР № 0224U001538), в якій здобувач був виконавцем.

Мета та завдання досліджень. Мета роботи полягає у встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів зарядів металізованих сумішей на основі фторопластів та зовнішніх умов термічної дії на процеси їх нагріву, займання та розвитку горіння, що дозволяють створювати пожежовибухобезпечні піротехнічні вироби на їх основі.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні наукові та прикладні завдання.

1. Проаналізувати вплив зовнішніх термодій на заряди металізованих сумішей та визначити потенційні шляхи підвищення їх пожежної безпеки в зазначених умовах.
2. Розробити математичні моделі зовнішніх термічних впливів на заряди сумішей різної геометричної форми та розмірів для визначення розподілу температур по їх товщини з метою визначення пожежовибухонебезпечних режимів нагрівання виробів.
3. Проаналізувати фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння сумішей, встановити механізм їх горіння, розробити математичну модель процесу розвитку горіння двокомпонентних сумішей металеве пальне + фторопласт в умовах зовнішніх термічних впливів та встановити режими нестійкого, вибухонебезпечного горіння.
4. Провести експериментальні дослідження для визначення комплексного впливу технологічних параметрів сумішей і зовнішніх умов на основні характеристики процесів їх займання та горіння (температуру займання та час згоряння у газоподібних продуктах розкладання сумішей, швидкостей їх горіння).
5. Розробити науково обґрунтований метод визначення критичних значень технологічних параметрів сумішей та зовнішніх умов, перевищення яких спричиняє їх передчасне займання та вибухонебезпечний розвиток

горіння, що призводять до пожежовибухонебезпечного руйнування виробів; впровадити результати досліджень.

Об'єкт дослідження: процеси нагрівання, займання та розвитку горіння зарядів сумішей із урахуванням впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку виробів на їх основі.

Предмет дослідження: умови виникнення критичних режимів зовнішніх термічних дій на заряди сумішей, що призводять до їх передчасного займання, вибухонебезпечного розвитку горіння та пожежонебезпечного руйнування виробів.

Методи досліджень. Для виконання поставлених завдань застосовувалися сучасні методи фізико-хімічного аналізу, зокрема контактні та безконтактні способи вимірювання температури, кінозйомка та мікрокінозйомка, рентгеноструктурний аналіз тощо. Додатково використовувалися чисельно-аналітичні методи розв'язання задач тепло- та масообміну, а також методи математичної статистики для обробки отриманих експериментальних даних.

Випробування піротехнічних виробів та дослідження процесів займання й розвитку горіння зарядів сумішей (швидкість та концентраційні межі горіння, вибухонебезпечні режими розвитку у підвищених температурах та за різних зовнішніх тисків) проводилися на стандартному обладнанні. Всі чисельні розрахунки за моделями виконувалися на сучасних персональних комп'ютерах із застосуванням стандартних пакетів прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

1. Вперше:

– встановлено закономірності впливу технологічних параметрів сумішей (середнього розміру d_m частинок порошків металевих пальних, коефіцієнта надлишку окиснювача α) та зовнішнього тиску P на ключові характеристики процесів займання (температури займання T_z та часу горіння τ_z частинок металевих пального у продуктах розкладу сумішей):

зменшення d_m від 310 мкм до 54 мкм, α від 1,5 до 0,5 та збільшення P від 10^5 Па до 10^7 Па підвищує T_z у 1,3...1,8 разу; зменшення d_m від 310 мкм до 54 мкм, збільшення α від 0,5 до 1,5 та P від 10^5 Па до 10^7 Па зменшує τ_z у 1,3...2,9 разу;

– встановлено залежності швидкості розвитку процесу горіння сумішей від підвищених температур нагріву T_0 та зовнішніх тисків P для практично використовуваних діапазонів зміни технологічних параметрів їх зарядів (співвідношення компонентів у суміші, дисперсність, коефіцієнт ущільнення, діаметр заряду суміші, матеріал оболонки): підвищення T_0 від 293 К до 873 К та P від 10^5 Па до 10^7 Па може збільшувати швидкість горіння у 4...6 разів; при деяких діапазонах параметрів спостерігається також значне зменшення швидкості горіння сумішей (понад у 3...4 рази) та стабілізація процесу, що дозволяє керувати параметрами для запобігання нестійкому та вибухонебезпечному розвитку горіння;

– на отриманій базі теоретично-експериментальних досліджень розроблено науково обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх теплових впливів (теплових потоків, часів їхньої дії) та технологічних параметрів зарядів сумішей, що дозволяє запобігати передчасному пожежонебезпечному спрацюванню виробів на їх основі в умовах зовнішніх термічних дій.

2. Удосконалено:

– математичні моделі впливу зовнішніх термічних дій на заряди сумішей, які враховують їхню геометричну форму та розміри (плоско-паралельні пластини, прямокутні елементи різної товщини), а також температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності). Це забезпечує точніше визначення критичних параметрів термічних впливів і дозволяє запобігати розвитку пожежонебезпечного стану виробів.

3. Набули подальшого розвитку:

– математична модель процесу горіння двокомпонентних ущільнених сумішей із порошків металевих паливних та фторопластів, яка враховує кінетичні характеристики термічного розкладу окиснювачів; закономірності передполум'яного окиснення та горіння частинок металу у продуктах розкладу; термодинамічні розрахунки температури продуктів згоряння та вмісту високотемпературного конденсату. Це дозволяє визначати критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів і зовнішніх термічних впливів, керування якими запобігає вибухонебезпечному розвитку горіння та пожежонебезпечному руйнуванню виробів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукове підґрунтя для розроблення та впровадження технологічних рекомендацій, спрямованих на зниження ймовірності пожежонебезпечних руйнувань виробів в умовах їхнього зберігання та транспортування з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій. Практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблено науково обґрунтований метод, що дозволяє запобігати передчасному пожежонебезпечному займанню зарядів сумішей шляхом визначення та контролю критичних значень основних параметрів (теплових потоків, тривалості їх дії тощо) та забезпечувати контроль вибухонебезпечних режимів розвитку горіння сумішей при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках;
- створено науково-технічну базу експериментальних даних, що відображає закономірності впливу широкого кола технологічних параметрів сумішей (коефіцієнт надлишку окиснювача, величина та природа добавки органічної речовини, природа та дисперсність металевих паливних, коефіцієнт ущільнення сумішей, діаметр зарядів, матеріал і товщина оболонки, склад та вологість навколишнього середовища тощо) на швидкість розвитку процесу їх горіння під дією зовнішніх термічних

впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски та ін.). Ця база може широко застосовуватися у піротехнічній промисловості та в ракетно-космічному машинобудуванні.

Практичне впровадження результатів, зокрема результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи (підтверджено актами впровадження), відбулося у діяльності ДСНС України та на підприємствах країни. Використання розроблених засобів контролю та технологічних рекомендацій дозволило знизити ймовірність пожежовибухонебезпечного руйнування виробів під час зберігання та транспортування у 1,5...2,0 рази та запобігати передчасним вибухонебезпечним руйнуванням виробів у процесі їх застосування.

Отримані результати також знайшли застосування в освітньому процесі Національного університету цивільного захисту України при здійсненні підготовки фахівців для ДСНС України за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» освітнього рівня «доктор філософії», «магістр» та за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» освітнього рівня «бакалавр».

Обґрунтування та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується: результатами систематизації, аналізу та узагальнення даних значної кількості сучасних вітчизняних та зарубіжних джерел; відповідністю обраних сучасних фізико-хімічних методів дослідження визначеним меті і завданням роботи; великим обсягом експериментального матеріалу, отриманого із застосуванням стандартного піротехнічного обладнання та сучасних вимірювальних приладів; коректним використанням математичного та експериментально-статистичного моделювання процесів нагріву, займання та розвитку горіння зарядів сумішей на основі системи рівнянь тепло- та масообміну, хімічної кінетики, методів регресійного та кореляційного аналізу, а також чисельно-аналітичних методів розв'язання рівнянь з використанням стандартних пакетів програм; задовільною кореляцією результатів теоретичних та експериментальних досліджень (відносна похибка не перевищує 8...10 %),

а також апробацією та практичним впровадженням отриманих результатів досліджень.

Особистий внесок здобувача полягає в участі у формулюванні науково-практичного завдання у галузі пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів, наукових положень, самостійному визначенні мети та завдань дослідження, об'єкту та предмету дослідження, у систематизації та аналізі вітчизняних та закордонних досліджень, розробці теоретичних розділів дисертації, удосконаленні методів та методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень, а також у математичній обробці результатів, формулюванні висновків. Дисертація є самостійною роботою автора. Експериментальні дослідження та впровадження результатів досліджень виконані спільно зі співавторами публікацій. Усі положення, які винесені на захист, та результати досліджень наведено в роботах [33, 91 – 101, 103, 134, 135, 138, 139], з яких робота [95] опублікована здобувачем самостійно.

У роботах, які опубліковано у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- у науковій праці «Підвищення стійкості процесу горіння піротехнічних сумішей шляхом введення добавок органічних речовин» здобувачем проведено аналіз добавок органічних речовин, що використовуються в технічному виробництві для проведення досліджень, обрано добавки, що здійснюють найбільш значний вплив на швидкість і режими розвитку процесу горіння сумішей [33];
- у науковій праці «Експериментально-статистичні моделі для отримання базу даних по швидкостям розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі металевих пальних, фторопластів та добавок органічних речовин» здобувачем проведено експериментальні дослідження залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних

параметрів та зовнішніх умов (температури нагріву, складу, тиску та ін.) [94];

– у науковій праці «Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей металевих палив з фторопластами в умовах зовнішніх термічних впливів» здобувачем встановлено механізм горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих палив та фторопластів, а також розроблено математичну модель їх горіння в умовах зовнішніх термодій, що дозволяє визначати закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на стійкі вибухобезпечні режими розвитку горіння сумішей [96];

– у науковій праці «Керована база даних по часам згоряння частинок металевих палив в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів» здобувачем проведено експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на час згоряння частинок металевих палив в продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів [97];

– у науковій праці «Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин» здобувачем проаналізовано методи експериментально-статистичного моделювання з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм для проведення розрахунків [98];

– у науковій праці «Закономірності впливу різних чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих палив» здобувачем проаналізовано наявні дані по впливу розглядуваних чинників на швидкість розвитку процесу горіння інших металізованих піротехнічних сумішей для співставлення з отриманими даними [100];

– у науковій праці «Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих

сумішей в умовах їх зберігання та транспортування» здобувачем було визначено критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів (теплового потоку, часу його дії) для різних технологічних параметрів [101];

– у науковій праці «Визначення процесів займання частинок металевих палих у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно- металевих сумішей» здобувачем було проведено експериментальні дослідження температури займання та часу індукції частинок металевих палих у продуктах розкладання сумішей [103];

– у науковій праці «Combustion model for burning multicomponent pyrotechnic nitrate-metallized mixtures» здобувачем було проведено експериментальні дослідження фізико хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння сумішей [134];

– у науковій праці «Regulations of the Influence of External Thermal Influences on Speed and Explosive Safe Combustion Modes of Pyrotechnic Nitrate Metallized Mixtures with Metal Fluoride» здобувачем розроблено розрахункові методи визначення критичних значень швидкості горіння сумішей при різних зовнішніх умовах, перевищення яких призводить до вибухонебезпечного руйнування виробів [135];

– у науковій праці «Experimental-Statistical Models for Obtaining a Database on the Ignition Temperatures of Metal Fuel Particles in Gaseous Products of Thermal Decomposition of Fluoroplasts-Based Pyrotechnic Mixtures» здобувачем проведено експериментальні дослідження по впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на температуру займання частинок металевих горючих в продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів [139];

– у науковій праці «Thermodynamic calculations for determine the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder» здобувачем проведено термодинамічні розрахунки температури продуктів згоряння суміші, вмісту в них високотемпературного конденсату для різних значень технологічних

параметрів та зовнішніх умов, що дозволяє шляхом контролю за їх рівнем підвищувати пожежовибухобезпечні властивості сумішей при застосуванні виробів [138];

– у науковій праці «Аналіз швидкостей горіння піротехнічних сумішей з урахуванням компонентів, таких як металеві пальні, фторопласти та органічні добавки, за допомогою розробки експериментально-статистичних моделей та створення бази даних» здобувачем розроблено та експериментально-статистичні моделі для визначення діапазонів зміни критичних значень швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій [91];

– у науковій праці «Закономірності впливу широкого класу добавок речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей» здобувачем експериментально визначено ступінь впливу широкого класу добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, ідитолу, уротропіну та ін.) на залежності швидкості горіння сумішей на основі фторопластів від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків [92];

– у науковій праці «Критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах транспортування» здобувачем розроблено методи визначення критичних значень технологічних параметрів в умовах зовнішніх термовпливів на заряди ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів різної геометричної форми та розмірів [99];

– у науковій праці «Визначення закономірностей впливу теплового потоку на поверхні піротехнічних виробів» здобувачем розроблено математичні моделі теплового впливу на поверхню металевих оболонок піротехнічних виробів на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів в умовах їх зберігання або транспортування з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій [93].

Особистий внесок кожного автора. У роботах, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок кожного автора полягає в наступному.

- у науковій праці «Підвищення стійкості процесу горіння піротехнічних сумішей шляхом введення добавок органічних речовин» [33] автором Кириченком Є. П. експериментально досліджено вплив величини та природи добавок органічних речовин, що надають каталітичний або інгібуючий вплив на процес горіння сумішей з урахуванням підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків; автором Гвоздем В. М. проаналізовано методики вимірювання швидкості горіння піротехнічних металізованих сумішей з урахуванням впливу різноманітних зовнішніх умов та обрана найбільш прийнятна; автором Кириченко О. В. систематизовано наявні у піротехнічному виробництві установки для випробувань зарядів піротехнічних сумішей та серед них обрані ті, які дозволять більш точно (одночасно спалюються до 5 зразків) проводити дослідження процесів займання та горіння розглядуваних сумішей; автором Ващенком В. А. визначено за наявними даними вплив добавок різних органічних речовин на інші піротехнічні металізовані суміші, що найбільш дотичні до розглядуваних сумішей для систематизованого порівняння; автором Бутенко Т. І. проаналізовано наявні стандартні пакети прикладних програм для проведення математичної обробки отриманих залежностей швидкостей горіння суміші від технологічних параметрів та зовнішніх чинників, обрано найбільш ефективні; автором Цибуліним В. В. проведено систематизацію і аналіз сучасних методів математичної статистики (методів кореляції, регресії тощо) та визначено їх спроможності для побудови експериментально-статистичних моделей на основі отриманих експериментальних даних;
- у науковій праці «Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкостям розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі металевих палих, фторопластів та добавок органічних речовин» [94] автором Кириченко О. В. за допомогою методів математичної статистики отримано експериментально-статистичні моделі, що дозволяють визначати залежності швидкості горіння суміші від

різних чинників; автором Ващенком В. А. проведено зіставлення отриманої бази даних по швидкостям горіння розглядуваних сумішей з аналогічною базою даних для інших піротехнічних сумішей, виявлено якісні та кількісні відмінності, дано їх фізичне тлумачення; автором Школярем Є. В. проведено аналіз існуючих методів математичної статистики, вибрано найбільш ефективні, що дозволяють більш точно отримувати моделі у короткий термін; автором Томенко М. Г. вибрано сучасні пакети прикладних програм для проведення розрахунків на ПК; автором Хижняком А. А. проведено розрахунки на ПК залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів та зовнішніх умов; автором Коліньком С. О. проаналізовано теплофізичні та термомеханічні властивості сумішей та встановлено їх температурні залежності;

– у науковій праці «Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей металевих пальних фторопластами в умовах зовнішніх термічних впливів» [96] автором Кириченко О. В. проаналізовано літературні дані щодо термічного розкладання фторопластів в умовах, наближених до горючих сумішей; автором Куценко М. А. проаналізовано дані щодо високо температурного окиснення та спалахування частинок металу у активних газоподібних середовищах; автором Ващенком В. А. визначено вплив параметрів окиснювального газоподібного середовища на процеси передполум'яного окиснення та спалахування частинок металу; автором Березовським А. І. систематизовано літературні дані по моделям горіння піротехнічних сумішей, визначено їх недоліки; автором Школярем Є. В. проведено порівняльний аналіз розроблених схем горіння твердих палив найбільш подібних до розглядуваних піротехнічних сумішей та обрано найбільш прийнятну; автором Мотрічуком Р. Б. вибрано найбільш точний метод термодинамічного розрахунку температури та складу продуктів згоряння сумішей;

- у науковій праці «Керована база даних по часам згоряння частинок металевих пальних в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів» [97] автором Кириченко О. розроблено експериментально-статистичні моделі для визначення на ПК ступеня впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на час згоряння частинок металевих пальних у продуктах розкладання сумішей; автором Куценко М. вибрано найбільш ефективні методи математичної статистики, що дозволяють отримувати більш точні моделі у короткий термін; автором Ващенком В. проведено зіставний аналіз вказаної бази даних з аналогічними базами для інших піротехнічних та методик для вимірювання металізованих сумішей, виявлено відмінності та здійснено їх тлумачення; автором Березовським А. зроблено аналіз стандартного обладнання часу згоряння частинок металу в активних газоподібних продуктах розкладання сумішей; автором Школярем Є. вибрано стандартні пакети прикладних програм для проведення розрахунків на ПК; автором Томенко М. проаналізовано фізико-хімічні властивості металевих пальних та продуктів розкладання окиснювача, встановлено їх температурні залежності;
- у науковій праці «Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин» діагноста [98] автором Козяром Н. проведено експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу величини та природи добавок неорганічних речовин на швидкість та критичні режими розвитку горіння сумішей; автором Кириченко О. систематизовано стандартні методи математичної статистики (методи кореляції та регресії) та пакети прикладних програм для математичної обробки даних в режимах діалогу та реального часу; автором Ващенком В. визначено перелік добавок неорганічних речовин, що використовуються у піротехнічному виробництві та здійснюють найбільш суттєвий каталітичний або інгібуючий вплив на швидкість та режими розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей;

автором Коліньком С. проведено порівняльний аналіз ступеня впливу, розглядуваних неорганічних речовин на швидкість і режими розвитку швидкості горіння інших піротехнічних сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків; автором Томенко М. представлено отриману базу експериментальних даних у вигляді більш інформаційних тривимірних графіків;

– у науковій праці «Закономірності впливу різних чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих палих» [100] автором Козяром Н. М. проведено експериментальні дослідження з визначення закономірності впливу технологічних параметрів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, властивості окиснювача, діаметра зразка та матеріалу оболонки) та зовнішніх умов (складу та властивості середовища, зовнішнього тиску) на швидкість та стабільність процесу горіння сумішей; автором Кириченко О. В. визначено сучасні методи математичної статистики та стандартні пакети прикладних програм для проведення обробки експериментальних даних; автором Ващенком В. А. визначено фізико-хімічні основи для використання отриманих експериментальних даних; автором Коліньком С. О. проведено порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних з наявними даними для інших піротехнічних сумішей; автором Цибуліним В. В. визначено принципи стабільного розвитку процесу горіння сумішей в залежності від висоти запресовок для порошків металевих палих та окиснювачів різної дисперсності;

– у науковій праці «Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування» [101] автором Козяром Н. М. розроблено математичні моделі та методи розрахунку процесів нагрівання поверхні виробів з зарядами сумішей різної геометричної форми, яким вони піддаються в умовах зберігання та транспортування; автором

Кириченко О. В. за допомогою відомих математичних методів (метод Фур'є, методи інтегральних перетворень та ін.) було отримано аналітичні вирази для визначення розподілів температури вздовж поверхні металевої оболонки та по її товщині; автором Дядюшенком О. О. реалізовано відомі чисельно-аналітичні розрахункові методи та вибрано найбільш ефективні (підвищена точність розрахунків, мінімальний розрахунковий час та ін.); автором Ващенком В. А. проаналізовано теплофізичні та термомеханічні властивості піротехнічних сумішей на основі фторопластів та знайдено їх температурні залежності; автором Коліньком С. О. проведено зіставлення результатів розрахунків з експериментальними даними та визначено похибки розрахункових розподілів температур у металевих оболонках виробів;

– у науковій праці «Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування» [103] автором Козяром Н. М. досліджено процеси займання частинок металевих палих у продуктах розкладання сумішей; автором Кириченко О. В. проведено аналіз відомих методів вимірювання основних параметрів процесу займання частинок металу у різних газоподібних середовищах в умовах їх нагріву (температура займання, час індукції) з точки зору їх трудомісткості, точності та часових витрат; автором Дядюшенком О. О. проаналізовано та вибрано найбільш ефективні (менш трудомісткі, більш точні) методи математичної статистики для обробки результатів експериментів у вигляді регресійних залежностей; автором Ващенком В. А. проаналізовано отримані залежності температури займання та часу індукції частинок металевих палих; автором Коліньком С. О. систематизовано літературні дані про фізико-хімічні властивості металевих палих та продуктів термічного розкладання окиснювачів;

– у науковій праці «Combustion model for burning multicomponent pyrotechnic nitrate-metallized mixtures» [134] автором Козяром Н. розроблено

розрахункові методи визначення критичних режимів розвитку процесу горіння суміші в умовах зовнішніх термічних дій для різних значень технологічних параметрів, що призводять до нестабільного вибухонебезпечного його протікання; автором Кириченко О. сформульовано механізм горіння сумішей з врахуванням процесу агломерації частинок металевго пального на поверхні горіння; автором Ващенком В. теоретично узагальнено фізико-хімічні процеси, що протікають у к-фазі при горінні суміші; автором Колінським С. змодельовано процеси згоряння диспергованих частинок металевго пального в зоні полум'я; автором Бутенко Т. за допомогою стандартного програмного забезпечення проведено розрахунки залежностей швидкості горіння суміші від технологічних параметрів та зовнішніх умов; автором Цибуліним В. вибрано оптимальні пакети прикладних програм по сучасним чисельним методам, що дозволяють проводити розрахунки на ПК;

– у науковій праці «Regulations of the Influence of External Thermal Influences on Speed and Explosive Safe Combustion Modes of Pyrotechnic Nitrate Metallized Mixtures with Metal Fluoride» [135] автором Козяром Н. встановлено механізм горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей в умовах зовнішніх тисів; автором Кириченко О. сформульовано рівняння процесу розповсюдження фронту горіння у к-фазі сумішей з врахуванням впливу параметрів зовнішніх термічних дій (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків); автором Дядюшенком О. проаналізовано та вибрано найбільш прийнятні (по трудомісткості, точності та часу розрахунків) пакети прикладних програм для проведення розрахунків залежності швидкості горіння сумішей;

– у науковій праці «Thermodynamic calculations for determine the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder» [138] автором Кириченко О. проаналізовано існуючі методи термодинамічних розрахунків основних характеристик процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей (температури та

складу продуктів згоряння); автором Землянським О. вибрано для проведення термодинамічних розрахунків метод, що враховує фазову нерівноважність продуктів згоряння, як найбільш прийнятний для високометалізованих сумішей (вміст металевго пального більше 60 %); автором Мотрічуком Р. проведено розрахунки температури та складу продуктів згоряння двокомпонентних сумішей метал + окиснювач при нормальних зовнішніх умовах; автором Школярем Є. встановлено вплив добавок органічних речовин на температуру продуктів згоряння сумішей та вміст у них високотемпературного конденсату;

– у науковій праці «Experimental-Statistical Models for Obtaining a Database on the Ignition Temperatures of Metal Fuel Particles in Gaseous Products of Thermal Decomposition of Fluoroplasts-Based Pyrotechnic Mixtures» [139] автором Кириченко О. застосовано методи математичної статистики (методи кореляції і регресії) для обробки даних та побудови експериментально-статистичних моделей; автором Куценко М. проведено розрахунки по моделям для формування бази даних по температурам займання частинок металевих горючих в активних продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів; автором Школярем Є. обрано найбільш ефективні пакети прикладних програм для проведення розрахунків по моделям на сучасних ПК для формування бази даних;

– у науковій праці «Аналіз швидкостей горіння піротехнічних сумішей з урахуванням компонентів, таких як метали пальні, фторопласти та органічні добавки, за допомогою розробки експериментально-статистичних моделей» [91] автором Кириченко Є. вибрано найбільш ефективні методи математичної статистики (методи регресії та інтерполяції), що дозволяють отримувати високоточні регресійні рівняння, що складають основу моделей; автором Школярем Є. з використанням стандартних пакетів прикладних програм по моделям проведено розрахунки залежностей швидкості горіння сумішей від різних параметрів; автором Хижняком А. проведено порівняльний аналіз отриманих розрахункових залежностей

швидкостей горіння сумішей з аналогічними даними для інших піротехнічних металізованих сумішей та встановлено їх якісну кореляцію;

– у науковій праці «Закономірності впливу широкого класу добавок речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей» [92] автором Кириченко О. було використано методи математичної статистики для обробки отриманих експериментальних даних та отримання регресійних кривих з мінімальною похибкою;

– у науковій праці «Критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах транспортування» [99] автором Козяром Н. розроблено математичну модель зовнішнього радіаційного-конвективного нагріву зарядів сумішей в умовах транспортування та визначено критичні значення теплових потоків та часів їх дії, перевищення яких призводить до передчасного займання сумішей та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів; автором Кириченко О. проаналізовано теплофізичні та термомеханічні характеристики зарядів металізованих піротехнічних сумішей на основі фторопластів та встановлено їх температурні залежності (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності та ін.); автором Дядюшенком О. використано відомі математичні методи (методи інтегральних перетворень Фур'є та ін.) для отримання аналітичних виразів, що дозволяють розраховувати розподіли температури у виробах; автором Георгієвським Д. використано стандартні пакети прикладних програм по сучасним чисельним методом для проведення розрахунків;

– у науковій праці «Визначення залежності впливу теплового потоку на поверхні піротехнічних виробів» [93] автором Кириченко О. В. встановлено вплив геометричної форми та заряду суміші, матеріалу та товщини оболонки, а також теплофізичних властивостей суміші на розподіл температури вздовж поверхні та по товщині виробу в умовах зовнішніх термовпливів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали схвалення на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях: XIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023 р.); XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022») (м. Харків, НУЦЗ України, 2022 р.); XII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.).

Публікації. Результати досліджень, що висвітлено у дисертації, опубліковано у 17 наукових працях, серед яких 10 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України, 2 статті опубліковано у наукових виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 1 стаття в інших виданнях, що додатково відображає результати дисертації, 4 тези доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 287 сторінок, з них обсяг основного тексту 177 сторінок, 101 рисунки, 42 таблиць, список використаних джерел складає 165 найменувань та займає 24 сторінки, а також 2 додатків на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Найбільш характерні інциденти, що відбулись в результаті передчасних пожежовибухонебезпечних займань піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні в Україні та у всьому світі за останні десятиліття

Сучасний рівень обігу піротехнічних виробів різного функціонального призначення (зберігання, транспортування, застосування) характеризується недостатньою увагою до питань забезпечення пожежної безпеки, що нерідко зумовлює виникнення численних пожеж і вибухів, загибелі та травмування людей, у тому числі дітей, а також значні матеріальні втрати [6, 11, 39, 74, 104, 108, 114, 119 – 123, 145, 146, 149, 155].

У багатьох ситуаціях передчасні вибухонебезпечні спрацьовування піротехнічних виробів мали катастрофічні наслідки, оскільки ініційований процес горіння зарядів піротехнічних сумішей практично неможливо ефективно локалізувати або зупинити із застосуванням сучасних засобів пожежогасіння [2, 3, 9, 11, 17 – 23, 31, 39, 74, 80, 88, 104, 107 – 113, 142, 165].

Аналіз масштабних техногенних інцидентів свідчить про високий рівень небезпеки, пов'язаної з обігом піротехнічної продукції. Вибухи і пожежі при застосуванні піротехнічних виробів і сумішей в світі призводять до серйозних наслідків, включаючи численні жертви та поранення. Подальші події також підтверджують системний характер проблеми.

Недавні інциденти включають вибух на складі у Каліфорнії (2025 р.), що призвело до загибелі людей (рис. 1.1)



Рисунок 1.1 – Наслідки вибухів на складі піротехніки, Каліфорнія, США, 2025 р.

На складі піротехніки в Таїланді (2023 р.) стався потужний вибух, внаслідок чого загинуло щонайменше 10 осіб, понад 100 осіб отримали поранення (рис. 1.2). Вибухи завдали збитків у радіусі приблизно 500 метрів, постраждало майже 100 житлових будинків.

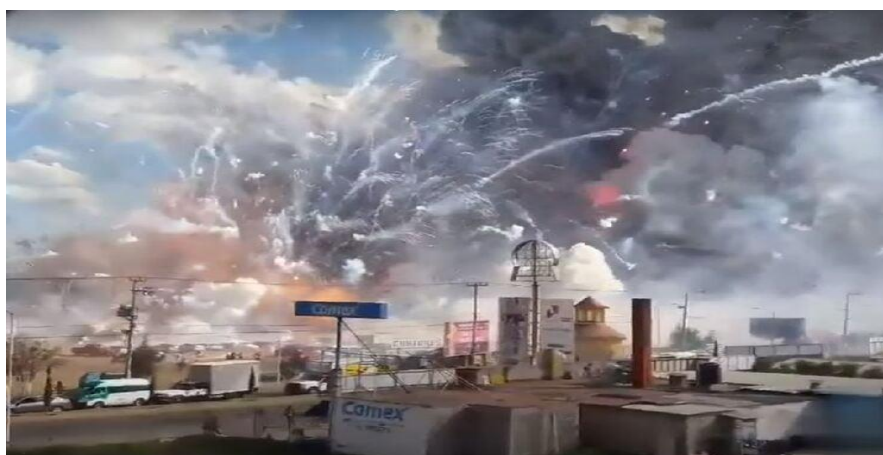


Рисунок 1.2 – Наслідки вибухів на складі піротехніки, Таїланд, 2023 р.

У 2024 році в Індії сталося кілька вибухів піротехніки. Зокрема, 11 лютого вибух на нелегальному заводі в штаті Мадх'я-Прадеш призвів до загибелі 11 людей, а 18 лютого на фабриці в штаті Тамілнад загинуло щонайменше 10 осіб (рис. 1.3). Крім того, 29 жовтня 2024 року пожежа на складі піротехніки біля храму в штаті Керала під час фестивалю призвела до поранень понад 150 людей.



Рисунок 1.3 – Наслідки вибухів на піротехнічній фабриці, Тамілнад, Індія 2024 р.

В Іспанії в листопаді 2024 року на піротехнічному заводі в провінції Андалусія на півдні Іспанії стався вибух, в результаті якого троє людей загинули, ще троє зазнали поранень (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Наслідки вибухів на піротехнічному заводі, Андалусія, Іспанія, 2024 р.

Особливо масштабні наслідки мала катастрофа в порту міста Бейрут у серпні 2020 року, коли з інтервалом близько 15 хвилин сталися два вибухи. Ударні хвилі практично повністю зруйнували припортову інфраструктуру та пошкодили будівлі на відстані до 10 км. Унаслідок трагедії загинуло щонайменше 220 осіб, понад 6000 отримали поранення, а до 300 тисяч мешканців залишилися без житла. Причиною вибуху стало детонування близько 2750 т піротехнічної продукції з наявністю нітратовмісного

окиснювача (нітрату амонію), яка зазнала зовнішнього теплового впливу під час проведення ремонтних зварювальних робіт (рис. 1.5).

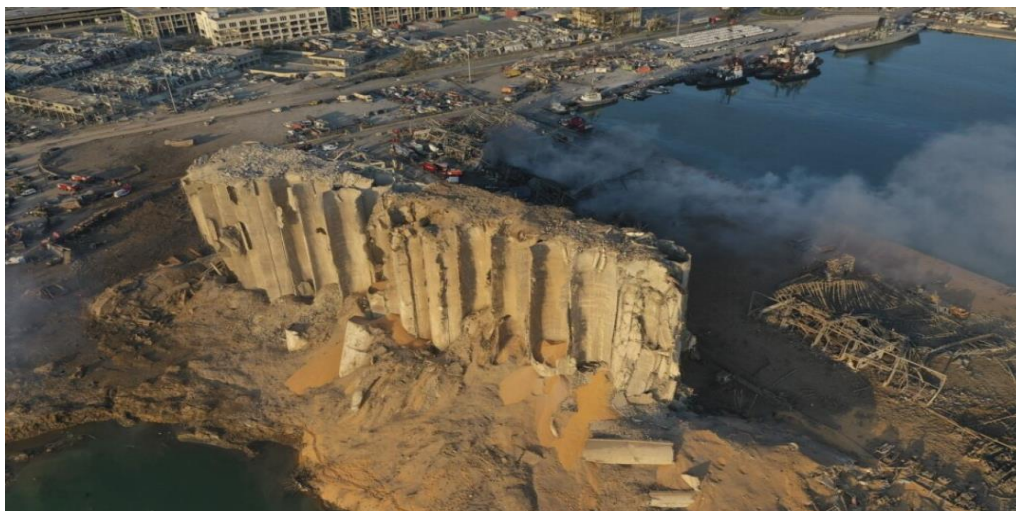


Рисунок 1.5 – Наслідки вибухів в порту Бейрута, 2020 р.

У березні 2019 року потужний вибух прогрімів в районі майстерень з виробництва піротехніки у муніципалітеті Чімальюакан (передмістя столиці Мексики), були постраждалі, нанесено значні матеріальні збитки. В червні 2018 року у німецькому місті Ландсхут у Баварії загорівся завод автоконцерну BMW з наявністю піротехнічних магнієвих виробів, отримали тяжкі травми декілька людей, включаючи працівників та пожежних, збитки склали більше двох мільйонів євро. У вересні 2017 року в Іспанії сталося загоряння на виробничому складі з піротехнічною продукцією, в результаті постраждало декілька людей утворилась хмара токсичного диму. В 2017 році відбувся вибух на складі фейерверків і піротехніки в Ізраїлі на півночі від Тель-Авіва в районі Мошав-Порат, внаслідок якого 2 особи загинули, ще декілько отримали поранення.

Негативна ситуація простежується й в Україні. Так на протязі останніх років при застосуванні піротехнічних виробів та сумішей було зафіксовано низку трагічних випадків, пов'язаних із використанням петард, салютів і феєрверків, що призвело до значної кількості постраждалих із опіками, переломами та іншими травмами.

Окрім надзвичайних ситуацій на цивільних об'єктах, упродовж останніх 10–15 років в Україні неодноразово фіксувалися пожежі та вибухи на військових складах, де зберігалися боєприпаси, зокрема й піротехнічні вироби. Такі події супроводжувалися загибеллю та травмуванням як військовослужбовців, так і цивільного населення, масовою евакуацією мешканців прилеглих населених пунктів, а також значними матеріальними втратами.

Одним із найбільш резонансних випадків став вибух 29 жовтня 2015 року в місті Сватове Луганської області, де на складі зберігалося близько 3500 т боєприпасів. Унаслідок надзвичайної ситуації було пошкоджено 25 об'єктів соціальної сфери, 59 багатоповерхових житлових будинків і 3314 будинків приватного сектору; загинула одна цивільна особа та троє військовослужбовців.

Подальша масштабна аварія трапилася 23 березня 2017 року в місті Балаклея Харківської області, де на ракетно-артилерійському арсеналі та загальновійськових складах виникла пожежа з подальшою детонацією боєприпасів і розльотом снарядів. Із зони ураження було евакуйовано майже 36 тис. осіб, зруйновано 392 будівлі, постраждали близько 3908 мешканців міста (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Наслідки вибухів на ракетно-артилерійському арсеналі боєприпасів м. Балаклея, Харківська область, 2017 р.

Черговий вибух надзвичайної потужності стався 26 вересня 2017 року в селі Калинівка Вінницької області, де на території 48 арсеналу

Міністерства оборони відбулася детонація близько 188 тис. т боєприпасів. Із Калинівки та прилеглих населених пунктів евакуювали понад 30 тис. осіб, десятки людей зазнали травм (рис. 1.7). Ще один інцидент зафіксовано 9 жовтня 2018 року в місті Ічня Чернігівської області, де на території шостого арсеналу Міністерства оборони відбулися вибухи боєприпасів, що зумовило необхідність евакуації близько 12 тис. мешканців із навколишніх населених пунктів .



Рисунок 1.7 – Наслідки вибухів боєприпасів с. Калинівка, Вінницька область, 2017 р.

Узагальнення наслідків подібних надзвичайних ситуацій свідчить, що за роки незалежності України склади боєприпасів вибухали понад два десятки разів. Збитки, завдані обороноздатності держави, важко піддаються точній оцінці, а матеріальні втрати обчислюються мільярдами гривень. Значних руйнувань зазнали об'єкти інфраструктури та житлового фонду, загинули й отримали тілесні ушкодження як військовослужбовці, так і цивільні громадяни.

Через війну в Україні значно зросла кількість вибухів та пожеж, спричинених піротехнічними виробами, зокрема, боєприпасами. Після початку повномасштабної збройної агресії проти України актуалізувалася надзвичайно небезпечна проблема забруднення території держави вибухонебезпечними предметами, зокрема касетними боєприпасами, мінними загородженнями, нерозірваними піротехнічними виробами тощо. Значна кількість таких об'єктів була залишена окупаційними військами на

територіях міст і сіл, що створює реальну загрозу для життя і здоров'я мирного населення, особливо за умов термічних впливів (інтенсивного нагрівання, різких кліматичних коливань та інших чинників).

З початку повномасштабного вторгнення Державна служба з надзвичайних ситуацій знешкодила сотні тисяч вибухонебезпечних предметів, а в деяких регіонах, як-от Харківська та Херсонська області, піротехніки працюють найінтенсивніше.

До забруднених територій відносяться деокуповані райони, території, які перебувають під окупацією, де ведуться або велися бойові дії, а також території, що перебувають під постійними обстрілами. З початку вторгнення піротехніки ДСНС вилучили та знешкодили понад 600 тис. вибухонебезпечних предметів, включаючи авіаційні бомби. Також було обстежено величезні площі землі, які часто стають джерелом вибухів та пожеж. Найбільш небезпечними регіонами залишаються Харківська, Херсонська, Донецька, Київська, Миколаївська, Чернігівська та Сумська області.

До зон підвищеної мінно-вибухової небезпеки належать деокуповані території, тимчасово окуповані райони, ділянки активних або минулих бойових дій, а також місцевості, що зазнають систематичних обстрілів. Пожежі, які виникають у таких зонах, за характером розвитку можуть бути поодинокими, суцільними (включно з вогневими штормами) та такими, що виникають у завалах. Сукупність зазначених пожеж утворює явище масової пожежі.

Формування та розвиток масових пожеж відбуваються внаслідок комплексної дії процесів теплопередачі, а саме: випромінювання, теплопровідності та конвекції, а також через перенесення розжарених іскор та палаючих фрагментів. Окрім цього, масові пожежі супроводжуються значним загадуванням і задимленням захисних споруд, виробничих та житлових будівель, підвищенням температури навколишнього повітряного

середовища, а також інтенсивним тепловим випромінюванням, що негативно впливає на людей і навколишні об'єкти.

Так, у ніч проти 14 вересня 2025 року на Київщині (поблизу Фастова) стався вибух у вантажному поїзді, що перевозив військовий вантаж, спричинений детонацією боєприпасів. Інцидент призвів до пошкодження залізничної колії та зміни маршрутів поїздів, але, за даними Генштабу ЗСУ, особовий склад не постраждав. На місці події працювали рятувальники та піротехніки для ліквідації наслідків та обстеження території (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Наслідки пожежі та вибухів при транспортуванні боєприпасів, Фастів, Київська область, 2025 р.

Отримані результати свідчать про суттєве зростання ризиків ураження та загибелі людей у разі передчасного пожежо- та вибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних виробів із зарядами на основі досліджуваних сумішей. У зв'язку з цим актуалізується значна кількість невирішених питань, пов'язаних із забезпеченням їх пожежної безпеки в умовах дії зовнішніх термічних факторів.

Розгляд впливу зовнішніх термічних дій на вироби, що зумовлюють їх пожежонебезпечне руйнування, показує наступне. Піротехнічні вироби з зарядами різної геометричної форми та габаритів (зокрема у вигляді плоско-паралельних пластин, прямокутних елементів різної товщини тощо) під час зберігання, транспортування або застосування (пуск із нерухомих наземних

установок чи з літальних апаратів), у районах бойових дій та на територіях, що зазнають артилерійських обстрілів, можуть опинятися в осередках підвищених температур. За таких умов вони зазнають інтенсивних зовнішніх термічних впливів, зокрема в разі пожеж на складських об'єктах, під час транспортування при загорянні навколишніх легкозаймистих матеріалів із високою температурою полум'я (табл. 1.1), а також у процесі надзвукового обтікання повітряним потоком під час пострілу та польоту, що призводить до значного нагріву поверхні виробів (табл. 1.2).

Наслідком дії зазначених факторів є інтенсивний тепловий вплив на реакційноздатні до підвищених температур заряди сумішей, незалежно від їх геометричної форми та розмірів, що спричиняє передчасні локальні займання з подальшим розвитком процесу горіння за умов підвищених температур і зовнішніх тисків. У результаті відбуваються вибухонебезпечні руйнування виробів з утворенням характерних факторів пожежі, зокрема полум'я або високотемпературного струменя продуктів згорання, а також диспергованих продуктів у вигляді уламків металевих корпусів, розігрітих фрагментів основних зарядів, іскор тощо.

На етапах проектування й розроблення піротехнічних виробів із зарядами на основі піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів ключового значення набуває завдання запобігання їх пожежонебезпечних руйнувань за умов дії різноманітних зовнішніх термічних дій, яким вони можуть піддаватися в процесі обігу. З урахуванням особливостей застосування таких виробів у прифронтових зонах в умовах збройної агресії особливо важливим є визначення критичних режимів нагрівання, перевищення яких призводить до займання зарядів сумішей, інтенсифікації та вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння за підвищених температур і зовнішніх тисків. Наслідком цього є передчасне спрацьовування виробів і виникнення пожежонебезпечних руйнувань, що створюють загрозу для навколишніх об'єктів (пускових установок з обслуговуючим персоналом, будівель, легкозаймистих матеріалів тощо).

Таблиця 1.1– Значення температур полум'їв та ступені їх чорноти основних палих матеріалів [5, 6].

№	Пальний матеріал	Температура полум'я, К	Ступінь чорноти
1	Торф, мазут	1273	0,88
2	Деревина, буре вугілля, сира нафта, дизельне паливо, тракторний гас	1373...1423	0,6
3	Кам'яне вугілля, каучук та вироби з нього, бензин	1473...1523	0,9
4	Антрацит, сірка	1573	0,6
5	Горючі гази	1773...1973	0,7
6	Метали	> 2373...2623	0,45

Примітка. Діапазон зміни зовнішнього теплового потоку $q_n = 1,8 \cdot 10^5 \dots 3,4 \cdot 10^6$ Вт/м².

Таблиця 1.2 – Значення температури поверхонь виробів (T_n , К) залежно від швидкості обдуву повітряним потоком (V , м/с) та режиму обтікання (за даними продувок тіл різної геометричної форми в аеродинамічних трубах [8, 74]).

$V, 10^2$ м/с	$T_n, \text{К}$	
	Ламінарний режим	Турбулентний режим
5	540	620
6,5	730	840
10	820	950
14	1040	1170
17	1320	1480
20	1650	1850

Примітка. Діапазони зміни зовнішнього теплового потоку: $q_n = 2,5 \cdot 10^6 \dots 3,0 \cdot 10^7$ Вт/м² (ламінарний режим обтікання, $Re = \frac{D \cdot V}{\nu} < 10^5$ (D – діаметр виробу, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря)); $q_n = 3,5 \cdot 10^5 \dots 4,0 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання, $Re > 10^5$).

Розв'язання зазначеного кола питань потребує наявності обґрунтованих результатів теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на дослідження процесів зовнішнього нагріву, займання та розвитку горіння як окремих компонентів, так і їх ущільнених сумішей, що формують основу піротехнічних зарядів сумішей, із визначенням вибухонебезпечних режимів їх перебігу за різних зовнішніх умов.

Проблематиці горіння та вибуху конденсованих піротехнічних систем присвячено значну кількість праць вітчизняних і зарубіжних науковців, серед яких Беліков А. С., Ващенко В. А., Ковалишин В. В., Кириченко О. В., Козяр Н. М., Марич В. М., Діброва О. С., Табаров А. І., Фатєєв В. М., Еллерн М. С., Брауер К. С., Саммерфілд М., Ервін Д. Л., Осборн Ш. Р., Зурн Д. І., Прайс І. В., Сигм Р. К., Гуо Д., Маккела С. та ін. [6, 11, 39, 74, 104, 108]. Узагальнений аналіз результатів їхніх досліджень наведено в наступних підрозділах роботи.

1.2.Сучасний стан досліджень з поведінки компонентів сумішей в умовах зовнішніх термічних дій

Для прогнозування умов передчасного спрацювання зарядів сумішей в умовах зовнішніх термічних дій першочергове значення має дослідження поведінки їх компонентів за підвищених температур нагріву. Зокрема, необхідними є відомості про фізико-хімічні властивості фторопластів (див. розділ 2), а також дані про високотемпературне окиснення, займання та горіння частинок металів (Mg, Al) в активних газоподібних середовищах. На сьогодні ці дані містяться у великій кількості довідників, монографій і наукових публікацій [1, 10, 4 – 6, 11, 24, 28, 39, 51, 55, 56, 59 – 61, 63 – 66, 69, 71, 77, 83, 85, 104, 108, 115 – 118, 130 – 133, 144, 148, 152 – 154, 157 – 159, 163], що значно ускладнює їх оперативне використання як упорядкованої керованої бази даних щодо властивостей компонентів сумішей в умовах зовнішнього нагріву. У зв'язку з цим нижче наведено результати систематизації та узагальненого аналізу зазначених відомостей з позицій виявлення загальних закономірностей перебігу відповідних процесів за підвищених температур нагріву, сукупність яких може бути використана для оцінювання пожежонебезпечних властивостей виробів із зарядами сумішей.

Особливу увагу в роботі приділено процесам високотемпературного окиснення, займання та горіння металевих паливних в активних газоподібних середовищах. Установлено, що за температур, характерних для k -фази процесу горіння зарядів сумішей, основним активним газоподібним продуктом термічного розкладання досліджуваних оксидів металів є кисень. У зв'язку з цим подальший розгляд присвячено результатам досліджень процесів окиснення, займання та горіння частинок магнію й алюмінію за підвищених температур у середовищі як чистого кисню, так і газових сумішей, що містять кисень у поєднанні з іншими компонентами (зокрема в повітрі, до складу якого входять O_2 , N_2 , Ar та CO_2 , при цьому вміст кисню становить приблизно 21 %).

Результати експериментальних досліджень процесу окиснення магнію свідчать, що в сухому кисні за температур 575...773 К реалізується лінійний закон окиснення. При цьому температурна залежність константи окиснення ($кг/(м^2 \cdot год)$) описується відповідним рівнянням:

$$K_n = 1,99 \cdot 10^3 \exp\left(\frac{-50500}{RT}\right). \quad (1.1)$$

Підвищення температури нагріву до 848 К зумовлює зростання швидкості окиснення, однак сам характер процесу при цьому залишається лінійним. У разі окиснення в повітряному середовищі на кривій залежності маси від часу фіксується наявність інкубаційного періоду та двох лінійних ділянок. Значення енергії активації, аналогічно до випадку окиснення в кисні, становить 211595 Дж/моль (рис. 1.9). При цьому сформована пориста оксидна плівка представлена добре сформованими кристалами кубічної форми, розміри яких зменшуються зі зростанням температури окиснення. Встановлено, що плівка утворена дрібнодисперсними неорієнтованими кристалами MgO . За температур, вищих за 848 К, унаслідок інтенсивного випаровування магнію процес окиснення переходить у парову фазу та супроводжується займанням із виділенням диму, що складається з частинок MgO .

Дослідження окиснення магнію в повітрі та у вологому кисні за температур 673...803 К показали, що після завершення інкубаційного періоду процес перебігає за лінійним законом. Водночас швидкість окиснення магнієвої стрічки в повітрі при температурі 803 К виявилася утричі вищою, ніж у середовищі вологого повітря, що пояснюється формуванням у другому випадку гідроксиду Mg, який характеризується більшим об'ємним відношенням порівняно з MgO.

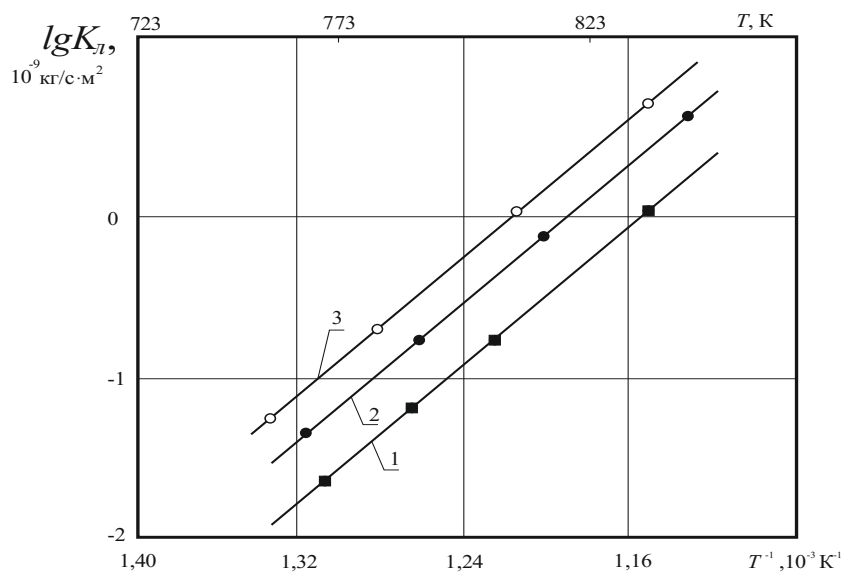


Рисунок 1.9 – Вплив температури на швидкість окиснення Mg у кисні і на повітрі: 1 – швидкість окиснення прокатаного магнію в чистому кисні; 2, 3 – швидкість окиснення прокатаного магнію в сухому повітрі (2 – в початковий момент, 3 – після довгої витримки); ■, ●, ○ – експериментальні точки.

Експериментальні дослідження процесу окиснення магнію в сухому та вологому кисні ($p_{\text{H}_2\text{O}} = 1175,72 \text{ Па}$) за температур 773...833 К показали, що в обох середовищах реакція перебігає за лінійним законом. При цьому наявність парів води суттєво інтенсифікує процес окиснення. Значення енергії активації при окисненні в сухому кисні становить 200785 Дж/моль, тоді як у вологому кисні воно зменшується до 172418 Дж/моль. Додаткові дослідження виконувалися в інтервалі температур 623...873 К у середовищі сухого кисню та кисню, насиченого вологою, за різних значень точки роси: 265,2; 273; 298; 308 К. На всіх окиснювальних кривих спостерігався

інкубаційний період. У разі окиснення в сухому O_2 за температур 798 К і вище друга лінійна ділянка кривої характеризувався більшим нахилом.

Присутність водяної пари істотно впливає на захисні властивості оксидної плівки. Зокрема, знижується температура, за якої плівка втрачає захисну здатність, скорочується тривалість інкубаційного періоду, підвищується швидкість окиснення на лінійній ділянці кінетичної кривої та прискорюється формування другої прямолінійної ділянки. Як видно з рис. 1.10, зі зростанням вмісту парів H_2O спостерігається зменшення енергії активації процесу.

Водночас встановлено суттєвий вплив стану поверхні магнію на кінетику його окиснення. Разом із тим підтверджено, що в умовах лінійного закону окиснення реалізується динамічна рівновага, за якої швидкість росту захисної оксидної плівки врівноважується швидкістю утворення в ній тріщин. Зростання швидкості окиснення у вологому кисні пояснюється проникненням гідроксильних іонів у структуру захисної плівки.

Окиснення полірованих монокристалів магнію в температурному інтервалі 673...713 К відбувається за параболічним законом, що характеризується відносно низькою енергією активації — 37710 Дж/моль. Процес окиснення магнію в повітряному середовищі за своїм характером є близьким до окиснення в кисні. За низьких температур (до 473 К) сформована оксидна плівка зберігає захисні властивості.

У ході досліджень встановлено, що за підвищених температур нагріву (понад 673 К) процес окиснення магнію підпорядковується лінійному закону. Водночас за температури 623 К швидкість окиснення Mg у повітрі має параболічний характер і описується рівнянням $q^2 = K\tau$ ($q = \frac{d(\Delta m)}{dt}$) (рис. 1.11). Значення K (кг/м²·с) — маса кисню або металу, який прореагував за час τ .

При цьому при температурі вище 673 К параболічний закон окиснення переходить у лінійний: $q = K_\tau \tau$. Залежність константи K_τ від температури показана на рис. 1.12.

Рівняння константи представлено у вигляді:

$$K_n = 68,83 \cdot \exp\left(-\frac{23550}{RT}\right); (T = 673 \dots 833 \text{ K}). \quad (1.2)$$

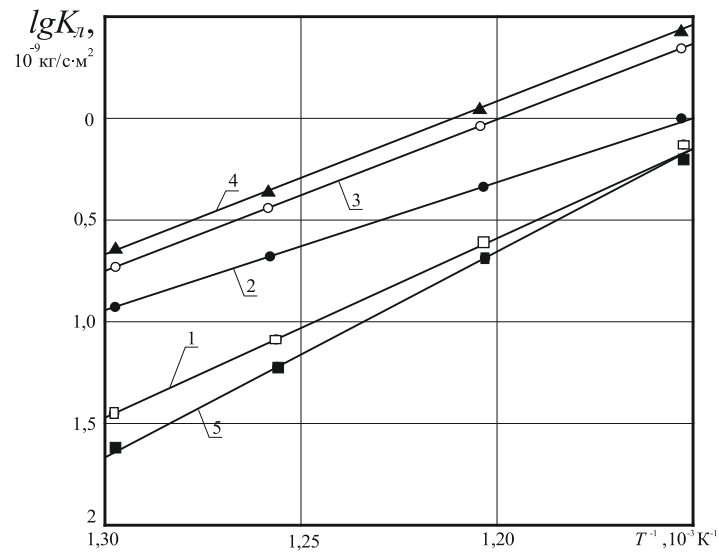


Рисунок 1.10 – Швидкість окиснення Mg в кисні, насиченому парами води (1 – 4), та в сухому кисні (5). Температура, К: 1) 265,2; 2) 273; 3) 298; 4) 308; 5) 773 – 848; ▲, ●, ○, ■, □ – експериментальні точки.

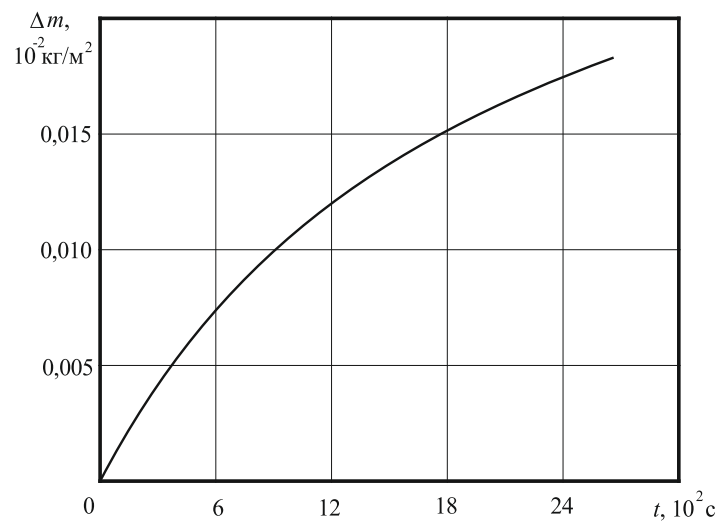


Рисунок 1.11 – Збільшення маси Δm при окисненні Mg у повітрі при $T = 623 \text{ K}$.

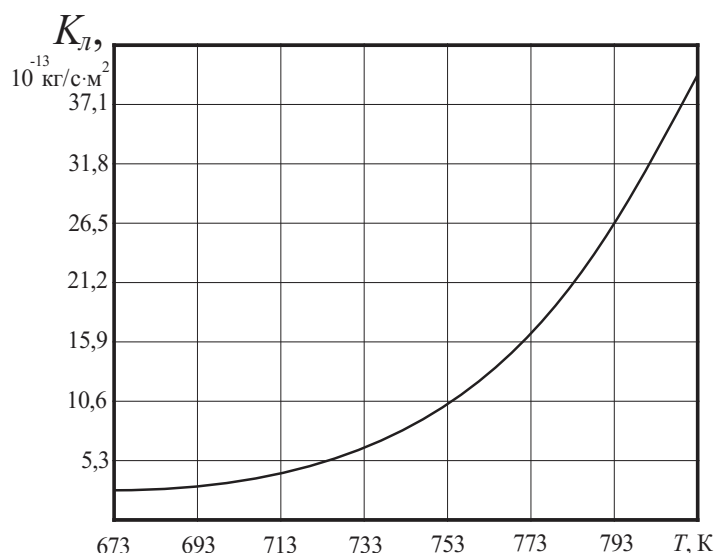


Рисунок 1.12 – Вплив температури на константу швидкості окиснення Mg.

Параболічне зростання оксидної плівки при 623 K пояснюється тим, що оксидна плівка – суцільна і має захисні властивості; процес окиснення лімітується дифузією реагентів під плівку. Захисні властивості MgO при низьких температурах, в свою чергу, пояснюються явищем псевдоморфізації. Первинна оксидна плівка на Mg має гексагональну структуру, яка є кристалографічним продовженням решітки магнію. Цим пояснюють суцільність плівки. Однак, з ростом плівки розбіжності в геометрії обох решіток стають настільки значними, що внаслідок внутрішніх зусиль плівка руйнується і перетворюється на звичайний фазовий окисел кубічної структури. При зважуванні зразків магнію (99,9 %) в атмосфері повітря був встановлений лінійний закон окиснення при температурах 833 K, 873 K та 898 K. При температурах 833 K та 873 K швидкість окиснення складала відповідно $1,08 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ та $4,67 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Встановлено, що в сухому повітрі при 623 K та 673 K окиснення йде дуже слабо і плівка має захисні якості. З підвищенням температури до 773 K реакція прискорювалась, але процес не стабілізувався. У вологому повітрі (очищеному від вуглецю, точка роси 298 K) окиснення Mg при 623 K йде так само, як і у сухому повітрі (рис. 1.13). Вище 623 K спостерігається або лінійний закон окиснення, або закон із зростаючою

швидкістю та інкубаційним періодом. Приріст зразка значно вищий, ніж у сухому повітрі. Це свідчить про значне відновлення парів води металів. В ході окиснення при 773 К спостерігалось випаровування парів Mg через оксидну плівку.

Шляхом обробки дослідних даних з кінетичних кривих окиснення магнію у передспалахний період у окиснювальних газових середовищах отримано наступний вираз для константи швидкості окиснення (за масою):

$$K=2\cdot 10^{32}\cdot C_{O_2}^{0,5}\cdot \rho_{ок}^{0,5}\cdot e^{\frac{142600}{RT}}, \text{ с}^{-1}, \quad (1.3)$$

де $C_{O_2}^{0,5}$ – відносна масова концентрація кисню; $\rho_{ок}$ – густина середовища.

Слід відмітити, що вирази типу (1.3) властиві також й іншим металам (алюмінію, цирконію, титану та ін.), але з іншими константами.

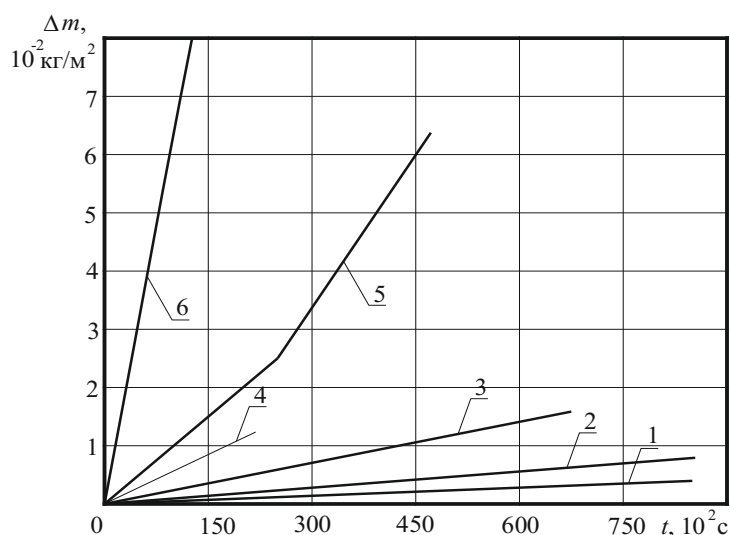


Рисунок 1.13 – Окиснення Mg у вологому повітрі при температурі, К: 1) 623; 2) 653; 3) 673; 4) 698; 5) 723; 6) 773.

Займання магнію. З огляду на високу хімічну активність і здатність до інтенсивного випаровування вже за порівняно невисоких температур (до 423 К), магній відноситься до групи найбільш легкозаймистих металів. Його займання в повітряному середовищі можливе навіть у вигляді масивних шматків або пластин за температур 873...923 К. Важливою особливістю є те, що магній здатний окиснюватися не лише в газових середовищах, що

містять молекули або атоми кисню у вільному стані. Окиснення Mg проходить і в ряді газів, у яких кисень зв'язаний (CO_2 , H_2O тощо).

Установлено, що займання магнієвих стрічок у сумішах кисню з аргоном за умов електронагріву має парофазний характер. Під час експериментів використовували горизонтально розташовані стрічки шириною $2,9 \cdot 10^{-3}$ м, довжиною $8 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-1}$ м і товщиною близько 150 мкм, які розміщувалися між електродами. У процесі займання навколо стрічки формувалося тороподібне парофазне полум'я, поширення якого вздовж зразка спричиняло займання всієї стрічки. Початок процесу відбувався за температур середовища, істотно нижчих за температуру плавлення магнію, при цьому інтенсивність світіння полум'я досягала максимального значення менш ніж за 10 мс. Характер займання практично не залежав від тиску та концентрації кисню. Було встановлено, що початковий етап займання частинок Mg має не дифузійний, а гетерогенний механізм, зумовлений перебігом хімічних реакцій на поверхні частинки. Внаслідок екзотермічного ефекту температура частинки зростає до рівня, за якого починається інтенсивне випаровування металу з подальшим формуванням дифузійного полум'я.

Дослідження показали, що температура займання одиночних частинок магнію в повітрі з діаметром 15...55 мкм перебуває в межах 923...953 К і зростає зі зменшенням розміру частинок. Водночас за підвищення концентрації частинок Mg спостерігається зворотна залежність, що пояснюється зменшенням тепловтрат від внутрішніх джерел. Температурні умови займання магнію в кисневому середовищі суттєво залежать від тиску.

Так, за атмосферного тиску температура займання становить близько 896 К, а зі зростанням тиску вона підвищується і за тиску 10^6 Па досягає 918 К. Для відносно великих сферичних частинок магнію в кисні експериментально отримані значення температур займання, наведені в табл. 1.3.

На рис. 1.14 наведено експериментальні дані щодо температур займання частинок магнію в повітряному середовищі.

Таблиця 1.3 – Температура займання частинок Mg, K

δ , мкм	520	1000	1470
T_z (21 % O ₂)	903	898	896
T_z (1 % O ₂)	925	916	913

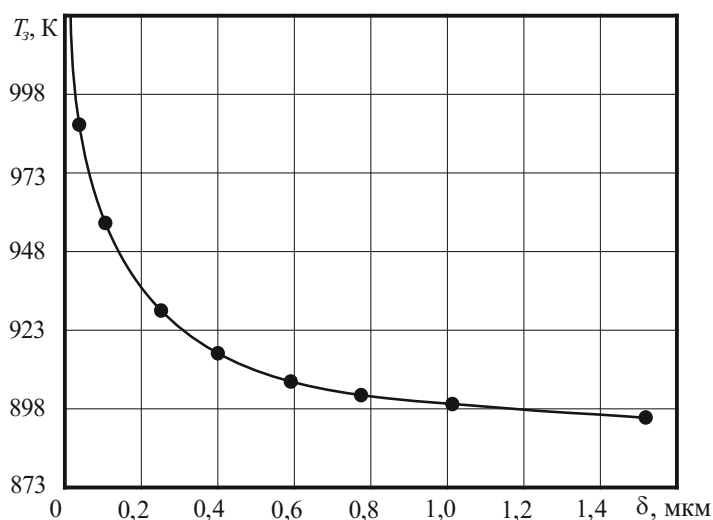


Рисунок 1.14 – Температура займання частинок магнію у повітрі при тиску 10^5 Па: ● – експериментальні точки.

Узагальнення результатів численних досліджень свідчить, що процес займання Mg відбувається за температурних умов, за яких оксидна плівка на поверхні частинок залишається у твердому стані. Зокрема, для магнію значення критерію Піллінга–Бедворса є меншим за одиницю, унаслідок чого сформована оксидна плівка має крихкий характер і не забезпечує ефективних захисних властивостей. За цих умов інтенсивність окиснення визначається швидкістю перебігу гетерогенної хімічної реакції.

Водночас під крихким шаром основної маси оксиду на поверхні частинки формується тонкий металевий прошарок магнію, відбувається дифузія окиснювача. Саме це і обмежує швидкість окиснення частинок Mg у момент їх займання в активному газофазному середовищі.

Експериментальні дослідження займання стаціонарно закріплених сферичних частинок магнію (активністю не менше 99 %) діаметром 100...1000 мкм засвідчили, що в усіх досліджуваних середовищах (повітря, суміш кисню з аргоном) процес займання має виражений гетерогенний характер. Ініціюванню займання передуює реакція, яка проходить на поверхні частинки. У випадку займання магнієвих частинок у повітряному середовищі або в киснево-аргоновій суміші процеси окиснення та займання перебігають рівномірно по всій поверхні частинки. При цьому займання відбувається за температур, що перевищують температуру плавлення магнію $T_{пл}$ (920...970 K), а сконденсований оксид Mg за таких умов формує пористу плівку.

Утворювана внаслідок нагріву суміш парів магнію з окиснювачем навколишнього середовища запалюється від розігрітої частинки, що спричиняє формування симетричного сферичного фронту полум'я — зони інтенсивної взаємодії парів Mg з киснем, яка з часом розширюється. Таким чином, займання магнію є нестационарним процесом, для якого характерний перехід реакції з поверхні частинки у зовнішній об'єм. Тривалість формування зони світіння для частинок діаметром 100...1000 мкм становить 0,1...1 мс; зокрема, для частинок розміром 250 мкм індукційний період дорівнює $\tau_i = 0,8$ мс.

Горіння магнію. Магній відноситься до металів із високою пружністю пари, тому процес горіння його частинок має парофазний характер, що підтверджується експериментально (див. розділ 2). Встановлено, що частинки магнію, які горять у насиченому киснем середовищі, оточені хмарою розжарених оксидів. На фотографіях треки частинок з розміром, меншим 44 мкм, видимі як яскраві розмиті прямі лінії; для великих частинок характерні спіральні ламані траєкторії. Наявність парофазного полум'я відмічена і при горінні магнієвих стрічок в окиснювальному середовищі — суміші кисню з аргоном.

На рис. 1.15 наведені експериментальні точки, які визначають залежність відносного часу горіння в суміші $O_2 + N_2$ (по відношенню до часу горіння у повітрі) від мольного вмісту кисню. Із цих даних видно, що з підвищенням вмісту кисню швидкість горіння магнію зростає.

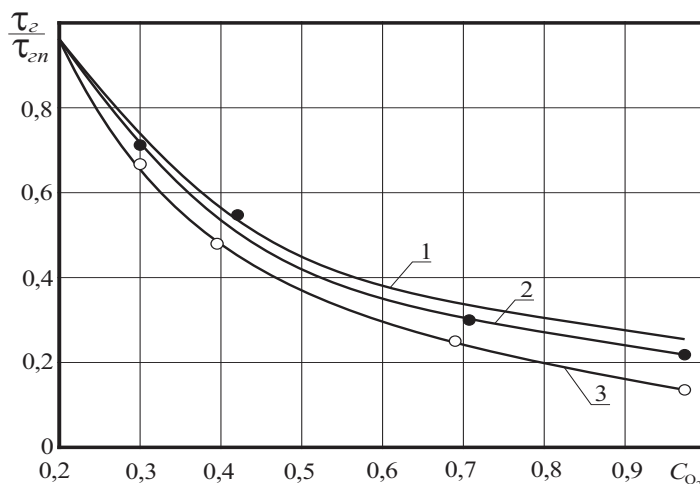


Рисунок 1.15 – Залежність τ_2/τ_{2n} від C_{O_2} при горінні частинки магнію в суміші $O_2 + N_2$: 1, 2, 3 – залежності з урахуванням випаровування оксиду для частинок $\delta_k = 50, 100$ та 500 мкм (відповідно); $\circ, \bullet$ – експериментальні точки.

Встановлено, що час горіння частинок магнію при атмосферному тиску в повітрі і сумішах кисню з інертними газами, як правило, пропорційний квадрату їх початкового діаметра. Для частинок неправильної форми (з відношенням лінійних розмірів понад 3) ця залежність порушується, тому що частинки згорали, не встигаючи розплавитися. Швидкість горіння Mg в кисні більша, ніж у повітрі та сумішах $2O_2 + 8Ar$ та $2O_2 + 8He$. При цьому швидкість горіння магнію в суміші кисню з аргоном вища, ніж у повітрі, і нижча, ніж у суміші кисню з гелієм. На основі цього зроблено висновок, що у чистому кисні швидкість реакції визначається швидкістю випаровування магнію, а при горінні у повітрі і в сумішах O_2 з інертними газами – швидкістю дифузії кисню.

При спалюванні частинок магнію у повітрі виявлено, що швидкість видимого горіння дрібних (10...100 мкм) частинок магнію в діапазоні

1123...1223 К практично не залежить від температури; при подальшому підвищенні температури швидкість горіння зростає. При спалахуванні відмічені факти роздрібнення частинок.

Можливість роздрібнення пов'язується зі швидкістю нагрівання частинок – чим вище температура середовища, тим більша можливість роздрібнення. Роздрібнення при запаленні відзначається також у водяній парі. Це явище вносить непевність у задачу пошуку емпіричної залежності часу горіння від діаметра частинок; проте експериментальні дані вказують на квадратичний зв'язок максимального часу горіння з діаметром частинки ($\tau_2 = k \cdot \delta_{k0}^2$). Обробка експериментальних даних дозволила одержати для визначення константи k емпіричну залежність:

$$\frac{k}{k^*} = \frac{Nu \cdot \ln(1 + \frac{q}{l} n_{ок1})}{1 + (\frac{P}{P^*})^x}, \quad (1.4)$$

де k^* , P^* , x – константи; q – теплота реакції окиснювання, віднесена до маси окиснювача; l – теплота випаровування металу; $n_{ок1}$ – відносний масовий вміст окиснювача у середовищі. При обчисленні Nu за характерний розмір прийнято діаметр частинки. Для кисню q приймалося рівним $46,9 \cdot 10^3$ кДж/кг, для водяної пари – $q_{en} = 28,1 \cdot 10^3$ кДж/кг. Величина l для магнію дорівнює $5,4 \cdot 10^3$ кДж/кг.

Для значних частинок магнію в кисневмісному середовищі $k^* = 0,7 \cdot 10^6$ с/м² при $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па; $x = 0$. Для дрібних частинок у водяній парі (383...393 К) $k^* = 0,95 \cdot 10^6$ с/м² при $P = 2,1 \cdot 10^5$ Па, $x = 0,3$. Для значних частинок у водяній парі $k^* = 1,75 \cdot 10^6$ с/м² при $P = 4,75 \cdot 10^{-2}$ Па; $x = 0,25$.

Швидкісна кінозйомка горіння підвішених сферичних частинок Mg у нерухомому середовищі повітря та суміші кисню з аргоном показує, що після займання метал міститься в центрі сферичної, майже однорідної за структурою, зони свічення, яка складається із сукупності великого числа світних цівок. Ці цівки утворюються, очевидно, при згоранні парів металу, які витікають через пори оксидної оболонки. Замість тонкого і чітко

обкресленого фронту полум'я, характерного для ламінарного горіння крапель однофракційних рідких вуглеводних палив у режимі молекулярної дифузії, зона свічення в даному випадку має розмиті (із зовнішнього боку) контури і значну товщину. Зрозуміло, що при такій структурі зони свічення визначення положення фронту горіння утруднене і певною мірою умовне.

Тривалий час після спалахування геометричні розміри зони свічення та частинки, яка розміщується в її центрі, не змінюються. Проте частинка до спалахування за формою сферична, у процесі горіння, як правило, приймає неправильну форму. Інтенсивність світлового випромінювання поверхні частинки в повітрі і суміші $O_2 + Ar$ (при концентрації O_2 в суміші, близькій до його концентрації в повітрі) менша, ніж у зони свічення, що, очевидно, обумовлено згорянням значної частки металу в паровій фазі. З часом інтенсивність випромінювання зони свічення не змінюється і збільшення концентрації оксиду магнію в зоні свічення не спостерігається.

Частинки Mg , які виносяться із зони свічення в оточуючий простір, за розміром не перевищують 1 мкм.

Сталість інтенсивності випромінювання зони свічення та її геометричних розмірів свідчить про сталість режиму горіння частинки. Радіус зони свічення залежить від концентрації кисню; із збільшенням концентрації кисню відношення радіуса зони свічення до початкового радіуса частинки $\frac{r_c}{r_0}$ зростає (рис. 1.16).

Середнє значення $\frac{r_c}{r_0}$ при горінні Mg у повітрі при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па складає 4,15 (змінюється в межах 3,6...4,7). З підвищенням змісту кисню інтенсивність випромінювання поверхні частинки росте і при парціальному тиску кисню $0,5 \cdot 10^5$ Па стає порівнянною з випромінюванням зони свічення.

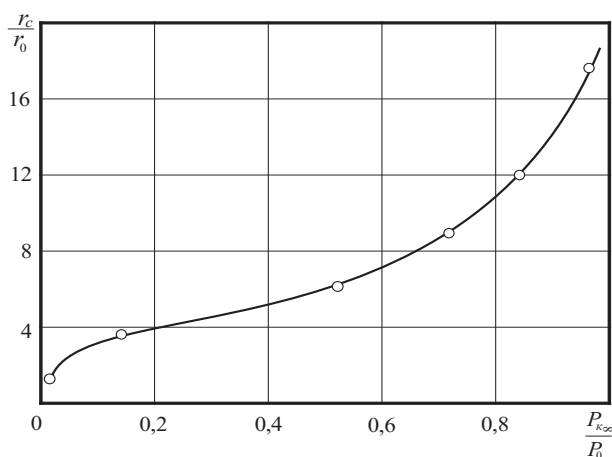


Рисунок 1.16 – Залежність відношення радіуса зони свічення до початкового радіуса частинки від концентрації кисню в суміші аргон – кисень при атмосферному тиску: $\circ$ – експериментальні точки.

Процес горіння частинки магнію закінчується нестационарним, за тривалістю значно більш коротким процесом загасання. Він характеризується зменшенням радіуса зони свічення до розміру оксидної оболонки. При цьому в зоні свічення виникають неоднорідності у вигляді легко помітних окремих цівок парів магнію, які горять.

На поверхні частинки збільшується кількість осередків горіння (ділянок із підвищеною інтенсивністю свічення). Відбувається зміна геометричної форми і зменшення розмірів оксидної оболонки, обумовлене, очевидно, її плавленням. Частинка магнію, що утворюється, деякий час після закінчення горіння має досить велике світлове випромінювання.

Відношення середнього радіуса оксидної оболонки, яка утворюється, до радіуса вихідної частинки в середньому звичайно дорівнює 0,75. Але при односторонньому підпалюванні частинки і несиметричному горінні це відношення складає 1,25.

При високих концентраціях кисню в суміші можливе розщеплення частинки, яка горить, на декілька частин (звичайно 3...5).

Показано, що залежність часу горіння частинок Mg у повітрі від їх початкових діаметрів при симетричному і несиметричному горінні (тиск – атмосферний) має вигляд:

$$\tau_z = 1,0 \cdot \delta_0^2 - \text{при симетричному горінні}; \quad (1.5)$$

$$\tau_z = 2,7 \cdot \delta_0^2 - \text{при несиметричному горінні}. \quad (1.6)$$

При горінні частинок магнію в суміші кисень – аргон для часу несиметричного горіння отримана емпірична формула:

$$\tau_z = \frac{5,6 \cdot 10^5 \cdot \delta_0^2}{\left(\frac{P_K}{P_0}\right)^{1,07}}, \quad (1.7)$$

де P_0 – загальний тиск суміші; P_K – парціальний тиск кисню; τ_z (с); δ_0 (мкм).

При симетричному горінні коефіцієнт k в законі $\tau_z = k \cdot \delta_0^2$ змінюється обернено пропорційно відношенню $\frac{P_{K\infty}}{P_0}$ (рис 1.17).

Таким чином, розмір показника ступеня n при спалюванні магнію в нерухомому повітрі і в суміші кисень – аргон не залежить від вмісту кисню в навколишньому середовищі і від характеру горіння – симетричного або несиметричного.

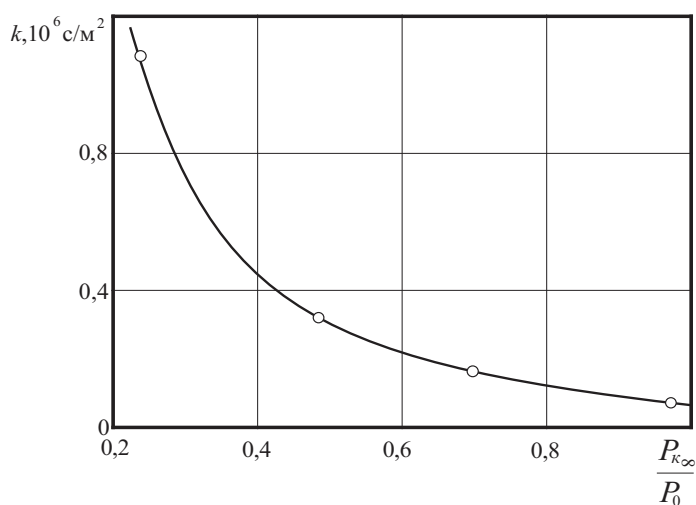


Рисунок 1.17 – Залежність константи k часу горіння частинок Mg від концентрації кисню в суміші аргон – кисень при атмосферному тиску: $\circ$ – експериментальні точки.

При спалюванні магнію у повітрі (при підвищеному тиску) встановлено, що із зростанням тиску характер горіння частинок змінюється – з'являються хаотичні пульсації світлового випромінювання, час горіння частинок помітно зменшується (рис. 1.18).

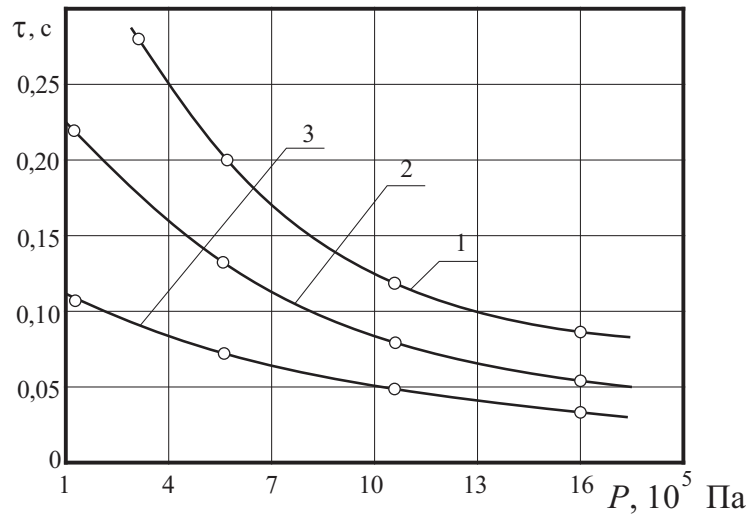


Рисунок 1.18 – Залежність часу горіння частинок магнію у повітрі від тиску:
 1 – частинки діаметром 400 мкм; 2 – частинки діаметром 300 мкм;
 3 – частинки діаметром 200 мкм; ○ – експериментальні точки.

При цьому змінюється в законі горіння $\tau_2 = k \cdot d_0^n$ коефіцієнт k та показник ступеня n (рис. 1.19, 1.20). Підпалювання частинок було несиметричним, частинки у процесі горіння перебували в контакті з нагрівальним елементом.

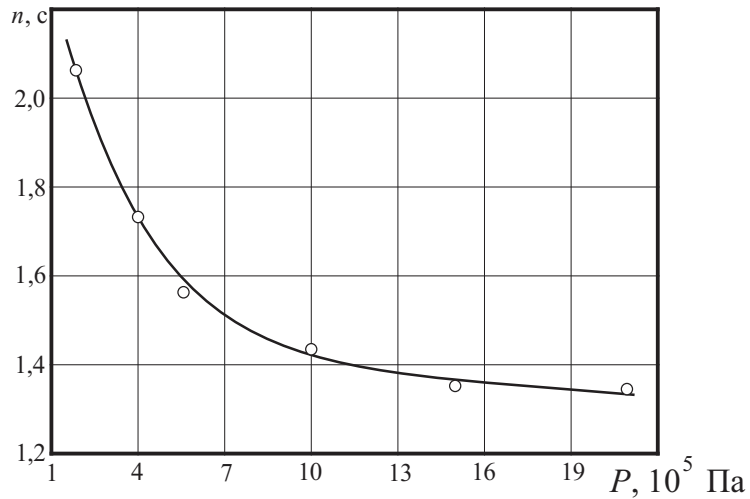


Рисунок 1.19 — Залежність показника ступеня n від тиску при горінні частинок Mg у повітрі: ○ – експериментальні точки.

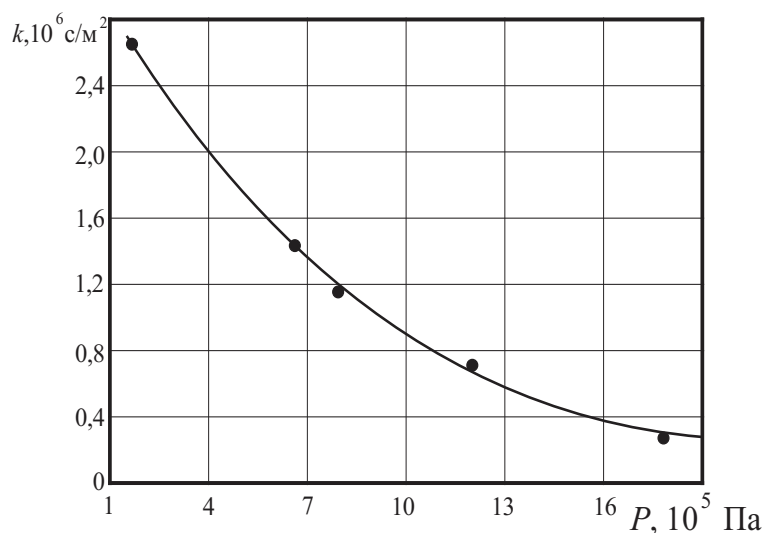


Рисунок 1.20 – Залежність константи часу горіння k від тиску при горінні частинок Mg у повітрі: ● – експериментальні точки.

Таким чином, механізм горіння частинок магнію в повітрі та в суміші кисню з аргонем істотно відрізняється від механізму горіння крапель рідких вуглеводнів. Моменту займання Mg передують оксидні реакції на поверхні частинок; при цьому утворюється тверда пориста оксидна плівка. У процесі згоряння пориста оболонка забезпечує усталеність полум'я в оточуючому частинку просторі.

Досліди дозволили встановити й інші особливості процесу горіння частинок магнію. Якщо побудувати залежність відносного часу горіння $\frac{\tau_z}{\delta_0^2}$ (константи k) від відносного розміру зони свічення (рис. 1.21), то легко встановити, що константа k сильно зменшується при зростанні концентрації кисню до 45 % (за об'ємом) і слабо змінюється при її подальшому підвищенні. Сильна залежність константи часу горіння від радіуса зони свічення вказує на те, що реакції, тепло яких визначає швидкість випаровування магнію, проходять у газовій фазі. При концентраціях кисню вищих 45 % константа часу горіння стає слабо залежною від розміру зони свічення, хоча вплив концентрації кисню на час горіння залишається сильним.

Відзначене вище підвищення інтенсивності випромінювання оксидної оболонки із збільшенням концентрації O_2 (вище 45 %) свідчить про те, що реакції, які визначають швидкість випаровування металу, проходять на поверхні оксидної оболонки або у її порах.

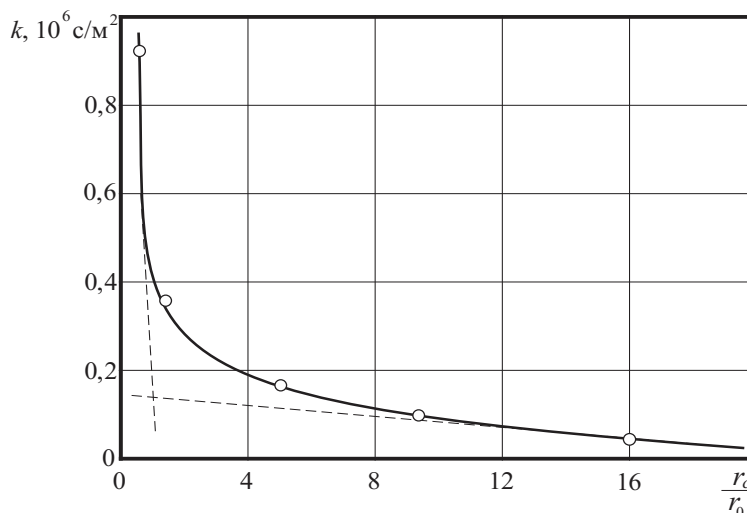


Рисунок 1.21 – Залежність константи часу горіння k частинок магнію від відношення $\frac{r_c}{r_0}$ при атмосферному тиску: $\circ$ – експериментальні точки.

В оксидній оболонці, крім дрібних пор, міститься деяка кількість значних отворів. У силу цього поверхня дифузійного фронту горіння може бути перекручена цівками парів магнію, які витікають. Це призводить до того, що оточуюче частинку полум'я за своєю структурою починає нагадувати заворожений турбулентний потік. При цьому взаємодія парів магнію з киснем відбувається в умовах ускладненого ламінарного фронту і подібна процесу горіння заморожених турбулентних молів. Як і при молекулярній дифузії, перенос тепла до краплі магнію, яка випаровується та знаходиться в пористій оксидній оболонці, відбувається шляхом теплопровідності.

При горінні частинок металів у полум'ї твердих піротехнічних палив вони перебувають у потоці, що рухається, маючи запізнення за швидкістю відносно газу. Тому великий інтерес становлять експерименти з спалювання нерухомих магнієвих часток, що обдуваються газовим потоком із заданою

швидкістю. Частинка Mg діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м або $4,75 \cdot 10^{-3}$ м, підвішена на молібденовій або вольфрамовій нитці, попередньо розігрівалася бунзенівським пальником до температури плавлення, а потім піддавалася впливу газового потоку (суміш $O_2 + N_2$). Температура потоку складала 290...773 К, швидкість обдуву 2...10 м/с. Час горіння визначався за секундоміром і за допомогою фотоелемента. З рис. 1.22 – 1.24 видно, що із збільшенням швидкості обдування та вмісту кисню в суміші швидкість горіння зростає; при підвищенні температури потоку швидкість горіння зменшується.

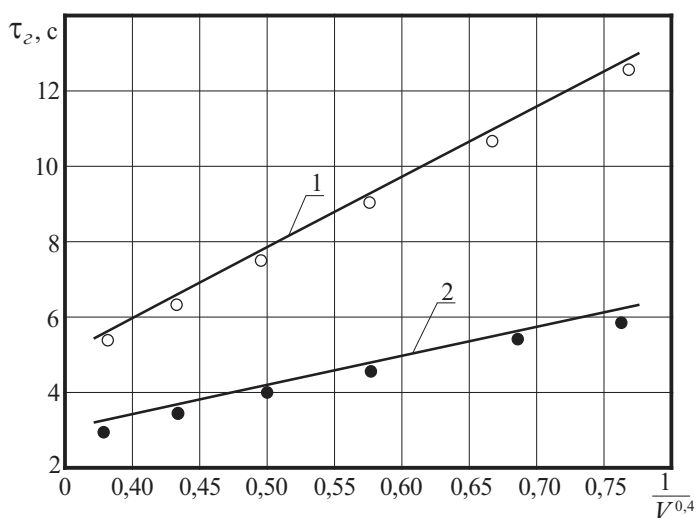


Рисунок 1.22 — Залежність τ_2 частинок Mg від швидкості потоку повітря, що витікає, при $T_0 = 290$ К (V — у м/с): 1 — частинки діаметром $4,75 \cdot 10^{-3}$ м; 2 — частинки діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м; ○, ● — експериментальні точки.

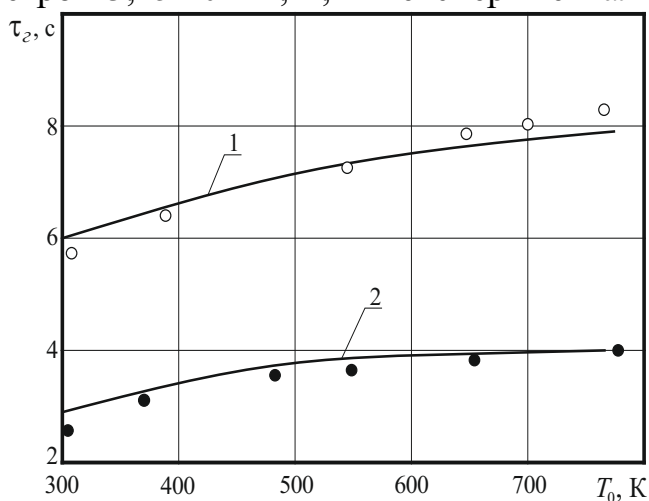


Рисунок 1.23 — Залежність τ_2 від температури потоку повітря ($V = 10$ м/с): 1 — частинки діаметром $4,75 \cdot 10^{-3}$ м; 2 — частинки діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м; ○, ● — експериментальні точки.

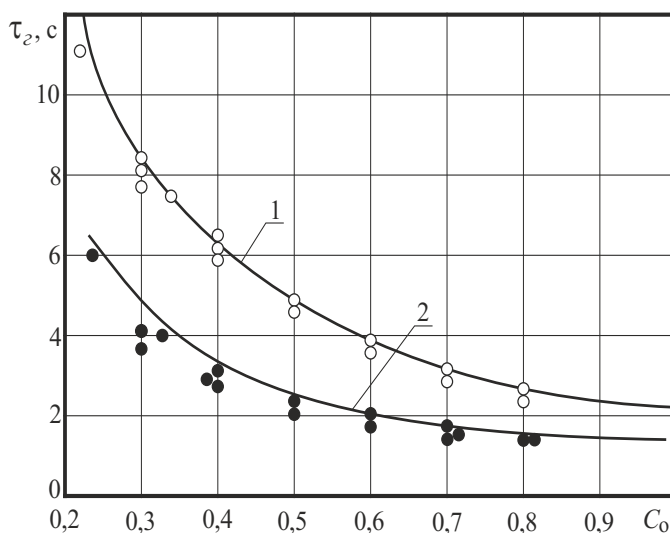


Рисунок 1.24 – Залежність τ_2 від вмісту O_2 в суміші $O_2 + N_2$ ($T_0 = 290$ К, $V = 2$ м/с): 1 – частинки діаметром $4,75 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – частинки діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні точки.

Окиснення алюмінію. При температурах до 573 К у кисні товщина оксидної плівки на Al не перевищує $200 \cdot 10^{-10}$ м, а при 773...873 К товщина плівки досягає приблизно $2000 \cdot 10^{-10}$ м, потім окиснення практично припиняється. Встановлено, що в інтервалі температур 623...748 К реакція окиснення алюмінію йде по параболічному закону ($K_0 = 2 \dots 7,5 \cdot 10^{-6}$ кг²·м⁻⁴·с⁻¹, $E = 95,5$ кДж/моль), а у інтервалі 773...823 К – по лінійному. Показано, що у інтервалі температур 673...973 К з'являється γ -Al₂O₃. Однак, якщо плівка відділена від підкладки, то перехід у γ -Al₂O₃ починається при більш високих температурах (порядку 973 К). Встановлено, що оксидні плівки на алюмінії складаються з двох шарів. Внутрішній шар, що прилягає до металу, компактний. Товщина його залежить, у основному, від температури. Зовнішній шар, навпаки, пористий; його товщина залежить від тривалості реакції та вологості навколишньої атмосфери.

Невелика витримка при низьких та середніх температурах ($T \leq 773$ К) призводить до утворення аморфного оксиду. При збільшенні витримки при середніх температурах, а також при невеликих витримках з високою температурою спостерігається часткова кристалізація. Тривале окиснення

при середніх та високих температурах веде до повної кристалізації. Це пояснює хід кривих, отриманих при 748 К та 773 К (рис. 1.25).

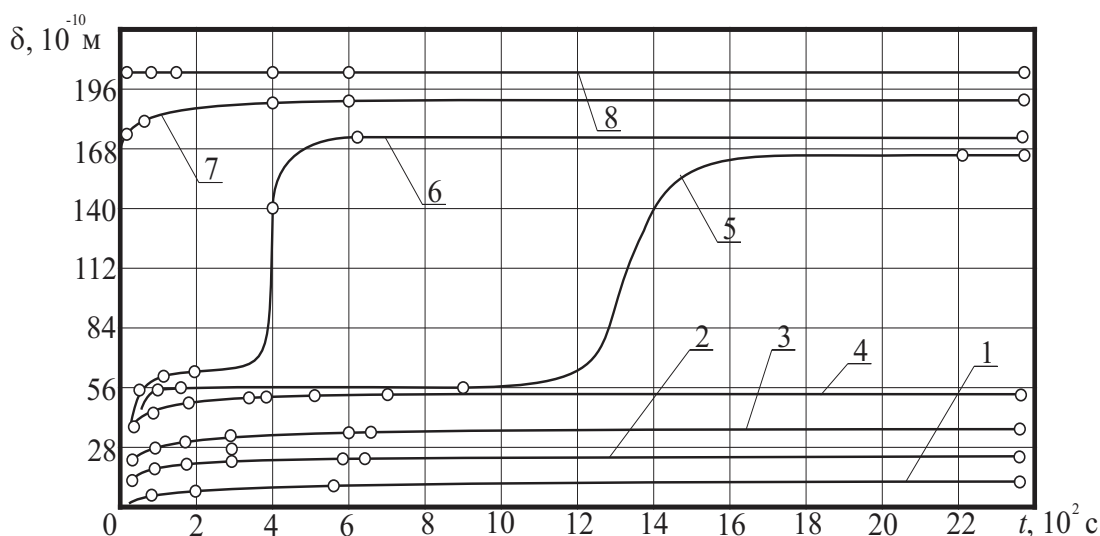


Рисунок 1.25 – Кінетика окиснення алюмінію у кисні при різних температурах: 1 – 348 К; 2 – 473 К; 3 – 573 К; 4 – 723 К; 5 – 748 К; 6 – 773 К; 7 – 823 К; 8 – 873 К; ○ – експериментальні точки.

Нижня площадка відповідає утворенню аморфної плівки, верхня – кристалічного оксиду. При дослідженні процесу окиснення алюмінію чистоти 99,99 % у температурному інтервалі 723...923 К при тривалості експериментів $1,08 \cdot 10^4 \dots 2,88 \cdot 10^4$ с знайдено, що криві окиснення мають здатність до насичення, тим більш явну, чим вище температура. Окиснення на початковій ділянці успішно описується параболічною закономірністю з константою, яка не залежить від тиску кисню. На більш пізніших стадіях швидкість окиснення швидко зменшується, а маса оксиду на зразку прямує до граничного значення (за виключенням 923 К, де швидкість на кінцевій ділянці після попереднього зменшення залишалася сталою):

$$K_n = 5 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{35500}{RT}\right), \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^4 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.8)$$

На підставі аналізу експериментальних досліджень структури оксидної плівки на поверхні алюмінію за різних температурних умов, а також з урахуванням наведених вище кривих окиснення, було зроблено висновок про наявність процесів кристалізації первинної аморфної оксидної плівки.

Результатом цих перетворень є зменшення дифузійної проникності оксиду та, відповідно, зниження швидкості окиснювальних процесів. Для експериментальної перевірки цього положення були проведені дослідження окиснення зразків із проміжним вакуумним відпалом, які повністю підтвердили факт поступового зменшення проникності оксидної плівки з часом.

Згідно з отриманими експериментальними даними з окиснення рідкого алюмінію на повітрі в діапазоні температур 953...1173 К при витримці $1,08 \cdot 10^4 \dots 2,16 \cdot 10^4$ с окиснення підпорядковується параболічному закону. Температурна залежність константи параболічного окиснення визначається значенням $K_0 = 2,51 \cdot 10^{-14} \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^{-4} \cdot \text{с}^{-1}$; теплота реакції при цьому склала $Q = 257,7 \text{ кДж/моль}$. При переході алюмінію з твердого у рідкий стан якої-небудь стрибкоподібної зміни швидкості окиснення не спостерігається. Її значення при температурах 953 К та 913 К і при однакових витримках відрізняються на невелику величину. При температурах 1273 К спостерігається різке зниження швидкості окиснення (значення константи швидкості K приблизно у 5 разів більше її значення, прийнятого з параболічного закону, ґрунтованого на експериментальних даних та екстрапольованого до 1273 К) – до $6,98 \cdot 10^{-9} \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^{-4} \cdot \text{с}^{-1}$ (замість $1,42 \cdot 10^{-9} \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^{-4} \cdot \text{с}^{-1}$). Підвищення захисної здатності оксидної плівки при 1273 К пояснюється зміною її структури – переходом $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ у $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Візуально, оксидна плівка, що утворилася на поверхні Al при 1273 К, здається більш світлою та густою, ніж плівка, яка отримана при 1173 К. У початковий період ($1,8 \cdot 10^3 \dots 1,08 \cdot 10^4$ с) окиснення йде із значно більшою швидкістю, ніж при параболічному законі (рис. 1.26). Досліджено, що в діапазоні низькотемпературного окиснення (723...923 К) криві окиснення добре описуються функцією переміщення межі, яка є розв'язком дифузійного рівняння з рухомою межею у припущенні про те, що коефіцієнт дифузії D у шарі з координатою x :

$$D_x = (D_0 - D_\infty) \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + D_\infty, \quad (1.9)$$

де $t = \int_x^\zeta \frac{dx'}{V}$; D_0 та D_∞ – коефіцієнти дифузії аморфної та кристалічної модифікації оксиду відповідно; τ_1 – характерний час переходу з аморфної у кристалічну модифікацію, що залежить від температури:

$$\tau_1 = 10^{-7} \exp\left(\frac{4000}{RT}\right), \text{ с}; \quad (1.10)$$

ζ – координата рухомої межі; t – час, який пройшов з моменту, коли межа мала координату x ; V – швидкість переміщення рухомої межі.

Окиснення на цій ділянці описується параболічним законом з константою, що не залежить від тиску кисню:

$$K_n = 2 \cdot 10^{-4} \exp\left(-\frac{3000}{RT}\right), \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^{-4} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (1.11)$$

Окиснення лімітується дифузією кисню по аніонним вакансіям. В діапазоні 1123...1573 К окиснення контролюється дифузією алюмінію через плівку кристалічного оксиду; це підтверджується залежністю параболічної константи окиснення від тиску кисню:

$$K_n = 2,5 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,45} \cdot \exp\left(-\frac{100000}{RT}\right), \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^{-4} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1.12)$$

При температурі вище 1273 К відбувається значне зниження швидкості окиснення; залежність коефіцієнта дифузії від часу:

$$D(x) = D_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (1.13)$$

що пов'язано з переходом $\gamma - \alpha$ у оксидній плівці. Характерний час τ_2 переходу $\gamma - \alpha$ визначається по формулі:

$$\tau_2 = 5,5 \cdot 10^{-16} \exp\left(\frac{100000}{RT}\right), \text{ с}. \quad (1.14)$$

Експерименти, що проведені при температурах 1573...1973 К показали, що в цьому діапазоні суцільність оксидної плівки порушується та процес окиснення різко прискорюється.

Займання алюмінію. Встановлено, що процесу займання частинок алюмінію передують певні структурно-фазові перетворення в оксидній плівці, яка первинно покриває їх поверхню. До таких перетворень,

насамперед, належить розтріскування оксидної плівки внаслідок нагріву частинки, що зумовлено значною різницею коефіцієнтів термічного розширення: коефіцієнт термічного розширення Al_2O_3 приблизно утричі менший, ніж у алюмінію. Утворені тріщини заповнюються металом, який отримує безпосередній доступ до окиснювального середовища, що суттєво інтенсифікує процес окиснення. Імовірність розтріскування оксидних оболонок зростає зі збільшенням швидкості нагріву частинок.

Другим фактором, що сприяє підвищенню швидкості окиснення частинок алюмінію, є плавлення оксидної плівки. Цей процес супроводжується різким зменшенням її дифузійного опору для потоку газоподібного окиснювача, що, у свою чергу, суттєво прискорює займання частинок.

Третім можливим механізмом, який реалізується під час займання частинок і крапель алюмінію, є хімічна реакція взаємодії між самим алюмінієм та оксидом, що його покриває.

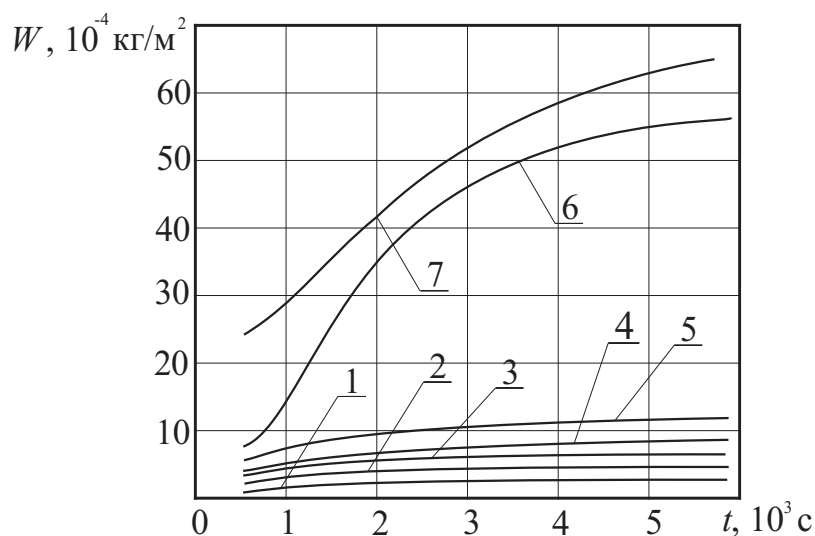


Рисунок 1.26 –Графіки окиснення твердого та рідкого алюмінію: 1 – 913 К; 2 – 953 К; 3 – 973 К; 4 – 1023 К; 5 – 1073 К; 6 – 1173 К; 7 – 1273 К.

У результаті проведених досліджень встановлено, що в усіх випадках займання алюмінію відбувається за температур, які перевищують температуру його плавлення (933 К). У газовому середовищі, сформованому під час горіння сумішей пропан–кисень–азот, займання частинок алюмінію

розміром до 100 мкм за часу їх перебування в полум'ї понад 20...35 мс відбувалося за температур, близьких до температури плавлення оксиду алюмінію.

Зі зростанням надлишку кисню спостерігалось певне, проте незначне, зниження температурної межі займання алюмінію, яка при цьому практично не залежала від вологості навколишнього середовища. Водночас вплив розміру частинок на температуру середовища, за якої фіксувалося займання, не виявлений.

Отримані експериментальні результати щодо визначення температури займання T_z для частинок алюмінію розміром 35...45 мкм описуються наступною залежністю:

$$T_{пл} - T_z = A \cdot C_{ок}^{0,41}, \quad (1.15)$$

де $T_{пл}$ – температура плавлення оксидної плівки, $C_{ок}$ – концентрація кисню, A – коефіцієнт пропорційності.

Разом із тим результати експериментальних досліджень показали, що нерухомі частинки алюмінію, які піддавалися нагріванню в повітряному середовищі та у водяній парі, не зазнавали займання аж до температури 2100 К. Водночас у структурі твердих частинок фіксувалися істотні зміни, зокрема відбувалося розтріскування оксидної плівки з подальшим формуванням характерних швів унаслідок окиснення активного металу, який проникав у тріщини. Тривале витримання таких частинок за температури 2100 К не супроводжувалося помітною зміною їхніх геометричних розмірів.

Запалювання частинок у повітрі реалізовувалося в паровій фазі, при цьому інтенсивність світної зони наростала поступово. У разі нагрівання краплі алюмінію в інертному середовищі та подальшої швидкої заміни інертного середовища на кисень процес займання спостерігався за температури краплі близько 1273 К. Дослідження займання частинок алюмінію розміром до 50 мкм у сумішах кисню з аргоном і азотом показали,

що температура займання залежить як від діаметра частинок, так й від вмісту кисню в газовому середовищі (рис. 1.27).

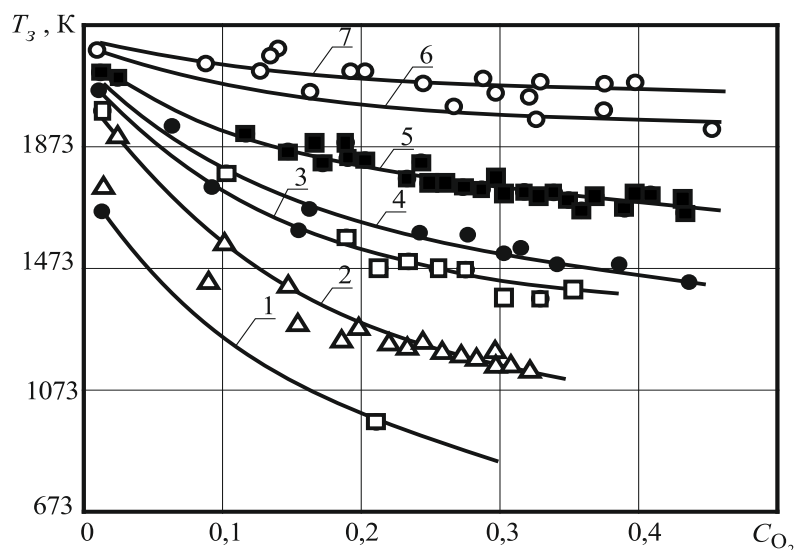


Рисунок 1.27 – Залежність температури займання частинок алюмінію від відносного вмісту кисню у навколишньому середовищі: 1 – $d_m = 70$ мкм; 2 – $d_m = 60$ мкм; 3 – $d_m = 50$ мкм; 4 – $d_m = 40$ мкм; 5 – $d_m = 30$ мкм; 6 – $d_m = 20$ мкм; 7 – $d_m = 10$ мкм; ■, □, ●, ○, Δ – експериментальні точки.

Горіння частинок алюмінію. Встановлено, що процес горіння частинок металевих палих включає ряд швидкоплинних явищ, при яких відбувається плавлення та випаровування пального та оксиду, дифузія кисню, реакція окислення металу у газовій та конденсованій фазах, теплообмін шляхом теплопровідності, конвекції, випромінювання.

По багаточисельним спостереженням, поверхня частинок алюмінію, що горять, знаходить у розплавленому стані. Діаметр зони свічення залежить від складу навколишнього середовища. У середовищі, багатому на кисень та у такому, що не містить пари H_2O або H_2 , ширина зони свічення у 2,5...3,5 разу більше діаметра частинки. У випадку присутності пари води або водню зона свічення звужується до 1,5...2 діаметрів частинки. Частинки алюмінію при горінні часто обертаються.

Встановлено, що оксид алюмінію при горінні алюмінієвих частинок утворюється у вигляді вельми дрібних (субдисперсних) частинок розмірами порядку мікрону та менше, тобто значно менше вихідних частинок алюмінію; при цьому дрібні частинки Al_2O_3 утворюються на протязі усього процесу горіння. Спостерігається також розщеплення (фрагментація) частинок алюмінію, що горять, як у полум'ї газових горілок, так й у продуктах згорання сумішевих палив. Наявність ефекту дроблення у полум'ї горілок пов'язана із вмістом кисню у газовому середовищі та її температурою (рис. 1.28). Однак, як впливає з висновків та узагальнень, зроблених рядом дослідників, явище фрагментації характерно, головним чином, для експериментів з спалюванням алюмінію у горілках-пристроях, що генерують газовий струмінь із змінною по довжині температурою. Фрагментація виникає при попаданні частинок, що горять, з зони високих температур у зону більш низьких. В умовах згорання твердих металізованих палив (ТМП) при тисках $2 \dots 5 \cdot 10^6$ Па фрагментація відбувається вельми рідко.

Встановлено, що при горінні частинок алюмінію у полум'ї горілок, що генерують вельми різноманітний за хімічним складом газ, можливе утворення порожнистих оксидних сферичних оболонок, що містять у деяких випадках в середині частинку металу, що не згорів. Це явище відмічається й при горінні алюмінію у ТМП. При підвищенні температури кількість порожнистих оксидних сфер у продуктах згорання зростає.

Розміри частинок оксиду, утворених при горінні ТМП, залежать від концентрації алюмінію, зовнішнього тиску та змінюються у процесі руху по елементам газодинамічного тракту (канал заряду, щілинний компенсатор, сопло) за рахунок коагуляції та дроблення при зіткненнях.

Типова залежність розподілу частинок оксиду за розмірами у продуктах згорання ТМП має несиметричну форму, показану на рис. 1.29.

Середній розмір δ_{32} частинок Al_2O_3 після виходу з соплу ракетного двигуна ТМП, виміряний спектрофотометричним методом та методом відбору продуктів згорання у посудину, склав 1...2 мкм.

Згідно отриманим даним, при горінні палива, що містить 12 % алюмінію, 19 % поліуретанової зв'язки та 69 % перхлорату амонію, середні розміри частинок Al_2O_3 складали: при тиску $3,4 \cdot 10^6$ Па $\delta_n = 0,588$ мкм, $\delta_v = 2,39$ мкм; при тиску $1,03 \cdot 10^6$ Па $\delta_n = 0,185$ мкм, $\delta_v = 0,79$ мкм. Тут δ_n – середній розмір рахункового розподілу ($\delta_n = \frac{\sum n_i \delta_i}{\sum n_i}$), δ_v – середній діаметр об'ємного розподілу (δ_{43}).

Спектрографічний аналіз газоподібних продуктів згорання алюмінію у продуктах згорання ТМП вказує на наявність парів Al, AlO та Al_2O . Це свідчить про можливість парофазного горіння алюмінію, що протікає через проміжні стадії, які включають утворення субоксидів.

Температура зони горіння алюмінієвих частинок у кисні, що виміряна оптичним пірометром, лежить в межах 3200...3880 К.

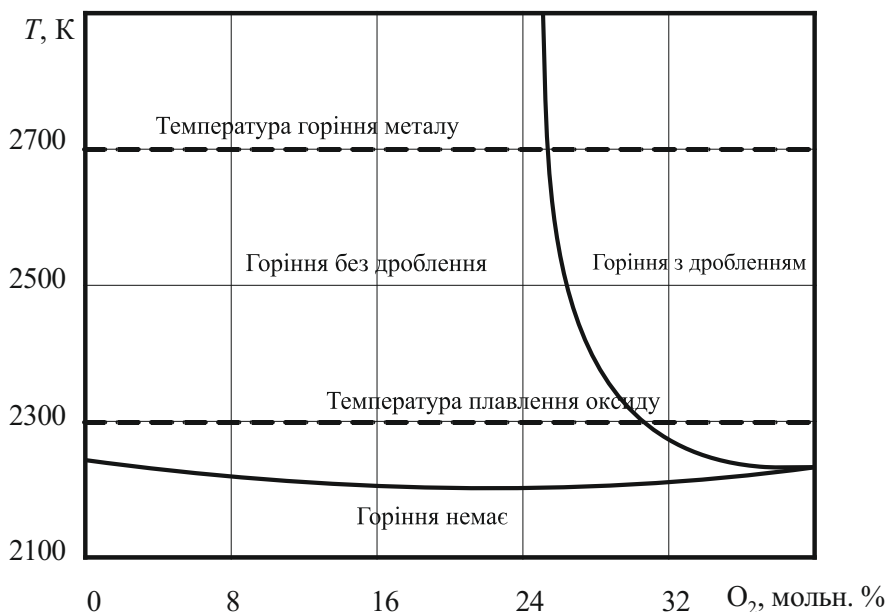


Рисунок 1.28 – Межі горіння з дробленням для частинки Al діаметром 35 мкм, які визначені експериментально.

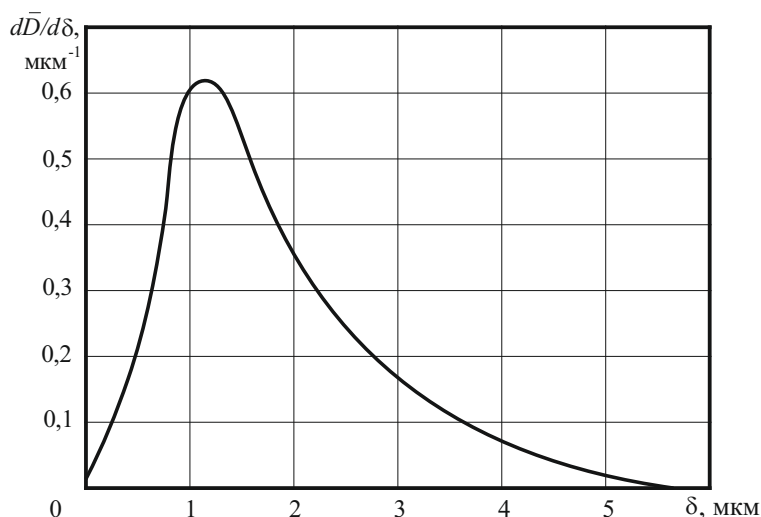


Рисунок 1.29 – Об'ємний розподіл частинок Al_2O_3 за розмірами у продуктах згоряння ТМП.

Температура зони горіння алюмінієвих частинок у продуктах згоряння ТМП, що визначена спектрально-оптичним методом, складає $T = 3500 \dots 3750$ К при $\delta_{\text{Al}} = 40 \dots 70$ мкм. Таким чином, експериментально визначена температура горіння близька до температури кипіння оксиду алюмінію.

За результатами рентгеноструктурного аналізу кристалічна структура оксиду при $T > 973$ К представляє собою $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд). При цьому γ -модифікація, що у деяких випадках виявляється у продуктах згорання, є наслідком різкого охолодження оксиду в процесі відбору. Час горіння алюмінієвих частинок у полум'ї горілки, що працює на суміші пропан – кисень – азот, пропорційний діаметру частинки у ступені 1,5. Час горіння τ_2 частинок діаметром 23 мкм та 50 мкм складав відповідно 4 мс та 13 мс. При цьому навколишній газ мав температуру 2510 К та містив 5,5 % вільного O_2 .

Встановлено, що час горіння суттєво залежить від вмісту вільного кисню та пари води. При додаванні пари води (з 0,5 % до 18,1 %) та одночасному зменшенні вмісту вільного O_2 (з 7,9 % до 5,8 %) час горіння частинок діаметром 35 мкм збільшувався з 6,6 мс до 10,5 мс, а для частинок діаметром 49 мкм – з 12 мс до 19 мс.

З багатьох експериментальних даних випливає, що залежність часу горіння частинок алюмінію від хімічного складу навколишнього середовища є більш сильною, ніж від його температури (із підвищенням концентрації окиснювальних компонентів та температури час горіння зменшується). На основі багаточисельних експериментів із спалювання частинок алюмінію у продуктах згоряння ТМП отримано емпіричну формулу для обчислення часу горіння τ_z (мс) частинки алюмінію діаметром δ (мкм) при тисках вище $2,5 \cdot 10^6$ Па:

$$\tau_z = 0,67 \frac{\delta^{1,5}}{a_k^{0,9}}. \quad (1.16)$$

Параметр a_k виражає відносну концентрацію окислювальних компонентів та обчислюється за формулою:

$$a_k = \frac{n_{O_2} + n_{CO} + n_{CO_2} + \dots}{\sum n_i} \cdot 100\%. \quad (1.17)$$

де n_i – мольна або об'ємна концентрація індивідуальних реагентів.

Встановлено, що час горіння частинок при зміні температури від 2000 до 2900 К практично не змінюється. З підвищенням тиску час горіння частинок спочатку зменшується, а потім залишається практично сталим (за експериментальними даними незалежність τ_z від тиску настає при тисках $2,5 \dots 6 \cdot 10^6$ Па). Залежності $\tau_z = f(P)$ за результатами експериментів показані на рис. 1.30.

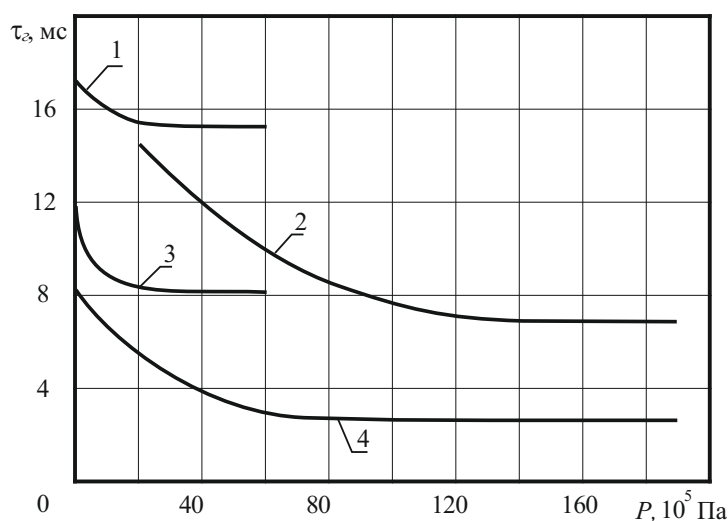


Рисунок 1.30 – Залежності часу горіння τ_z від тиску: 1 – $\delta = 50$ мкм; 2 – $\delta = 30$ мкм; 3 – $\delta = 20$ мкм; 4 – $\delta = 15$ мкм.

Спалювання нерухомих частинок Al у повітряному середовищі при атмосферному тиску (частинка алюмінію підпалювалася частинкою магнію, що горить) показало, що процес горіння характеризується існуванням стаціонарної зони свічення, яка не змінює своїх розмірів майже до моменту повного вигорання частинки. Відношення радіуса зони свічення до початкового радіуса частинки складало 1,6...1,9. Частинка у процесі горіння не змінює свої розмірів, хоча на стадії займання спостерігається незначне її збільшення.

Встановлено, в зоні свічення відбувається утворення дрібних крапель оксиду, які зливаються при зіткненні у повітрі. Максимальні розміри цих крапель – 20 мкм. Залишок, що утворюється після згорання частинки, являє собою порожнисту оболонку, достатньо міцну, яка не містить в середині метал. Свічення оксидного залишку відбувається довгий час. При цьому залежність часу горіння τ_z від початкового діаметра частинки описується емпіричною формулою (τ_z у мс, δ у мкм):

$$\tau_z = 2,76\delta^{1,4}. \quad (1.18)$$

1.3. Огляд та аналіз теоретичних та експериментальних досліджень процесів займання та розвитку горіння піротехнічних металовмісних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій

Визначальними параметрами пожежонебезпечних властивостей виробів, виготовлених на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих піротехнічних сумішей, у разі їх передчасного спрацьовування (зокрема в умовах пожежі на складських об'єктах, під час транспортування за наявності локального нагріву поверхні виробів, а також при їх застосуванні за дії ударних термічних навантажень) є температура продуктів згорання, вміст у них високотемпературного конденсату та швидкість їх горіння. Саме ці параметри в сукупності визначають тривалість спрацьовування зарядів сумішей і характер розвитку процесу горіння за

підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та інших дестабілізуючих чинників. Зазначене обумовлено тим, що в процесі ініціювання та поширення горіння зарядів сумішей формується значна кількість газоподібних і конденсованих продуктів згоряння з високою температурою, причому їх температура та тиск безперервно зростають. Унаслідок цього відбувається інтенсифікація горіння сумішей, що проявляється у суттєвому зростанні швидкості горіння зі збільшенням температури нагріву та зовнішнього тиску, і, як результат, у прискореному руйнуванні виробів з утворенням численних чинників пожежі, небезпечних для навколишніх об'єктів, пускових установок і обслуговуючого персоналу.

У зв'язку з цим принципове значення має встановлення температури та складу продуктів згоряння, а також кінетичних характеристик процесу горіння за вказаних умов. Знання цих параметрів є необхідним для прогнозування тривалості горіння зарядів сумішей залежно від технологічних чинників (співвідношення і дисперсності компонентів, величини добавки органічної речовини, природи металевго пального) та зовнішніх впливів (температури нагріву, тиску навколишнього середовища). Окрім того, це дозволяє визначати області стійкого та стабільного поширення горіння вздовж зарядів сумішей, а також можливі граничні режими його реалізації. Отримані дані створюють підґрунтя для обґрунтованого розрахункового вибору оптимальних режимів згоряння зарядів на стадії проєктування та стендових випробувань виробів, за яких виключається їх руйнування та мінімізується ймовірність виникнення пожежонебезпечних ситуацій під дією зовнішніх термічних факторів.

Теоретичні дослідження процесів горіння піротехнічних сумішей ґрунтується на використанні розрахункових методів визначення основних характеристик горіння конденсованих систем на основі металевих пальних у поєднанні з різними окиснювачами та добавками органічних речовин. До таких характеристик належать температура і склад продуктів згоряння, а також швидкість горіння, що широко застосовується у практиці

проектування виробів із використанням подібних сумішей. Залежно від масової частки металевого пального всі суміші умовно поділяються на системи з його відносно малим вмістом (до 20...30 %), до яких переважно відносять сумішеві тверді палива (СТП), та на суміші з підвищеним вмістом металу (до 70...80 %), що включають різні види піротехнічних композицій, зокрема піротехнічні металізовані суміші на основі фторопластів.

Розрахунок температури та складу продуктів згоряння піротехнічних сумішей термодинамічними методами є надзвичайно складною науково-практичною задачею, що зумовлено змінністю хімічного складу газової фази в процесі горіння, випаровуванням металевих частинок, а також багатостадійним характером перебігу реакцій. Для здійснення таких розрахунків потрібні дані щодо індивідуальні властивості речовин у вихідному стані, механізмів та швидкості хімічних реакцій, інформація про які на теперішній час є неповною. Додаткові труднощі пов'язані з надвисокими температурами та значною хімічною активністю продуктів згоряння, що істотно ускладнює їх пряме вимірювання.

У зв'язку з цим саме термодинамічні методи, які базуються на ідеалізованому описі процесу горіння, залишаються основним інструментом отримання інформації про температуру та склад продуктів згоряння різних типів сумішей. Найбільш ефективно зазначені методи були апробовані при розрахунках температури та складу продуктів згоряння сумішевих твердих палив, які є достатньо добре вивченими та апробовані на практиці [6, 74, 75].

Водночас застосування термодинамічних підходів до піротехнічних сумішей з високою часткою металевого пального виявило їх обмежену точність: зіставлення результатів розрахунків з експериментальними даними свідчить, що розбіжності можуть сягати 20...30 %. Це пояснюється принциповими відмінностями таких сумішей від твердих палив, насамперед високим вмістом металічного пального (до 70...80 %), що зумовлює істотну фазову нерівноважність продуктів згоряння. У роботах [11, 26, 39, 42, 43, 46

– 50, 52 – 54, 57, 58, 62, 82, 104, 105, 108] зазначену особливість було враховано при розробленні удосконалених методів термодинамічних розрахунків, що дозволило зменшити відносну похибку розрахунків до рівня 8...10 %

Сучасний стан математичного моделювання процесів горіння піротехнічних сумішей свідчить про те, що найбільш ґрунтовно в теорії горіння на сьогодні досліджені гомогенні газові суміші, леткі вибухові речовини (ВР), сумішеві тверді палива (СТП), а також піротехнічні нітратно-металеві суміші [6]. При побудові математичних моделей горіння для зазначених систем за основу, як правило, приймається модель Зельдовича–Беляєва, яка на теперішній час вважається однією з найбільш розвинених і узагальнених моделей опису процесу горіння [71].

Математичний опис горіння гомогенних газових сумішей і летких вибухових речовин згідно моделі Зельдовича–Беляєва ґрунтується на уявленні про прогрів реагентів гомогенної газової суміші, що вступають в реакцію за рахунок підведення теплового потоку з області активної хімічної реакції, тобто з фронту горіння. У системі координат, пов'язаної з фронтом горіння, вихідна газова суміш безперервно надходить у зону реакції зі швидкістю, що дорівнює лінійній швидкості горіння, тоді як теплота, що виділяється в результаті хімічних перетворень, переноситься у напрямку, протилежному і передається назустріч потоку.

Подальший аналіз у межах цієї моделі базується на таких припущеннях: як вихідна гомогенна газова суміш, так і продукти згоряння розглядаються як ідеальні гази; теплоперенесення за рахунок випромінювання та тепловтрати в навколишнє середовище не враховуються; коефіцієнти дифузії всіх газових компонентів приймаються однаковими та прирівнюються до коефіцієнта температуропровідності суміші; температурна залежність швидкості хімічної реакції описується ареніусівською залежністю і тепловиділення здійснюється у вузькому інтервалі температур ($\sim RT_z^2/E$) поблизу температури горіння T_z , з рівнянь

теплопровідності та дифузії можна отримати такий вираз для лінійної швидкості горіння:

$$u = Z \cdot \sqrt{n!} \cdot \bar{P}^{\frac{n}{2}-1} \cdot \left(\frac{T_0}{T_c}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot \left(\frac{RT_c^2}{E}\right)^{\frac{n+1}{2}} \cdot \frac{e^{-\frac{E}{2RT_c}}}{(T_c - T_0)^{\frac{n+1}{2}}} \quad (1.19)$$

де Z – передекспонент (м/с); n – порядок реакції; $\bar{P} = \frac{P}{P_a}$ (P – зовнішній тиск; $P_a = 10^5$ Па); T_0 – початкова температура.

Припущення про те, що розглянуте завдання вирішується в стаціонарній одномірній і плоскій постановці, а також без урахування зовнішніх сил є загальними у всіх моделях горіння, що наводяться нижче, і тому при перерахуванні всіх припущень цих моделей спеціально не обмовляються.

В даний час є поки що єдине пряме зіставлення викладеної вище моделі та експерименту на прикладі найпростішої бімолекулярної реакції горіння суміші озону з киснем, механізм якої не змінюється з температурою, кінетика добре вивчена. В результаті було встановлено, що по порядку величини обчислені та виміряні швидкості горіння перебувають у задовільній згоді.

Складність здійснення прямого зіставлення результатів розрахунків і експерименту, а отже, і прогнозування зміни швидкості горіння гомогенних газових сумішей залежно від початкової температури та зовнішнього тиску полягає у високій складності кінетики та механізмів реакцій у зоні фронту полум'я. У цій зоні відбувається значна кількість паралельних реакцій, утворюються проміжні продукти, які активно беруть участь у процесі горіння, що істотно ускладнює порівняння з реакціями в передполум'яній зоні за нижчих температур. Безпосереднє вивчення кінетики та механізмів реакцій за високих температур залишається складним завданням і для більшості горючих газових сумішей поки не розв'язане.

Відхилення від найпростіших кінетичних схем, закладених у модель горіння, а також відсутність достовірних даних про кінетику хімічних

реакцій за високих температур, значно обмежують область застосування кількісних результатів моделі. Проте, якщо кінетика реакцій у фронті полум'я відома або є достатньо простою (наприклад, механізм реакцій слабо залежить від температури), модель дозволяє порівняно легко розраховувати абсолютні значення швидкості горіння, що має велике практичне значення.

Оскільки горіння летких вибухових речовин відбувається в газовій фазі, наведена модель гомогенних газових сумішей може бути повністю застосована для розрахунку швидкості їх горіння. Проте, з тих же причин, що й для гомогенних газових сумішей, пряме порівняння розрахункових та експериментальних даних ускладнене і здійснено лише для найпростішого прикладу – реакції розпаду нітрогліколю. Для залежності швидкості горіння від початкової температури між розрахунком і експериментом спостерігається добра згода, хоча модель не враховує вплив зовнішнього тиску. Порівняння розрахункової залежності швидкості горіння від тиску із експериментальними даними показує, що при підвищених тисках виникають помітні розбіжності. Незважаючи на це, модель горіння дозволяє отримувати практично коректні абсолютні значення швидкості горіння летких ВР із найпростішою або добре вивченою кінетикою реакцій у зоні високих температур.

У моделі горіння сумішевих твердих палив (СТП) Лейпунського-Новожилова приймається наступна схема процесу горіння: газоподібні продукти розкладання окиснювача захоплюють частинки пального у газову фазу, на їх поверхні відбувається хімічна реакція, теплота від якої витрачається на нагрівання газу та газифікацію нових порцій твердого пального.

Основні припущення моделі такі: СТП є механічною сумішшю двох різних за своїми властивостями речовин, одна з яких (що важко газифікується – пальне) вкраплена у вигляді куль певного діаметра d в інше (що легко газифікується – окиснювач); теплоперенесення випромінюванням

та тепловтрати у навколишнє середовище відсутні; горюча суміш є стехіометричною, а хімічна реакція є реакцією першого порядку, причому такою, що з однієї молекули окиснювача виникає одна молекула продукту; тиск у зоні горіння постійний; займання частинки пального відбувається тоді, коли температура навколишнього газу досягає температури спалахування T_c , що визначається зі співвідношення:

$$1 + \frac{RT_c}{E} = \frac{2E}{RT_c \left[\ln(E \cdot q) \cdot Z \cdot d \left(\frac{\rho_0}{R} \cdot T_c^2 \right) \cdot C_2 \cdot D(T_c) \cdot \rho \right]}, \quad (1.20)$$

де Z та q – передекспонент та тепловий ефект реакції; $D(T_c)$ – коефіцієнт дифузії; ρ_0 та ρ – густини окиснювача та газу відповідно; C_2 – теплоємність газу; тепловиділення в конденсованій фазі на поверхні горіння та в газовій фазі з температурою $T < T_c$ відсутня; початкова температура порошу і температура поверхні горіння відповідно дорівнюють 303 К і 573 К.

Шляхом розбивання всієї області горіння на три зони (тверда фаза, де $T_0 \leq T \leq T_n$ (немає виділення тепла); газова фаза, де $T < T_c$ (немає виділення тепла); газова фаза, де $T > T_c$ (є тепловиділення)) і зшивання рішень рівняння теплопровідності для кожної зони на їх межах виходить наступний вираз для лінійної швидкості горіння

$$u = \frac{D}{d} \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot \bar{\chi}(T_c) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^3 \cdot (T_1 - T_c) \cdot V}{C_2 \cdot (T_1 - T_0)^2}}, \quad (1.21)$$

де

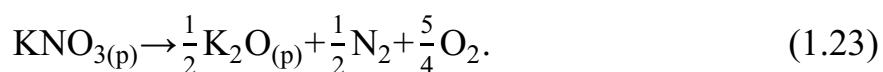
$$\bar{\chi}(T_c) = \frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu_n \left(\frac{T_1 - T_0}{T_1 - T_c} - 1 \right)}; \quad (1.22)$$

μ_0 та μ_n – молекулярні ваги окиснювача та продуктів згоряння; $T_0 = T_n - [C_1 \cdot (T_n - T_0) + L]/C_2$; T_n – температура на поверхні твердої фази; C_1 – питома теплоємність СТП; L – теплота випаровування окиснювача; T_1 – температура горіння СТП (максимальна температура у газовій фазі, яка визначається з рівності $Q = C_1 \cdot (T_n - T_0) + C_2 \cdot (T_1 - T_n)$, де Q – калорійність СТП, а T_0 – його початкова температура); V – об'ємна частка пального у твердому поросі.

Причини суттєвих розбіжностей між розрахунком та експериментом швидкості горіння СТП. Отримані значні розбіжності між розрахунковими та експериментальними значеннями швидкості горіння сумішевих твердих палив (наприклад, чорного пороху), що досягають кількох порядків, пояснюються наступними факторами.

По-перше, для випадку чорного пороху горіння частинок вуглецю розглядається у продуктах повного розкладання нітрату калію (селітри). Як свідчать існуючі експериментальні дані розкладання нітратів лужних металів проходить через кілька стадій: перша стадія ($623 \text{ K} \leq T \leq 923 \text{ K}$) - нітрат калію перетворюється на нітрит калію із виділенням газоподібного кисню ($\text{KNO}_{3(\text{p})} \rightarrow \text{KNO}_{2(\text{p})} + 1/2\text{O}_2$); при підвищенні температури: в газовій фазі (в результаті розкладання нітрату калію) поряд з киснем виділяється азот та його оксиди; високі температури: тільки при $T > 1273 \text{ K}$ відбувається повна термічна дисоціація нітрату калію з утворенням кінцевих продуктів розкладання.

Таким чином, класична термодинамічна модель, що припускає одноетапне повне розкладання нітрату, суттєво спрощує реальні багатоступеневі процеси. Це призводить до значних похибок у розрахунках швидкості горіння, оскільки не враховуються проміжні продукти та етапи виділення кисню, які істотно впливають на локальні температури та концентрації реагентів у зоні горіння:



Отже, у процесі горіння чорного пороху поблизу поверхні пороху горіння частинок вугілля йде в атмосфері чистого кисню, що утворюється під час переходу нітрату у нітрит. Це призводить до зменшення затримки займання, зниження швидкості відтоку газу від поверхні та зменшення витрат на розкладання твердого окиснювача. При розрахунках по моделі допущено дві суттєві неточності: коефіцієнт опору частинок прийнято рівним $C_x = 10$ замість, принаймні, $C_x = 40$ ($Re \leq 0,5$); відношення густини

газу біля поверхні порошу до густини порошу прийняте рівним 10^{-3} замість $1/3500$.

Аналіз процесу термічного розкладання нітрату калію показує, що внаслідок цих спрощень температура поверхні порошу значно занижена.

По-друге, деревне вугілля, що входить до складу чорного порошу, часто ототожнюють із чистим вуглецем. Це некоректне припущення, оскільки деревне вугілля містить значну кількість летких речовин і є значно більш активним паливом. Так, стехіометрична суміш KNO_3 + деревне вугілля здатна до горіння вже при 10^5 Па та кімнатній температурі, тоді як стехіометрична суміш KNO_3 + графіт не здатна до стійкого горіння при $P \leq 10^7$ Па або $T_0 \leq 473$ К.

Нарешті, застосування методики розрахунку затримки спалахування сукупності частинок для обраних під час виведення формули (1.21) значень кінетичних констант ($E = 134$ кДж/моль, $Z = 6 \cdot 10^5$ м/с) та середнього розміру частинок вуглецю $d = 15$ мкм отримуємо (при швидкості горіння порошу $0,5 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-2}$ м/с, що відповідає більш реальній температурі на поверхні розкладання порошу $T_n = 1000$ К) затримку спалахування $\tau_i = 3 \cdot 10^{-4}$ с. Такій затримці при швидкості горіння порошу $0,5 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-2}$ м/с відповідає зміщення частинок на $1,5 \dots 3$ мкм.

Якщо врахувати, що частина затримки займання «спрацьовує», коли частинки ще знаходяться у конденсованій фазі, стає очевидним, що займання частинок пального відбувається безпосередньо на поверхні порошу, а не віддалено від неї, як було прийнято при виведенні формули (1.21).

Таким чином, при виведенні виразу для швидкості горіння сумішевих твердих палив (СТП) були допущені суттєві неточності, які, ймовірно, і призвели до значної розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними.

Моделі горіння піротехнічних металізованих сумішей. На сьогодні досить повно вивчено механізм горіння двокомпонентних сумішей (метал +

нітратовмісний окиснювач), існують окремі дані щодо вивчення механізму горіння трикомпонентних сумішей (метал + нітратовмісний окиснювач + добавка органічної речовини) [6, 11, 15, 25, 27 – 30, 34 – 36, 39, 40, 41, 72, 76, 78, 81, 86, 89, 90, 104, 106, 108], проте повністю відсутні дослідження механізму горіння сумішей метал + фторопласт + добавки органічних речовин.

Внаслідок цього були розроблені математичні моделі для розрахунку швидкості розвитку горіння двокомпонентних сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків).

Для трикомпонентних сумішей (наприклад, $\text{Mg} + \text{NaNO}_3 + \text{парафін}$, стеарин , нафталін або антрацен) в основу моделей горіння покладена розроблена математична модель двокомпонентної суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ із врахуванням кінетики розкладання добавки органічної речовини у к-фазі суміші та результатів термодинамічних розрахунків температури і складу продуктів горіння.

Для розглядуваних піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів математичні моделі розвитку їх горіння у різних зовнішніх умовах ще не розроблені. Це пов'язано з відсутністю достатніх даних про фізико-хімічні процеси у різних зонах горіння сумішей, на основі яких можна було б сформулювати механізм їх горіння.

Наразі результати досліджень механізму горіння двокомпонентних сумішей знаходяться у численних монографіях, наукових статтях та працях, що ускладнює їх практичне використання при виборі найбільш прийнятної математичної моделі для розрахунків впливу різних технологічних чинників на швидкість розвитку їх горіння, зокрема при зовнішніх термічних впливах. Тому нижче наведено систематизацію та аналіз даних щодо теплофізичних та кінематичних характеристик основних зон горіння вказаних сумішей, що дозволяє: сформулювати механізм горіння сумішей у конкретних умовах; побудувати адекватну модель їх горіння для

практичних розрахунків та прогнозування поведінки виробів у бойових та практичних умовах їх застосування.

Систематизація та аналіз механізму горіння двокомпонентних сумішей метал + нітрати лужних та лужноземельних металів. Як зазначалося вище, численні дослідження показали, що механізм горіння розглядуваних сумішей є значно складнішим і менш вивченим, ніж, наприклад, механізм горіння таких широко використовуваних горючих систем, як гомогенні газові суміші, летючі ВР та сумішеві тверді палива (СТП). Це зумовлено складністю та різноманіттю чинників, які визначають швидкість їх горіння.

Для широкого класу гомогенних газових сумішей і летючих ВР була розроблена відома модель горіння Зельдовича-Беляєва [6], яка не лише пояснювала основні закономірності процесу горіння цих систем, але й дозволяла, за відомої кінетики процесу, розраховувати швидкість горіння з достатньою точністю. Для більшості СТП загальноприйнятою є модель горіння Лейпунського-Новожилова, яка також добре узгоджується з експериментальними даними.

Що стосується розглядуваних сумішей, розвиток теоретичних уявлень про процес їх горіння здійснювався, насамперед, на прикладі суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, яка є представником цілого класу сумішей, характерною особливістю яких є наявність на поверхні горіння розплавленого шару, що газифікується.

Загальноприйнятою моделлю горіння сумішевих систем із нелетким паливом та окиснювачем, що газифікується, до яких найближче розглядувана суміш, є модель Лейпунського-Новожилова. Застосування цієї моделі вперше було проведено для горіння ущільнених сумішей із порошків магнію та нітрату натрію. При цьому використовувалась та ж схема процесу горіння, що й у моделі Лейпунського-Новожилова, із припущенням, що в околицях поверхні суміші відведення тепла за рахунок теплопровідності газу значно менше, ніж тепло, що виділяється при горінні частинок магнію.

На основі рівняння теплового балансу к-фази суміші та аналітичного виразу для функції тепловиділення біля поверхні суміші був отриманий вираз для лінійної швидкості горіння, за яким проводились розрахунки.

Зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними показало наступне: розрахункова залежність швидкості горіння від вмісту нітрату натрію значно відрізняється від експериментальних даних, а в області малих значень $\xi_{ок}$ спостерігається пряма суперечність; між розрахунковими та експериментальними даними залежності швидкості горіння від початкової температури досягається задовільна відповідність; залежність швидкості горіння від діаметру частинок магнію, особливо для великих частинок, показує значне розходження між розрахунком та експериментом; розрахункова залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску практично не відображає експериментальні дані, оскільки ця залежність з розрахункової формули не витікає (параметри, що входять в цю формулу або слабо залежать від тиску, або взагалі від нього не залежать), тоді як експеримент демонструє досить сильний вплив тиску на швидкість горіння.

Таким чином, існуючі моделі добре описують загальні закономірності процесу горіння, проте мають суттєві обмеження при прогнозуванні поведінки металізованих сумішей у різних технологічних і бойових умовах.

Знайдені суттєві розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними свідчать про те, що схема Лейпунського-Новожилова у тій формі, в якій вона застосовувалася, не здатна адекватно описати процес горіння розглядуваної суміші.

Подальший розвиток моделі Лейпунського-Новожилова для цієї суміші базується на тих же основних допущеннях, що й у вихідній моделі. Проте, виходячи з рівнянь збереження маси на поверхні суміші та руху частинки магнію, що горить у потоці газоподібних продуктів розкладання окиснювача, було отримано уточнене рівняння для лінійної швидкості горіння:

$$A \cdot u^{1,8} - B \cdot u^{0,8} - C \cdot u - D = 0, \quad (1.24)$$

де A, B, C, D – коефіцієнти, залежні від складу суміші, діаметру частинок магнію, початкової температури суміші і зовнішнього тиску. Зіставлення розрахункових даних по рівнянню (1.24) з експериментальними показало наступне. При зменшенні вмісту нітрату натрію в суміші швидкість горіння спочатку зростає аж до значення $\xi_{ок} = 0,25$, а потім різко знижується. Експериментальні дані демонструють більш плавний характер цієї кривої, при цьому експериментальне і теоретичне значення $\xi_{ок}$, відповідні максимуму швидкості горіння, приблизно однакові. Експериментальні значення швидкості горіння залежать від діаметру частинок магнію дещо слабше, ніж це передбачають розрахунки. Розрахункова залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску (для тиску вище атмосферного) узгоджується з експериментальною, а в області знижених тисків спостерігається розбіжність. Таким чином, найбільш задовільне узгодження між розрахунковими і експериментальними даними спостерігається для залежності швидкості горіння від діаметра частинок магнію і початкової температури суміші. Водночас між розрахунковою і експериментальною залежностями швидкості горіння від вмісту нітрату натрію (особливо в області малих $\xi_{ок}$) і зовнішнього тиску (особливо при малих значеннях P) спостерігаються істотні розбіжності.

Більш обґрунтоване застосування схеми Лейпунського-Новожилова до горіння системи $Mg + NaNO_3$ показує, що процес її горіння загалом відповідає цій схемі. Розбіжності між розрахунковими і експериментальними даними пояснюються наближеністю деяких допущень, використаних при отриманні рівняння (1.24). Зокрема, за температуру поверхні суміші приймалася температура активного перетворення нітрату натрію у нітрит і кисень, яка вважалася постійною та рівною 1000 К. Проте, згідно з експериментальними даними, температура розкладання $NaNO_3$ значно нижча 1000 К і істотно залежить від зовнішнього тиску, таким чином:

$$T_n = A + B \cdot P, \quad (1.25)$$

де A , B – константи, що враховують вміст домішок у нітраті натрію та діапазон зміни тиску.

При температурі 1000 К нітрат натрію розкладається вже не лише на нітрит і кисень. Розкладання на нітрит і кисень відбувається лише до 823 К. Вище цієї температури в конденсованих продуктах з'являється також оксид натрію, а в газовій фазі, крім кисню, – азот. У зв'язку з цим час горіння частинок магнію слід розраховувати в потоці кисню з азотом, а не чистого кисню, як це було зроблено при виведенні рівняння (1.24).

У загальному випадку для розглянутих сумішей існує функціональна залежність $u(T_n)$. Задача розрахунку для сумішей $Mg + NaNO_3$ в математичному вигляді залишається незамкненою, тобто необхідно мати додаткове рівняння для зв'язку u з T_n . При термодинамічних розрахунках температури та складу продуктів згоряння суміші нітрату натрію з магнієм слід також враховувати наявність у продуктах, принаймні, оксидів натрію та азоту. Це свідчить про те, що схема Лейпунського-Новожилова при застосуванні до розглядуваної суміші потребує подальшого розвитку, зокрема шляхом замикання задачі розрахунку горіння додатковим зв'язком, вид якого слід обґрунтувати експериментально.

Уточнення ґрунтуються на аналізі експериментальних даних про фізико-хімічні параметри зон горіння сумішей магнію з нітратом натрію (розглядались газонепроникні суміші з $K_V = 1$; $0,4 < \alpha < 2,0$ (α – коефіцієнт надлишку окиснювача у суміші) і розміром частинок магнію значно менший за товщину зони прогрівання к-фази).

Запропонована схема перетворення початкової суміші у продукти згоряння передбачає стаціонарний, одновимірний процес горіння суміші і протікає у трьох основних зонах: зона I – прогрітий шар в к-фазі суміші, де можна знехтувати хімічними перетвореннями; зона II – реакційна зона к-фази суміші, в якій починається процес інтенсивного розкладання окиснювача та відведення частинок магнію, що спалахують, у газову фазу (г-фазу); зона III – зона тепловиділення г-фази, де дисперговані частинки металевого пального

згорають в потоці продуктів розкладання окиснювача, утворюючи продукти згоряння з температурою T_z .

За цих припущень, а також при відсутності тепловтрат у навколишнє середовище та зовнішніх сил, для розрахунку швидкості горіння сумішей була використана відома у теорії горіння система рівнянь [6, 74]. У цій системі рівнянь T_0 визначалась з умови

$$\psi|_{T=T_n} = \psi_n \approx 1, \quad (1.26)$$

де ψ – ступінь розкладання окиснювача.

Передбачалось, що при $T = T_n$ відбувається повне розкладання окиснювача до газоподібних продуктів. Отже, основне уточнення полягає у тому, що в попередньому підході до розрахунку швидкості горіння сумішей ігнорувалась кінетика розкладання окиснювача у к-фазі, і температура поверхні горіння T_n приймалася постійною та рівною 1000 К. Для наближеного аналітичного визначення теплового потоку q_k із к-фази використовувався відомий метод теплового потоку, а саме: істинне значення теплового потоку із зони тепловиділення г-фази замінюється його середнім значенням для цієї зони:

$$q_k = \lambda_z \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \approx \bar{\lambda}_z \cdot \frac{T_z - T_n}{\Delta x}, \quad (1.27)$$

де $\bar{\lambda}_z$ – коефіцієнти по провідності газу при температурі $\bar{T} = \frac{T_z + T_n}{2}$, Δx – відстань від поверхні горіння до площини, на якій досягається температура T_z (Δx знаходиться з рівняння руху частинки магнію, що горить, в межах зони тепловиділення г-фази; температура T_z і відповідний їй склад продуктів згоряння визначається в результаті термодинамічних розрахунків). За отриманою системою рівнянь були проведені розрахунки залежності швидкості горіння суміші від коефіцієнта надлишку окиснювача, середнього розміру частинок порошку магнію, початкової температури та зовнішнього тиску.

З отриманих розрахункових даних можна підсумувати, що між розрахунком і експериментом, на відміну від розглянутого раніше методу,

спостерігається достатньо добра якісна відповідність до всієї залежності швидкості горіння. Абсолютні значення все ще можуть відрізнятися на 20–30 %, але це значно менше, ніж у попередніх методах. Це є наслідком того, що тепловиділення від згоряючих агломерованих частинок магнію на поверхні горіння не враховується, що занижує розрахункові значення швидкості [74].

Також через обмежений діапазон зміни α та неврахування кінетики термічного розкладання окиснювачів у суміші з металевим пальним даний метод не дозволяє, по-перше, розраховувати вплив на швидкість горіння такого важливого параметра, як дисперсність порошку окиснювача, а, по-друге, розраховувати граничні режими горіння розглядуваної суміші по співвідношенню компонентів (верхня та нижня межі горіння) і вплив на них різних технологічних чинників та параметрів зовнішніх умов. На прикладі сумішей Mg + нітрати лужних та лужноземельних металів, Mg + оксиди металів були уточнені зазначені неточності та методи розрахунку. Це дозволило точність розрахунків щодо швидкості горіння. Відносна похибка зменшилася до 10–12 % замість 20–30 % у попередніх методах.

Для трикомпонентних систем метал (Al, Zr, Mg) + нітратовмісний окиснювач (NaNO_3) + добавка органічної речовини (парафін, стеарин, нафталін, антрацен) були враховані: кінетика термічного розкладання окиснювача та органічної речовини при високих температурах; високотемпературне окиснення та займання і горіння частинок металевого пального на поверхні суміші та у газовій фазі; поведінка частинок металів, що займалися на поверхні горіння, та їх згоряння у вказаних продуктах в зоні полум'я; температура та склад продуктів горіння в кінці зони полум'я. Це дозволило розраховувати залежності швидкості горіння від технологічних параметрів суміші та зовнішніх умов.

Отже, розвиток моделі Лейпунського-Новожилова із врахуванням кінетики окиснювача, теплового потоку та поведінки металевих частинок

дозволив наблизити теоретичні розрахунки до експериментальних даних для дво- та трикомпонентних металізованих піротехнічних сумішей.

Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних результатів засвідчив їх повну якісну узгодженість за наявності незначних кількісних відхилень, відносна похибка яких не перевищує 12–15 %.

Експериментальні дослідження процесів горіння піротехнічних сумішей. Як свідчить практика застосування піротехнічних сумішей у цивільних і військових галузях, рівень їх пожежо- та вибухонебезпечності за різних зовнішніх умов визначається передусім режимами ініціювання та подальшого розвитку процесу горіння, зокрема його стабільністю, згасанням або самоприскоренням, що може переходити у вибух. Ключовою характеристикою, яка визначає зазначені режими, є швидкість горіння, методи вимірювання якої є загальновідомими (див. розділ 2).

Попри значну кількість наукових праць, присвячених експериментальному визначенню швидкості горіння сумішей [6, 11 – 13, 16, 32, 37 – 39, 44, 45, 67 – 70, 73, 79, 84, 87, 104, 108, 124 – 129, 136 – 143, 147, 150, 151, 160 – 164], низка важливих аспектів залишається недостатньо дослідженою, зокрема граничні режими горіння та вплив на них технологічних параметрів і факторів зовнішнього середовища. Це пояснюється значно більшою кількістю чинників, що впливають на процес горіння піротехнічних сумішей порівняно з іншими типами горючих систем, а також складним характером їх взаємодії. Зокрема встановлено, що кожний з цих параметрів впливає на швидкість горіння сумішей не ізольовано від інших, а у тісному зв'язку з ними. Так, наприклад, вид кривої $u(P)$ може істотно змінюватися залежно від коефіцієнта надлишку окиснювача α , а в окремих випадках також від d_m , $d_{ок}$, T_0 та ін. У свою чергу тиск може впливати на криву $u(\alpha)$ та ін.

Водночас і тиск здатний впливати на характер залежності швидкості горіння від складу суміші. Найважливішим параметром, що визначає можливі режими перебігу горіння, є коефіцієнт надлишку окиснювача α .

Поблизу його граничних значень $\alpha_{ВМГ}$ та $\alpha_{НМГ}$ – верхньої та нижньої концентраційних меж горіння – залежно від сукупності зовнішніх і внутрішніх чинників можуть реалізовуватися нестійкі режими, що проявляються або у швидкому згасанні, або у різкому самоприскоренні процесу з переходом у вибух.

Серед усього різноманіття піротехнічних сумішей на сьогодні найбільш ґрунтовно дослідженою є система магній + нітрат натрію, яка протягом багатьох років широко застосовується під час створення піротехнічних виробів різного функціонального призначення.

Саме тому подальший аналіз буде зосереджено на детальному вивченні залежностей $u(T_0)$ та $u(P)$ - швидкості горіння від початкової температури та зовнішнього тиску в широкому діапазоні зміни технологічних параметрів сумішей, що використовуються у піротехнічному виробництві при виготовленні зарядів, оскільки ці залежності мають визначальне значення для забезпечення пожежо- та вибухобезпеки піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термічних впливів.

Залежність швидкості горіння $u(T_0)$. Проведені експериментальні дослідження показують, що швидкість горіння різних систем, у тому числі й піротехнічних сумішей, зазвичай збільшується зі зростанням початкової температури T_0 . Це пояснюється тим, що підвищення температури нагрівання системи зменшує витрати тепла на її розігрів у хвили горіння. Водночас тривалий ізотермічний нагрів або швидке неізотермічне нагрівання системи може спричиняти фізико-хімічні перетворення та саморозігрів, що, у свою чергу, впливає як на швидкість горіння, так і на загальний режим горіння системи.

На практиці вплив початкової температури T_0 на швидкість горіння системи зазвичай характеризують залежністю $u(T_0)$, а величину цієї залежності оцінюють через температурний коефіцієнт $\beta = \frac{\partial \ln u}{\partial T_0}$: чим більше значення β , тим сильніша залежність $u(T_0)$ і, навпаки, зі зменшенням значень β залежність $u(T_0)$ послаблюється (наприклад, для системи $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$

$-\beta = 4,2 \dots 4,5$ ($T_0 = 213 \dots 573$ K), для системи $Ti + NaNO_3 - \beta = 1,1 \dots 1,3$ ($T_0 = 213 \dots 333$ K) та для системи $Ti + Ba(NO_3)_2 - \beta = 1,2 \dots 1,3$ ($T_0 = 213 \dots 333$ K); $\alpha = 1,0$, тиск атмосферний).

З цих даних випливає, що як природа металевого пального, так і природа окиснювача істотно впливають на характер залежності $u(T_0)$. З сумішей металів з окиснювачами, що газифікуються, найбільш докладно вплив початкової температури на швидкість горіння вивчалось для суміші магнію з нітратом натрію. Аналізуючи у відносних координатах ($\bar{u} = u/u_{293}$, де u_{293} – швидкість горіння при $T_0 = 293$ K) експериментальні дані, можна встановити характер впливу різних чинників на залежність $\bar{u}(T_0)$. Зміна дисперсності порошку магнію не змінює характеру залежності $\bar{u}(T_0)$. Для стехіометричної суміші $Mg + NaNO_3$ збільшення розмірів частинок порошку окиснювача призводить до деякого послаблення залежності $\bar{u}(T_0)$ (рис. 1.31). При цьому перехід від менш теплопровідної (паперової) оболонки зразка суміші до більш теплопровідної (мідної) оболонки призводить до послаблення залежності $\bar{u}(T_0)$.

Результати проведених експериментальних досліджень залежності $\bar{u}(T_0)$ в широкому діапазоні зміни температур ($T_0 = 213 \dots 573$ K) та впливу на неї коефіцієнта надлишку окиснювача ($\alpha = 0,2 \dots 3,0$) і зовнішнього тиску $P = 0,1 \dots 25 \cdot 10^6$ Па представлені на рис. 1.32, 1.33 та у табл. 1.4. З рис. 1.32 видно, що з атмосферному тиску збільшення T_0 до 573 K призводить до зростання швидкості горіння, причому зі збільшенням T_0 спостерігається посилення залежності $\bar{u}(T_0)$. Навіть значне збільшення α (від 0,2 до 3,0) слабо відбивається характері залежності $\bar{u}(T_0)$. Збільшення тиску до $2,5 \cdot 10^6$ Па не призводить до зміни загального характеру залежності $\bar{u}(T_0)$, тобто і при підвищеному тиску зі збільшенням T_0 спостерігається зростання швидкості горіння і посилення залежності $\bar{u}(T_0)$ (рис. 1.33). При цьому характер впливу α на зазначену залежність помітніший (табл. 1.4): зі зростанням α величина β зменшується. Вплив же підвищеного тиску на

залежність $\bar{u}(T_0)$ полягає у тому, що при малих α збільшення тиску призводить до збільшення β , а при великих α тиск на величині β позначається слабо.

На рис. 1.34 представлено результати вимірювань швидкості горіння суміші $\text{Mg} + \text{Ф} - 3$ в широкому діапазоні температур. Видно, що зі збільшенням температури швидкість горіння зростає лінійно, причому температурний коефіцієнт β має вельми низькі значення (табл. 1.5) та зменшується при збільшенні α .

Даних щодо впливу інших чинників на залежність $\bar{u}(T_0)$ для розглядуваних сумішей нині немає.

Залежність швидкості горіння $u(P)$. Залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску $u(P)$ є основною для визначення режимів стійкого та стабільного горіння сумішей у різних енергетичних установках, зокрема в камерах згоряння ракетних двигунів, реактивних соплах, а також при загорянні та розвитку горіння в замкнутих металевих оболонках піротехнічних виробів під час їх транспортування та експлуатації. Експериментальні дослідження показують, що швидкість горіння більшості сумішей із збільшенням зовнішнього тиску зростає. Це пояснюється прискоренням хімічних реакцій у газовій фазі та збільшенням загального тепловиділення, що враховується у тепловому балансі конденсованої фази суміші, і в результаті призводить до підвищення швидкості горіння системи. Таблиця 1.4–Значення температурного коефіцієнта $\beta \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$ для сумішей магнію з нітратом натрію (інтервал температур 213...573 К; атмосферний тиск P_a).

α	$P/P_a = 1$	$P/P_a = 250$
0,2	4,48	6,5
0,37	—	5,8
0,6	5,07	—
1,0	4,55	—
1,4	—	5,64
2,0	4,47	—
3,0	4,47	4,40

Таблиця 1.5– Значення температурного коефіцієнта β для різних значень вмісту магнію у суміші $\text{Mg} + \Phi - 3$ (див. рис. 1.35)

Вміст Mg, %	75	60	40
Значення β, K^{-1}			
$\beta \cdot 10^3$	0,9	0,7	0,5

На практиці залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску $u(P)$ часто апроксимується ступеневою функцією $u = u_0 \cdot P^\nu$, яку у літературі прийнято називати законом горіння. Показник ν , так само як і температурний коефіцієнт β , визначає характер залежності $u(P)$: чим більше значення ν , тим сильніша залежність швидкості горіння від тиску $u(P)$.

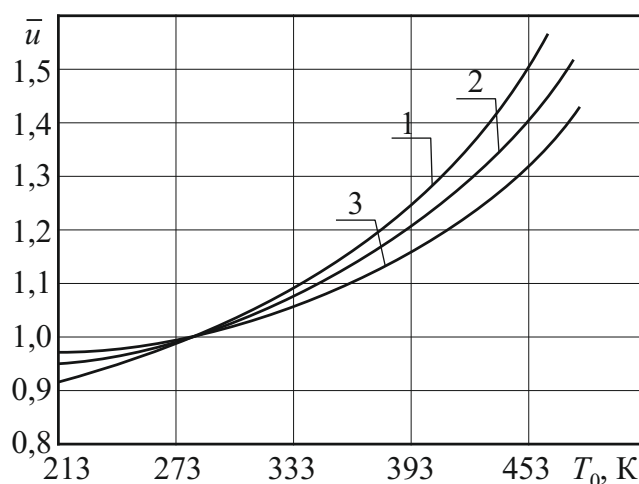
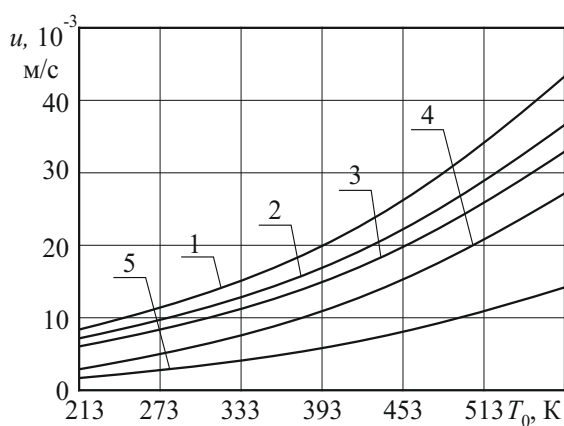
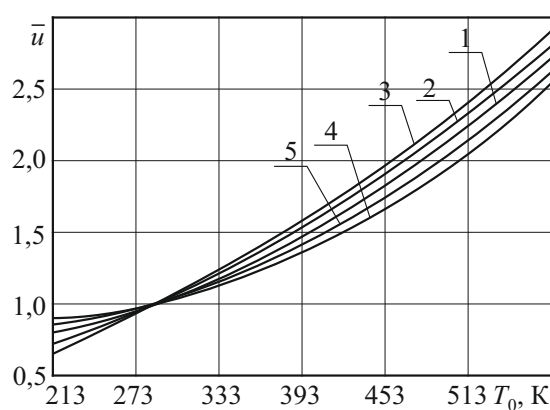


Рисунок 1.31– Вплив дисперсності порошку окиснювача у суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ на залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ від T_0 ($\bar{u} = \frac{u}{u_{T_0=293}}$, де $u_{T_0=293}$ – швидкість горіння суміші при $T_0 = 293 \text{ K}$; $\alpha = 1,0$; МПФ – 3; діаметр зразка $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$): 1 – $d_{\text{ок}} < 56 \text{ мкм}$; 2 – $d_{\text{ок}} = 100 \dots 140 \text{ мкм}$; 3 – $d_{\text{ок}} = 280 \dots 300 \text{ мкм}$.

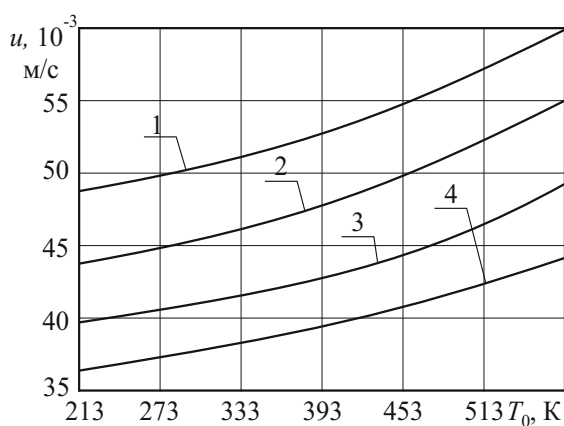


а)

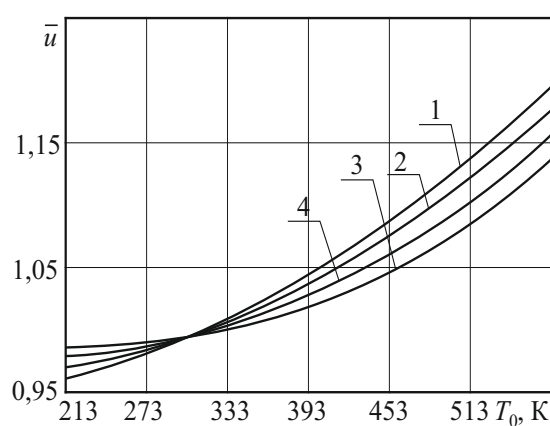


б)

Рисунок 1.32 – Залежність абсолютної (а) та відносної $\bar{u}$ (б) швидкості горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ від T_0 при атмосферному тиску: 1 – $\alpha = 0,2$; 2 – $\alpha = 0,6$; 3 – $\alpha = 1,0$; 4 – $\alpha = 2,0$; 5 – $\alpha = 3,0$.



а)



б)

Рисунок 1.33 – Залежність абсолютної (а) та відносної $\bar{u}$ (б) швидкості горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ від T_0 при $P = 2,5 \cdot 10^7$ Па: 1 – $\alpha = 0,37$; 2 – $\alpha = 0,20$; 3 – $\alpha = 1,40$; 4 – $\alpha = 3,0$.

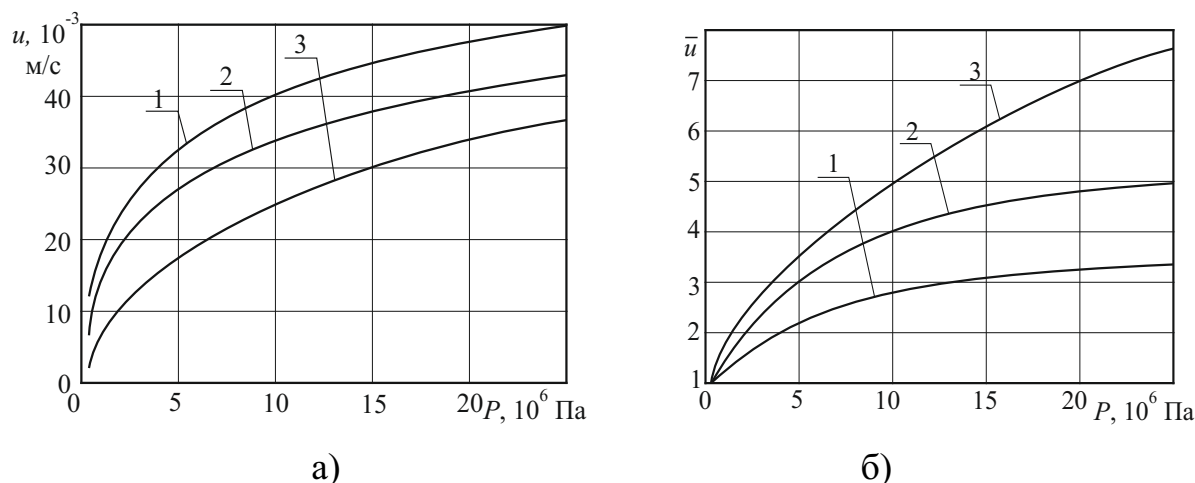


Рисунок 1.34 – Залежність абсолютної (а) та відносної $\bar{u}$ (б) швидкості горіння суміші Mg + NaNO₃ від P при $T_0 = 293$ К ($\bar{u} = \frac{u}{u_{P=10^5}}$, де $u_{P=10^5}$ – швидкість горіння суміші при $P = 10^5$ Па): 1 – $\alpha = 0,2$; 2 – $\alpha = 1,4$; 3 – $\alpha = 3,0$.

З результатів загальних експериментальних досліджень впливу тиску на швидкість горіння сумішей металевих палив (алюмінію, магнію, сплаву алюмінію з магнієм, титану) з неорганічними окиснювачами (NaNO₃, Sr(NO₃)₂, Ba(NO₃)₂) випливає, що у досліджених системах, незалежно від природи металевих палив та окиснювача, а також для різних значень співвідношення та дисперсності компонентів, характер залежності $u(P)$ зберігається і підпорядковується зазначеній ступеневій функції.

Результати проведених експериментальних досліджень залежності швидкості горіння $u(P)$ для суміші магнію з нітратом натрію у широкому діапазоні зміни тисків (від $0,1 \cdot 10^6$ Па до $2,5 \cdot 10^6$ Па), а також впливу на неї коефіцієнта надлишку окиснювача ($\alpha = 0,2 \dots 3,0$) та початкової температури ($T_0 = 293 \dots 573$ К) представлені рис. 1.34, 1.36 та у табл. 1.6. З даних, наведених на рис. 1.34 видно, що при нормальній початковій температурі $T_0 = 293$ К збільшення зовнішнього тиску до $2,5 \cdot 10^7$ Па призводить до зростання швидкості горіння, причому зі збільшенням тиску спостерігається послаблення залежності $u(P)$. Зменшення α (з 3,0 до 0,2) спричиняє помітне послаблення цієї залежності $u(P)$.

Підвищення початкової температури до 573 К не змінює загального характеру залежності $u(P)$, тобто навіть при підвищеній T_0 зі збільшенням тиску швидкість горіння зростає, а залежність $u(P)$ послаблюється (рис. 1.36). При цьому характер впливу α на $u(P)$ практично не змінюється. Основною роллю початкової температури є те, що незалежно від значення α збільшення T_0 призводить до відчутного послаблення залежності $u(P)$.

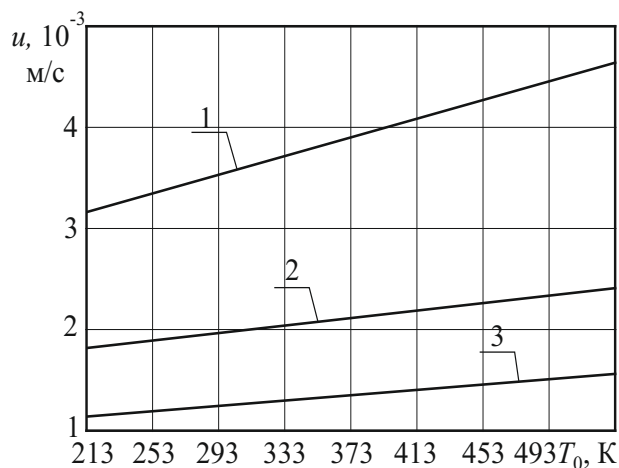


Рисунок 1.35 – Залежність u для двокомпонентних сумішей МПФ – 3 з Ф – 3 від T_0 : 1 – 75 % МПФ – 3 + 25 % Ф – 3; 2 – 60 % МПФ – 3 + 40 % Ф – 3; 3 – 40 % МПФ – 3 + 60 % Ф – 3 ($d_{ок} = 10$ мкм; діаметр зразків $3 \cdot 10^{-2}$ м; висота – $4 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $K_V = 0,94 \dots 0,98$).

Таблиця 1.6 – Значення постійних $u_0 \cdot 10^3$, м/с та ν в законі горіння для сумішей $Mg + NaNO_3$ (інтервал тиску $0,1 \dots 25 \cdot 10^6$ Па)

α	$T_0 = 293$ К		$T_0 = 573$ К	
	u_0	ν	u_0	ν
0,2	14	0,22	43	0,050
1,4	8	0,29	27,5	0,094
3,0	4,5	0,34	16	0,165

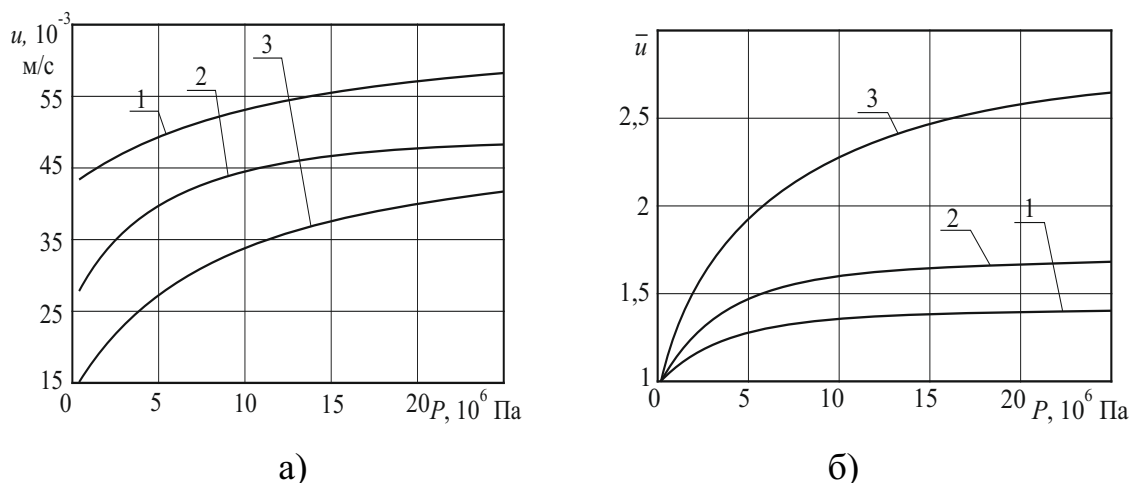


Рисунок 1.36 – Залежність абсолютної (а) та відносної $\bar{u}$ (б) швидкості горіння суміші $Mg + NaNO_3$ від P при $T_0 = 293$ К: 1 – $\alpha = 0,2$; 2 – $\alpha = 1,4$; 3 – $\alpha = 3,0$.

Встановлено, що з підвищенням тиску збільшення швидкості горіння сповільнюється та у ряді випадків крива $u = f(P)$ виходить на плато ($Mg + \Phi - 3$ та $Al + \Phi - 4$) (табл. 1.7).

Дані щодо впливу інших факторів на залежність $u(P)$ для розглядуваних вище сумішей в даний час відсутні.

Таким чином, нині теоретичні та експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів зарядів піротехнічних металевих сумішей на основі фторопластів – таких як співвідношення компонентів і їх дисперсність, коефіцієнт ущільнення, діаметр заряду та матеріал його оболонки, вологість окиснювача – а також зовнішніх умов (температура нагріву, зовнішній тиск, вологість та склад навколишнього середовища) на основні характеристики процесів займання та розвитку горіння – зокрема, на температуру та склад продуктів згоряння, швидкість горіння та вибухонебезпечні режими його розвитку – є вельми обмеженими. Для трьох- та більше компонентних сумішей із різними технологічними добавками такі дані взагалі відсутні, що суттєво ускладнює розробку методів запобігання виникненню вимушених пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів на основі зазначених сумішей.

Таблиця 1.7 – Емпіричні залежності швидкості горіння сумішей з металевими пальними від тиску ($\bar{P} = \frac{P}{P_a}$, де P_a – атмосферний тиск)

Суміш	Тиск, МПа	Формула для u^{-3} м/с	Тиск, МПа	Формула для u^{-3} м/с
80 % МПФ – 3 + 20 % Ф – 3	0,5...2,0	$5,7 \cdot \bar{P}^{0,18}$	2,0...11,5	$9,1 \cdot \bar{P}^{0,1}$
75 % МПФ – 3 + 25 % Ф – 3	0,5...1,6	$4,3 \cdot \bar{P}^{0,23}$	1,6...7,0	$3,4 \cdot \bar{P}^{0,31}$
70 % МПФ – 3 + 30 % Ф – 3	0,5...1,0	$3,5 \cdot \bar{P}^{0,26}$	2,0...7,0	$3,3 \cdot \bar{P}^{0,30}$
60 % МПФ – 3 + 40 % Ф – 3	0,5...5,5	$2,4 \cdot \bar{P}^{0,35}$	5,5...10,5	$2,5 \cdot \bar{P}^{0,33}$
50 % МПФ – 3 + 50 % Ф – 3	0,5...1,0	$1,2 \cdot \bar{P}^{0,45}$	1,0...11,0	$1,1 \cdot \bar{P}^{0,41}$
40 % МПФ – 3 + 60 % Ф – 3	0,5...1,2	$1,6 \cdot \bar{P}^{0,37}$	1,2...7,0	$0,8 \cdot \bar{P}^{0,45}$
30 % МПФ – 3 + 70 % Ф – 3	0,5...1,7	$0,8 \cdot \bar{P}^{0,30}$	1,7...7,0	$0,6 \cdot \bar{P}^{0,35}$
80 % ПА – 4 + 20 % Ф – 3	1,3...3,3	$0,1 \cdot \bar{P}^{0,82}$	3,3...8,0	$0,6 \cdot \bar{P}^{0,34}$
75 % ПА – 4 + 25 % Ф – 3	1,0...5,0	$0,3 \cdot \bar{P}^{0,58}$	5,0...8,5	$1,3 \cdot \bar{P}^{0,17}$
70 % ПА – 4 + 30 % Ф – 3	0,5...2,5	$0,5 \cdot \bar{P}^{0,49}$	2,5...9,5	$0,8 \cdot \bar{P}^{0,35}$
60 % ПА – 4 + 40 % Ф – 3	0,5...3,0	$0,8 \cdot \bar{P}^{0,50}$	3,0...8,0	$1,8 \cdot \bar{P}^{0,24}$
50 % ПА – 4 + 50 % Ф – 3	0,5...3,0	$0,7 \cdot \bar{P}^{0,51}$	5,0...8,5	$1,6 \cdot \bar{P}^{0,26}$
40 % ПА – 4 + 60 % Ф – 3	0,5...2,0	$0,6 \cdot \bar{P}^{0,52}$	2,0...5,0	$0,9 \cdot \bar{P}^{0,38}$
30 % ПА – 4 + 70 % Ф – 3	0,5...3,3	$0,4 \cdot \bar{P}^{0,56}$	3,3...9,5	$1,1 \cdot \bar{P}^{0,28}$
80 % ПА – 4 + 20 % Ф – 4	4,0...6,0	$0,1 \cdot \bar{P}^{0,75}$	4,0...10,0	$0,5 \cdot \bar{P}^{0,42}$
70 % ПА – 4 + 30 % Ф – 4	1,0...3,8	$0,8 \cdot \bar{P}^{0,36}$	3,8...11,5	$1,4 \cdot \bar{P}^{0,70}$
60 % ПА – 4 + 40 % Ф – 4	1,0...6,5	$1,3 \cdot \bar{P}^{0,32}$	0,5...11,0	$3,0 \cdot \bar{P}^{0,17}$
50 % ПА – 4 + 50 % Ф – 4	1,0...7,0	$1,1 \cdot \bar{P}^{0,37}$	7,0...12,0	$4,3 \cdot \bar{P}^{0,07}$
40 % ПА – 4 + 60 % Ф – 4	1,0...6,5	$0,8 \cdot \bar{P}^{0,45}$	6,5...11,5	$2,7 \cdot \bar{P}^{0,16}$

Примітка. $d_{ок} = 10$ мкм (Ф – 3), 20...90 мкм (Ф – 4); $T_0 = 293$ К; діаметр зразків $3 \cdot 10^{-2}$ м; висота $4 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $K_y = 0,94...0,98$.

Висновки до розділу 1, мета та завдання досліджень

На основі проведеного аналізу існуючих досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Здійснено систематичний розгляд випадків пожежонебезпечних та вибухових руйнувань піротехнічних виробів під час їхнього зберігання, транспортування та експлуатації, які мали місце як в Україні, так і за кордоном протягом останніх десятиліть.
2. Встановлено, що під дією зовнішніх термічних факторів заряди сумішей на основі металевих палих речовин та фторопластів зазнають термічного розкладання з утворенням активних газоподібних продуктів. У цьому середовищі частинки металів інтенсивно окислюються з виділенням значної кількості тепла, відбувається їх спалахування та горіння у умовах підвищених температур та зовнішніх тисків. Внаслідок цього процес горіння заряду суміші суттєво прискорюється, що може призводити до вибухових руйнувань виробів із наступними пожежонебезпечними наслідками
3. Проведена систематизація розрізнених даних дозволила виокремити закономірності процесів високотемпературного окиснення, займання та горіння металевих частинок у газоподібних продуктах розкладу окиснювача. Зокрема, встановлено залежності швидкостей окиснення металів від температури та складу навколишнього середовища, критичні температури окиснювальних середовищ, за яких відбувається спалахування, а також часи індукції (затримки спалахування) частинок металів від початку їх інтенсивного нагріву залежно від розмірів частинок та фізико-хімічних властивостей середовища. Ці дані формують важливу складову бази знань для оцінки та керування пожежонебезпечними властивостями піротехнічних сумішей за умов зовнішніх термовпливів.
4. Серед існуючих методів термодинамічних розрахунків температури та складу продуктів згоряння піротехнічних сумішей найбільш точним є підхід, що враховує фазову нерівноважність продуктів. Проте на сьогодні

відсутні комплексні термодинамічні розрахунки д температури та складу продуктів згоряння розглядуваних сумішей для широкого діапазону змін співвідношення компонентів та зовнішнього тиску. Отримання експериментальних даних щодо зазначених характеристик утруднене через багатофакторний характер процесу горіння та складність його контролю.

5. Застосування класичної схеми горіння Лейпунського-Новожилова, яка використовується у теоретичних дослідженнях найбільш вивчених горючих систем (гомогенних газових сумішей, летких ВР, сумішевих твердих палив) до описання процесу горіння піротехнічних двокомпонентних сумішей з порошків магнію, нітратовмісних окиснювачів (нітратів калію, натрію, барію, стронцію тощо) та оксидів металів було здійснене різними авторами з врахуванням визначення температури поверхні горіння через кінетичні закономірності розкладання окиснювачів, більш точних розрахунків часів згоряння частинок металу в продуктах їх розкладання, а також термодинамічних розрахунків температури та складу продуктів згоряння шляхом врахування їх більшої кількості та фазової нерівноважності, що дозволило значно підвищити точність розрахунків швидкості їх горіння. Використання цього підходу дозволило знизити відносну похибку розрахунків з 30–40 % до 10–12 %. У випадку трикомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, нітратовмісних окиснювачів (нітратів калію, натрію, барію, стронцію тощо) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену), шляхом врахування неточностей попередніх моделей (зокрема теплового потоку від частинок металевого пального, що затримуються на поверхні горіння внаслідок агломерації) забезпечило повну якісну відповідність розрахунку та експерименту та задовільну кількісну точність (відносна похибка 12–15 %).
6. Наразі відсутні розроблені математичні моделі нагріву піротехнічних виробів із зарядами розглянутих сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоско-паралельні пластини, прямокутні елементи різної товщини тощо), які застосовуються у виробництві, в умовах зберігання та

транспортування, для визначення розподілу температури по товщині виробу залежно від величини зовнішнього теплового потоку, часу його дії та технологічних параметрів сумішей із врахуванням температурної залежності їх теплофізичних властивостей. Не визначено критичні режими нагріву виробів зовнішніми тепловими потоками в умовах їх зберігання та транспортування (значення теплового потоку та часу його дії), перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів.

7. Відсутні систематичні дані щодо залежності температури продуктів згоряння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів та вмісту у них високотемпературного конденсату від технологічних параметрів сумішей і умов зовнішнього впливу.

8. Не проведені теоретичні дослідження механізму горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів за умов зовнішніх термічних впливів, таких як підвищені температури нагріву та змінні зовнішні тиски. Також відсутня математична модель горіння, яка враховувала б основні фізико-хімічні чинники, властиві зарядам сумішей, а також зовнішні умови, і дозволяла б прогнозувати швидкість розвитку стійкого, вибухонебезпечного горіння та визначати його граничні режими у зазначених умовах.

9. Відсутні експериментальні дослідження комплексного впливу технологічних параметрів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення заряду, його діаметра, товщини та матеріалу оболонки) та умов навколишнього середовища (зокрема відносної вологості) на швидкість розвитку горіння сумішей і концентраційні межі горіння сумішей у широкому діапазоні зміни цих параметрів для визначення стабільних та вибухонебезпечних режимів горіння.

На основі проведеного аналізу стану питання щодо підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластвмісних сумішей у умовах зберігання, транспортування та експлуатації з урахуванням зовнішніх термічних впливів, було сформульовано мету та визначено завдання досліджень.

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів зарядів металізованих сумішей на основі фторопластів та зовнішніх умов термічної дії на процеси їх нагріву, займання та розвитку горіння, що дозволяють створювати пожежовибухобезпечні піротехнічні вироби на їх основі.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні наукові та прикладні завдання.

1. Проаналізувати вплив зовнішніх термодій на заряди металізованих сумішей та визначити потенційні шляхи підвищення їх пожежної безпеки в зазначених умовах.
2. Розробити математичні моделі зовнішніх термічних впливів на заряди сумішей різної геометричної форми та розмірів для визначення розподілу температур по їх товщини з метою визначення пожежовибухонебезпечних режимів нагрівання виробів.
3. Проаналізувати фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння сумішей, встановити механізм їх горіння, розробити математичну модель процесу розвитку горіння двокомпонентних сумішей металеве пальне + фторопласт в умовах зовнішніх термічних впливів та встановити режими нестійкого, вибухонебезпечного горіння.
4. Провести експериментальні дослідження для визначення комплексного впливу технологічних параметрів сумішей і зовнішніх умов на основні характеристики процесів їх займання та горіння (температуру займання та час згоряння у газоподібних продуктах розкладання сумішей, швидкостей їх горіння).

5. Розробити науково обґрунтований метод визначення критичних значень технологічних параметрів сумішей та зовнішніх умов, перевищення яких спричиняє їх передчасне займання та вибухонебезпечний розвиток горіння, що призводять до пожежовибухонебезпечного руйнування виробів; впровадити результати досліджень.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРАЗКІВ УЩІЛЬНЕНИХ СУМІШЕЙ З ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ ТА ФТОРОПЛАСТІВ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЙ

У цьому розділі представлено загальну методику проведення досліджень, а також наведено основні фізико-хімічні властивості металевих пальних (магнію, алюмінію) та фторопластовмісних окиснювачів (Ф–3, Ф–4), а також їх ущільнених сумішей, які є необхідними для теоретичного аналізу експериментальних даних щодо процесів горіння досліджуваних сумішей та встановлення їх механізму.

Крім того, розглянуто методики експериментальних досліджень, а також описано методики та стандартне піротехнічне обладнання, призначене для дослідження процесів займання сумішей та розвитку їх горіння в умовах зовнішніх термічних впливів, зокрема при підвищених температурах нагріву (до 873 K) та зовнішніх тисках (до 10^7 Па)

2.1. Загальна методика досліджень

Експериментальні та теоретичні дослідження, спрямовані на запобігання передчасному пожежонебезпечному займанню піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів в умовах зовнішніх термічних впливів, проводилися за методикою, що передбачає визначення критичних значень як параметрів зовнішніх впливів, так і технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких спричиняє прискорений розвиток процесу горіння та пожежовибухонебезпечне руйнування піротехнічних виробів.

Реалізація цього підходу передбачала поетапне виконання таких завдань.

1. Здійснювався аналіз наявних даних щодо поведінки компонентів сумішей за умов зовнішніх термічних дій з метою встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів і зовнішніх факторів на процеси термічного розкладання окиснювача, передполум'яного окиснення, займання та згоряння частинок металевго пального в активних продуктах розкладання. У відповідних температурних інтервалах, характерних для конденсованої фази та поверхні горіння, визначалися кінетичні характеристики зазначених процесів.
2. Досліджувалися процеси нагріву зразків сумішей різної геометричної форми (брусків різної товщини, прямокутних елементів різних розмірів тощо) від можливих джерел пожежі за умов зберігання та транспортування. Визначалися розподіли температури по товщині зразків залежно від величини зовнішнього теплового потоку та тривалості його дії.
3. Критичні значення параметрів зовнішніх термічних дій (величини теплового потоку та часу його впливу на зразки піротехнічних сумішей), а також технологічні параметри зразків визначалися шляхом зіставлення значень температур поверхні зразків із температурами займання частинок металевго пального
4. Виконувалися термодинамічні розрахунки температури продуктів згоряння сумішей і вмісту в них високотемпературного конденсату (неокисненого металу) залежно від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску. На підставі отриманих результатів встановлювалися критичні діапазони зміни цих параметрів, перевищення яких призводить до зниження пожежовибухобезпечності сумішей за умов зовнішніх термічних впливів

5. Проводилося дослідження механізму горіння та розроблялася математична модель процесу горіння сумішей типу «металеве пальне + фторопластовмісний окиснювач» за умов підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків. Визначалися в умовах зовнішніх термічних дій закономірності впливу технологічних чинників і зовнішніх умов на межі стійкого та вибухобезпечного розвитку горіння сумішей.
6. Здійснювалися експериментальні дослідження з метою визначення впливу технологічних параметрів зразків сумішей та параметрів зовнішніх впливів на швидкість розвитку процесу горіння у широкому діапазоні їх зміни. На основі отриманих результатів встановлювалися критичні діапазони зміни швидкості горіння, перевищення яких спричиняє вибухонебезпечне прискорення процесу горіння.
7. На підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблялися науково обґрунтовані методи формування бази даних щодо критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій і діапазонів зміни швидкості горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів зарядів, перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів
8. Практичне впровадження та використання розроблених методів на підприємствах України у вигляді контрольних засобів та технологічних рекомендацій для подальшого включення до нормативної документації з виготовлення, зберігання, транспортування та застосування загальнопромислових піротехнічних виробів на основі ущільнених сумішей порошків металевих пальних і фторопластів.

2.2. Основні фізико-хімічні властивості металевих палих, фторопластів та характеристики їх порошків

Фізико-хімічні властивості металевих палих та основні характеристики їх порошків. В якості металевих палих у розглядуваних сумішах найбільш щиро використовувались порошки магнію та алюмінію, які випускаються промисловістю [6, 74].

Фізико-хімічні властивості магнію та його порошків. Магній відноситься до елементів другої групи періодичної системи. Порядковий номер – 12, атомна маса – 24,312. Атомний радіус Mg дорівнює $1,598 \cdot 10^{-10}$ м, радіус іону Mg^{2+} – $0,65 \dots 0,74 \cdot 10^{-10}$ м.

Електронна структура атома Mg – $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$. Атом магнію має валентні d-орбіталі, і для нього найбільш типовий $sp^3 d^2$ – гібридний стан. Mg проявляє тенденцію до утворення ковалентних зв'язків, що співпадає з послідовністю зміни в елементів другої групи величини відношення заряд/радіус:

$$Be^{2+} - 17; Mg^{2+} - 3,3; Ca^{2+} - 1,8; Sr^{2+} - 1,2; Ba^{2+} - 1,0; Ra^{2+} - 0,7.$$

Магній має високу електропозитивність, що зумовлює його активність у реакціях. Потенціали іонізації Mg складають: перший – 7,64 еВ, другий – 15,03 еВ, третій – 78,2 еВ.

Mg – один з найбільш розповсюджених на Землі елементів (2,35 % за масою у земній корі).

Твердий магній являє собою блискучий сріблясто-білий метал. На повітрі, окислюючись, набуває матового відтінку.

Mg має гексагональну решітку з просторовою групою за Шліфенсом D_{6h}^4 , в міжнародній системі – $c6/mmc$. Поліморфні перетворення у нього відсутні. Періоди елементарної комірки: при 298 К: $a = 3,209 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 5,210 \cdot 10^{-10}$ м, при 870 К: $a = 3,26 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 5,296 \cdot 10^{-10}$ м.

Відстань між атомами при $T = 298$ К складає $3,19 \dots 3,20 \cdot 10^{-10}$ м.

Густина чистого Mg (99,9%) при 298 К дорівнює 1733 кг/м³. Зміна густини твердого магнію з температурою приведено нижче (табл. 2.1).

Середній коефіцієнт термічного розширення твердого Mg в інтервалі температур 293...373 К складає $26,86 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а в інтервалі температур 273...383 К – $27,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Таблиця 2.1 – Залежність густини твердого магнію від температури

$T, \text{ K}$	293	673	773	873	923
$\rho, \text{ кг/м}^3$	1745	1692	1676	1662	1650

Залежність теплопровідності Mg від температури показана на рис. 2.1.

Твердий магній має такі термодинамічні характеристики:

$$H_{298}^0 - H_0^0 = 4986 \text{ Дж/моль}; \quad S_{298}^0 = 32,60 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K};$$

$$C_{P298}^0 = 24,93 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}.$$

Залежність теплоємності твердого Mg від температури вивчалась багатьма авторами. Як найбільш точно, для практичного використання рекомендується рівняння Кубашевського:

$$C_p = 22,33 + 10,27 \cdot 10^{-3} T - 0,431 \cdot 10^{-5} T^{-2}. \quad (2.1)$$

Зміна середньої теплоємності з температурою в інтервалі 773...1173 К наведена у табл. 2.2.

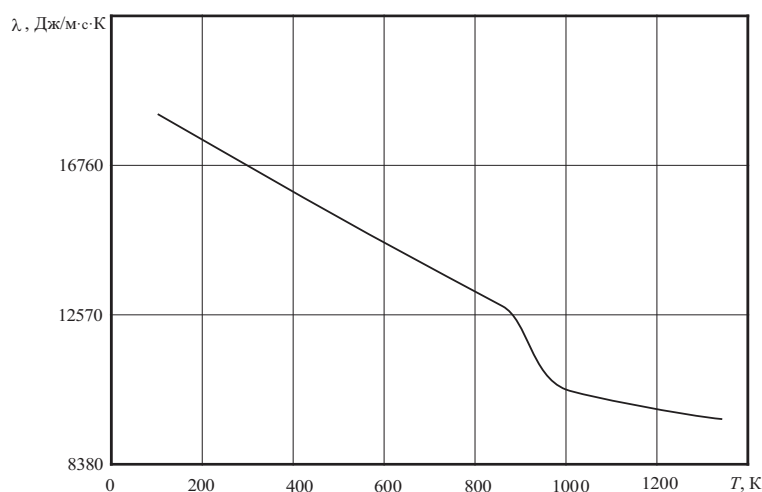


Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта теплопровідності твердого та рідкого Mg від температури.

Таблиця 2.2 – Залежність середньої теплоємності магнію від температури

T, K	500	600	700	800	900
$C_p, Дж/моль·K$	26,31	26,86	27,44	27,99	28,53

Технічно чистий Mg (99,9 %) має модуль пружності $4,41 \cdot 10^{10}$ Н/м², модуль зсуву $1,72 \cdot 10^{10}$ Н/м², коефіцієнт Пуассона 0,33. Литий Mg має межу пропорційності $3,43 \cdot 10^6$ Н/м², межа пружності на розтягування – $8,92 \cdot 10^7$ Н/м², на стиснення – $2,20 \cdot 10^8$ Н/м², на зріз – $9,6 \cdot 10^7$ Н/м².

Температура плавлення Mg складає 923...924 К. Теплота плавлення $\Delta H_{пл}$ при цьому складає 8,97 кДж/моль.

Зміна ентропії при плавленні складає 9,43 Дж/моль·К, зміна об'єму $\Delta V_{пл}/V_{тв} = 3,05$ %. У точці плавлення питома теплоємність збільшується з 34,3 Дж/г-ат·К до 36,9 Дж/г-ат·К.

Густина Mg у всьому інтервалі температур рідкого стану описується рівнянням:

$$\rho_p = 1834 - 2647 \cdot 10^{-4} T. \quad (2.2)$$

Густина рідкого та газоподібного магнію при температурах вище нормальної точки кипіння наведені в табл. 2.3.

Для обчислення питомої теплоємності при температурі 1196...1373 К пропонується такий аналітичний вираз:

$$C_p = 22,17 + 10,89 \cdot 10^{-3} T - 0,49 \cdot 10^{-5} T^{-2}. \quad (2.3)$$

Середнє значення теплоємності в цьому інтервалі $C_p = 33,1 \pm 0,8$ Дж/г-ат.

Таблиця 2.3 – Залежність густини рідкого і газоподібного магнію від температури

T, K	1500	2000	2500	3000	3500
$\rho_p, кг/м^3$	1438	1300	1151	989	815
$\rho_g, кг/м^3$	5	5,2	20,8	51,4	93,2

Коефіцієнт об'ємного термічного розширення рідкого Mg майже лінійно зростає при підвищенні температури з $166,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (при 923 K) до $180,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (при температурі кипіння). Теплопровідність рідкого Mg показана на рис. 2.1 (права частина графіка). Видно, що вона слабо залежить від температури.

В'язкість рідкого Mg може бути описана рівнянням:

$$\eta = A \cdot \sqrt[3]{10^{-3} \rho} \cdot e^{C_p \cdot T^{-1}}, \quad (2.4)$$

де $A = 2,45 \cdot 10^{-4}$, $C = 2190$.

Поверхневий натяг рідкого магнію наведено у табл. 2.4.

З підвищенням температури, як видно з табл. 2.4, поверхневий натяг лінійно зменшується. Коефіцієнт σ поблизу температур 923 K, 973 K і 1073 K складає відповідно $559 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$, $542 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ і $508 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Таблиця 2.4-Залежність поверхневого натягу рідкого магнію від температури

$T, \text{ K}$	954	987	996	1039	1062	1097	1111	1167
$\sigma, 10^{-3} \text{ Н/м}$	563	552	549	538	532	520	517	502

Тиск насиченої пари рідкого Mg в температурному інтервалі 924...1380 K визначається залежністю:

$$P = 1544,13 - 1012130T^{-1} - 13566 \lg T. \quad (2.5)$$

Дані за температурою кипіння магнію сильно відрізняються. Найбільш правильним значенням $T_{\text{кип}}$ при атмосферному тиску є 1380 K.

Нижче наведено значення температури кипіння Mg при різних тисках (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 Залежність температури кипіння магнію від тиску

$P, \text{ Па}$	$133 \cdot 10^{-10}$	$133 \cdot 10^{-8}$	$133 \cdot 10^{-5}$	$133 \cdot 10^{-1}$	133	1330	$133 \cdot 10^2$	101080
$T_{\text{кип}}, \text{ K}$	407	455	554	783	875	996	1165	1376

Теплота сублимації Mg складає: $\Delta H_{S0} = 147 \pm 0,8 \text{ кДж/г-ат.}$

Критичні параметри для Mg експериментально не визначені, а значення, які отримані теоретичним шляхом, розходяться. Так, розраховане значення критичної температури складає 2140 К. Критичні параметри, обчислені експериментально, складають: $T_{кр} = 3850 \pm 400$ К, $P_{кр} = 1753 \cdot 10^5 \pm 811 \cdot 10^5$ Па, $V_{кр} = 59 \cdot 10^{-6} \pm 8 \cdot 10^{-6}$ м³/г-ат..

Теплоємність газоподібного Mg (одноатомної пари) не залежить від температури і дорівнює $C_p^2 \approx 20,82$ Дж/г-ат.·К.

Пружність парів магнію виражається такою формулою:

$$\lg \frac{P}{133} = AT^{-1} + B \lg T + CT + D. \quad (2.6)$$

Значення констант A , B , C і D представлені в табл. 2.6.

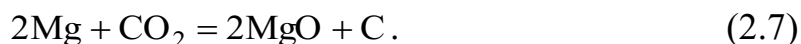
Таблиця 2.6 Значення констант A , B , C і D залежно від фазового стану магнію

Фазовий стан магнію	A	B	$C \cdot 10^3$	D
твердий	7753	- 0,23	- 0,24	9,71
рідкий (923-1376)	-7844	- 2,73	0,25	16,80

Mg реагує з киснем, утворюючи MgO. Легко розчиняється у всіх розбавлених мінеральних кислотах навіть на холоді. Mg з водою реагує особливо при наявності аніонів з утворенням гідроксиду магнію і водню. Цей процес прискорюється при нагріванні. В морській воді швидко кородує. Магній може розчиняти велику кількість водню. Вміст водню в магнієвих злитках складає $110 \dots 180 \cdot 10^{-6}$ м³/кг Mg; у верхній частині злитку вміст H₂ досягає $220 \dots 250 \cdot 10^{-6}$ м³/кг Mg.

З сіркою Mg взаємодіє тільки при 773...873 К, утворюючи сульфід MgS. З азотом (при атмосферному тиску) реакція починається при 933...973 К і різко посилюється при 1273 К; при цьому утворюється нітрид Mg₃N₂. Mg також реагує з CO₂, SO₂, водяною парою, хлористим воднем і хлором.

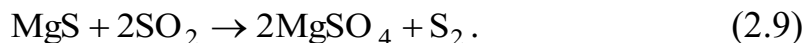
Реакція Mg з CO₂ йде за рівнянням:



Взаємодія Mg і SO₂, як встановлено, відбувається при температурі, нижчій 873 К за рівнянням:



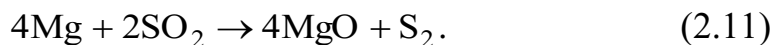
При підвищенні температури переважає реакція:



При 873 К реакція йде з утворенням MgO, MgSO₄ та S₂:

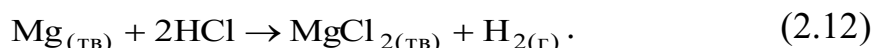


При температурі 973 К MgSO₄ розкладається, і реакція протікає таким чином:



В атмосфері SO₂ окиснення Mg киснем повітря гальмується.

З HCl Mg реагує за рівнянням:



При $T = 793 \dots 873$ К рівновага цієї реакції майже повністю зміщена вправо (константа рівноваги $K_{873} = 10^{18}$).

Mg енергійно реагує з хлором, утворюючи також MgCl₂.

З металами Mg утворює тверді розчини та інтерметалічні з'єднання. За своїми характеристиками Mg в періодичній системі займає проміжне положення між лужними та типовими перехідними металами. Ні в твердому, ні в рідкому стані він не змішується з Na, K, Rb, Cs, V, Nb, Ta, Mo, W. Це пов'язано з несприятливими об'ємними факторами і значною різницею у валентності Mg та вказаних елементів.

Такі перехідні метали як Mn, Ti, Zr частково розчиняються як в рідкому, так і в твердому стані, хоча і в невеликих кількостях. В твердому стані при $T = 873$ К в Mg може бути розчинено 2,35 % (за масою) Mn; при 1123 К (Mg рідкий) – 4,95 %. Розчинність титану в Mg при 913 К складає 0,005...0,009 % за масою, а при 1033 К (Mg рідкий) – 0,064%.

Розчинність Fe в Mg у твердому вигляді незначна (0,001 %), в рідкому – при 1473 K вона складає 0,84 %. При додаванні 2 % Mn розчинність заліза різко знижується.

З берилієм Mg не змішується навіть у рідкому стані. Літій добре розчиняється в Mg; тверді розчини існують до 30 ат. % Li в магнії при 453...867 K.

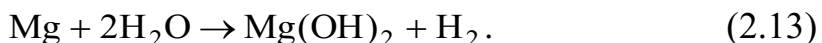
У практиці широко розповсюджені сплави Mg – Zn (до 8 % Zn по масі) і магнію з алюмінієм.

Добре змішуються з магнієм Cu, Ag, Au, Pb, Bi, Pt.

Інтерметаліди Mg утворюють з елементами IV групи: Mg₂Si, Mg₂Ge, Mg₂Sn, MgPb.

З металами I, II, III груп Mg утворює ряд проміжних фаз, які не відповідають правилам валентності.

Магній при взаємодії з вологою виділяє водень:



Корозійна стійкість магнію по відношенню до вологи залежить, в першу чергу, від чистоти металу.

Корозійна стійкість магнію значною мірою підвищується, якщо вміст в ньому не перевищує 0,001 % нікелю та 0,005 % міді.

Залізо здійснює шкідливий вплив на опір корозії сплавів системи Mg – Al, однак цей шкідливий вплив може бути деякою мірою подавлений додаванням кількох десятих часток відсотка марганцю.

Мідь, нікель та кобальт значною мірою зменшують корозійну стійкість магнію та його сплавів.

Наявність натрію, барію та калію в магнії призводить до крихкості сплавів. Водень у магнії викликає утворення мікропористості.

Основні характеристики промислових магнієвих порошків представлено у табл. 2.7, 2.8.

Фізико-хімічні властивості алюмінію та його порошків. Алюміній належить до третьої групи періодичної системи елементів. Його порядковий

номер 13, атомна маса 26,9825. Електронна структура атома алюмінію $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$. Таким чином, алюміній є р-елементом, що має валентні 3d-орбіталі.

Для алюмінію найбільш характерним є стан окислення. Він амфотерний, для якого типовими є як аніонні, так й катіонні комплекси, а також солі. У більшості з'єднань атоми Al знаходяться у стані sp^3 та sp^3d^2 -гібридизації. Отже, для нього характерні координаційні числа 4 та 6. Можливість виникнення при sp^3 -гібридизації делокалізованих π -зв'язків за рахунок d-орбіталей атома Al та нерозділених електронних пар атомів O, N обумовлює значну міцність гетеро-ланцюгів Al – O – Al та Al – N – Al. Потенціали іонізації атома алюмінію дорівнюють: перший – 5,98 еВ, другий – 18,82 еВ, третій – 28,44 еВ, четвертий – 119,96 еВ.

Таблиця 2.7 – Гранулометричний склад магнієвих порошків

Залишок на ситах мас. %	Розмір частинок, мкм														
	< 10	10	18,3	32	37,6	54	57,2	90	145	146	200	255	300	350	390
МПФ – 1	–	–	–	–	–	–	–	0,3	3,4	–	10,8	28,0	25,3	21,6	10,3
МПФ – 2	–	–	–	–	–	1,0	–	4,6	61,0	–	30,0	2,4	0,4	–	–
МПФ – 3	–	–	–	–	–	–	8,1	72,0	–	20,0	–	–	–	–	–
МПФ – 4	–	–	–	–	6,0	6,0	48,0	39,0	–	0,8	–	–	–	–	–

Таблиця 2.8 –Питома поверхня та середня крупність магнієвих порошків

Марка металу	Метод визначення			d_m , мкм
	Газохромато-графічний, m^2/kg	ПСХ – 2, m^2/kg	Адсорбційний, m^2/kg	
МПФ – 4	100	118,5	105,3	74,5
МПФ – 3	104,2	22,6	97,4	135
МПФ – 2	80	–	59,8	182
МПФ – 1	–	–	36,7	305

В природі алюміній широко розповсюджений у вигляді силікатів (слюда, польові шпати), гідратованого оксиду алюмінію $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ (бокситу), кріоліту Na_3AlF_6 , нефеліну $(Na,K)_2Al_2Si_2O_8$. Алюміній – легкий метал сріблястого кольору. Він пластичний, м'який та добре полірується.

У великих масштабах алюміній отримують з бокситу. Останній очищують розчиненням у гідрооксиді натрію та переосадженням під дією оксиду вуглецю. Потім при 1073 – 1273 К оксид алюмінію розчинюють у розплавленому кріоліті та сплав піддають електролізу.

У 50-х роках був розроблений метод отримання глинозему шляхом комплексної переробки нефеліну. Промислові марки алюмінію мають чистоту від 99,996 % (марка АВ0000) до 98,0 % (марка А3).

Алюміній кристалізується у кубічну гранецентровану решітку (просторова група за Шенфлісом O_n^5 , у міжнародній системі – $Fm3m$). Координаційне число – 12. Період елементарної комірки $a = 4,03971...4,04955 \cdot 10^{-10}$ м, радіус атома $r = 1,4289...1,43 \cdot 10^{-10}$ м. Атомний об'єм $10^{-5} m^3$.

Основні фізичні властивості кристалічного алюмінію наступні: густина при температурі 293 К – $2,703 \cdot 10^3$ кг/м³ та із збільшенням температури зменшується (табл. 2.9). Молярна теплоємність в діапазоні температур

298...932 К описується наступною апроксимуючою формулою: $C_p = 20,70 + 12,40 \cdot 10^{-3} T$ (Дж/моль·К). Коефіцієнт лінійного розширення алюмінію відносно високий (табл. 2.10). Залежність середньої за даними різних досліджень теплопровідності алюмінію від температури представлена у табл. 2.11.

Технічно чистий алюміній (99,95 %) має при нормальній температурі межу текучості $2,1 \cdot 10^7$ Н/м², межу міцності при розтягу $6,2 \cdot 10^7$ Н/м², межу міцності на зріз $4,7 \cdot 10^7$ Н/м², відносне видовження 60 %, ударну в'язкість 5,9 Н·м. Модуль пружності лежить в межах $6,54 \dots 7,15 \cdot 10^{10}$ Н/м². Питомий опір алюмінію при 293 К дорівнює $2,66 \cdot 10^{-4}$ Ом·м; температурний коефіцієнт опору – $0,004$ К⁻¹. Алюміній – парамагнетик. Температура плавлення при атмосферному тиску лежить в межах від 931 К (технічний алюміній чистоти 99,5 %) до 933,24 К (алюміній чистоти 99,996 %). Найбільш достовірним значенням теплоти плавлення є 10936 Дж/моль. Зміна ентропії при плавленні $\Delta S_f = 11,3 \dots 11,7$ кДж/моль·К. Відносна зміна густини при плавленні лежить в межах від 6 % до 6,26 %. Молярна теплоємність розплавленого алюмінію в діапазоні температур 932...4300 К складає 31,0 Дж/моль·К.

Таблиця 2.9–Залежність густини алюмінію від температури

Температура, К	293	373	673	932
Густина, кг/м ³	2703	2690	2620	2550

Таблиця 2.10 –Залежність коефіцієнта лінійного розширення алюмінію від температури

T, К	293...373	373...473	473...573	573...673	673...773	773...873
Коефіцієнт розширення, 10^{-6} К ⁻¹	23,8	25,5	27,5	29,5	31,5	33,5

Таблиця 2.11 – Середні значення теплопровідності алюмінію в залежності від температури

T, K	223	273	293	373	473	673
$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	207,824	210,338	210,757	210,757	222,07	228,774

Значення густини ρ та коефіцієнта поверхневого натягу σ рідкого алюмінію в інтервалі температур 973...1208 К наведені у табл. 2.12, 2.13.

В'язкість та густина розплавленого алюмінію наведені в табл. 2.14.

Таблиця 2.12 – Густина ρ та коефіцієнт поверхневого натягу σ рідкого алюмінію

T, K	979	1032	1067	1089	1170	1179	1208
$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	2,44	2,42	2,41	2,40	2,38	2,37	2,36
$\sigma \cdot 10^3, \text{Н/м}$	494	489	483	480	469	466	463

Таблиця 2.13 – Залежність коефіцієнта поверхневого натягу σ рідкого алюмінію від температури

T, K	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н/м}$
933	914
973	900
979	494
985	502
1073	865

Таблиця 2.14 – В'язкість ν та густина ρ розплавленого алюмінію

T, K	943	963	973	993	1003	1038	1073
$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	2,379	2,376	2,373	2,368	2,363	2,354	2,345
$\nu, \text{Па}\cdot\text{с}$	0,00635	0,003733	0,00289	0,00231	0,002096	0,00185	0,001392

В результаті експериментального визначення густини та коефіцієнта поверхневого натягу рідкого алюмінію при $T = 933...1217$ К отримані наступні емпіричні залежності: $\rho = (2,37 - 0,28 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 933)) \cdot 10^3$ (кг/м³); $\sigma = (865 - 0,16 \cdot (T - 933)) \cdot 10^{-3}$ (Н/м).

Температура кипіння при атмосферному тиску, яка визначена в різних дослідженнях, лежить в межах 2273...2773 К внаслідок відмінності в чистоті вихідного металу. Найбільш достовірним є значення 2766,6 К. У вакуумі (133 Па) температура кипіння знижується до 1876 К. Теплота випаровування дорівнює $291,19 \cdot 10^3$ Дж/моль. Тиск пари алюмінію залежно від температури представлений в табл. 2.15.

Таблиця 2.15 –Залежність тиску пари алюмінію від температури

T, K	298,15	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000
P, Pa	$2,32 \cdot 10^{-44}$	$7,06 \cdot 10^{-22}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	3,33	$1,22 \cdot 10^3$	$0,3983 \cdot 10^5$	$3,894 \cdot 10^5$	$62,59 \cdot 10^5$

Пружність пари алюмінію апроксимується наступною формулою

$$\lg\left(\frac{P}{133}\right) = A \cdot T^{-1} + B \cdot \lg T + C \cdot T + D.$$

Значення констант A, B, C, D представлені у табл. 2.16.

Таблиця 2.16 –Значення констант A, B, C, D залежно від фазового стану алюмінію

Фазовий стан алюмінію	A	B	$C \cdot 10^3$	D
Твердий	16710	- 1,82	1,98	15,42
Рідкий (932...2621 К)	- 15993	- 0,99	- 0,003	12,41

Алюміній має високу хімічну активність; навіть в звичайних умовах він покритий міцною оксидною плівкою. У всіх своїх стійких з'єднаннях Al тривалентний, але при високих температурах він може проявляти валентність 1 і значно рідше 2. При високих температурах він горить у ряді окислювальних середовищ – кисні, парах сірки і ін. З хлором і бромом алюміній реагує при звичайній температурі, а з йодом – при нагріванні або у присутності води, граючої роль каталізатора. Вода прискорює процес взаємодії алюмінію з хлором і бромом. При значному нагріванні

(973...1073 K) Al реагує з азотом і вуглецем. З воднем безпосередньо не взаємодіє. Унаслідок утворення захисної плівки Al стійкий в розбавлених і концентрованих HNO_3 , H_3PO_4 . Трохи розчинний у розбавлених розчинах мінеральних кислот, у концентрований H_2SO_4 і більш – у HCl . Якщо видалити оксидну плівку, він реагує з водою. Al розчинний в розчинах лугів, а також реагує з різними неметалами. Присутність слідів хлориду міді, перекису водню, контакт з платиною прискорює процес розчинення Al в соляній кислоті.

У промисловості існує ряд способів отримання алюмінієвих порошків. Основним з цих способів є розпилення алюмінію, що витікає через форсунку, розплавленого при температурі 993...1063 K струменем стислого повітря, яке збагачене азотом, і осадження отриманих таким чином частинок у пилоосаджувачі. Середній розмір частинок порошку, отриманого розпиленням, лежить в діапазоні 150...200 мкм. Готовий порошок містить 0,5...1,5 % Al_2O_3 . Із зменшенням розміру частинок вміст Al_2O_3 збільшується, досягаючи при діаметрі частинок 1 мкм 3 % і більше. Частинки порошку, одержуваного розпиленням, мають форму, близьку до овальної або каплевидної; їх поверхня має виступи і западини із згладженими краями.

Для використання порошок розсіюють за допомогою сит на фракції, відповідні певним маркам (табл. 2.17).

Середня крупність обчислюється по формулі:

$$K = \sum_i \beta_i \cdot \delta_i, \quad (2.14)$$

де β_i – масові частки з середніми діаметрами δ_i . Очевидно середня крупність K при достатньо вузьких фракціях відповідає діаметру d_{43} .

Як видно з табл. 2.17 питома поверхня порошку, визначувана на приладі Дерягіна, виходить у декілька разів вище за розрахункову (в припущенні про сферичну форму частинок). Ці відмінності є результатом наявності шорсткості і тріщин на поверхні частинок реальних порошків.

Не можна також ігнорувати недосконалість як методів визначення середнього діаметра частинок, так і методу визначення питомої поверхні за опором фільтрації. Гравіметрична густина (насипна маса) всіх марок порошку ПА порядку 960 кг/м³.

Таблиця 2.17 – Гранулометричні характеристики порошків ПА

Марка порошку	Середня крупність d_m , мкм	Розрахункова питома поверхня, м ² /кг	Питома поверхня, визначувана на приладі Дерягіна, м ² /кг	Гранулометричний склад в масових відсотках								Повний прохід через сито з сіткою N
				Залишок на ситі з сіткою №, не більше, %				Прохід через сито з сіткою №, не більше %				
				045	025	016	01	025	014	01		
ПА – 1	306	7,3	34	12				20				063
ПА – 2	179	12,4	57		10				20			045
ПА – 3	105	21,2	39			10				30		025
ПА – 4	56	39,5	95				15				Не обм.	014

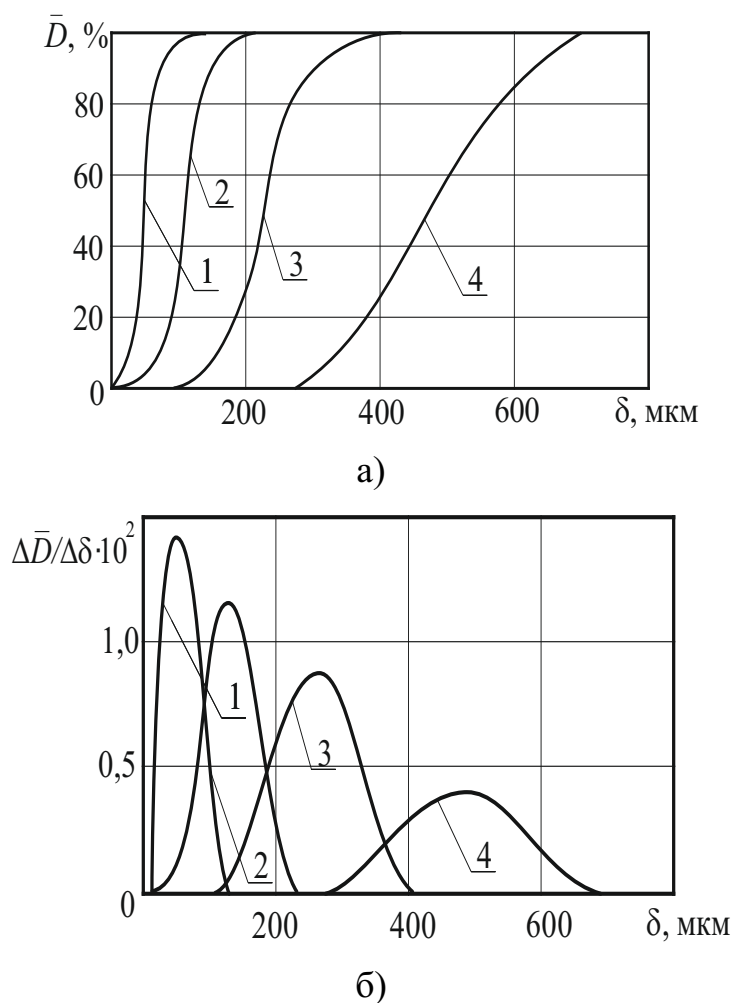


Рисунок 2.2 – Залежності масового розподілу частинок алюмінієвих порошків ПА від розмірів частинок (1 – ПА – 4; 2 – ПА – 3; 3 – ПА – 2; 4 – ПА – 1): а) – інтегральні криві; б) – диференціальні криві.

На рис. 2.2 показано криві масового розподілу за розмірами для вказаних порошків.

Більш високодисперсні порошки виготовляють шляхом помелу порошків, отриманих розпиленням, в кульових млинах з додаванням 1,5...2,5 % стеарину для запобігання конгломерації частинок в процесі подрібнення.

При цьому змінюється не тільки розмір, але і форма частинок: отримується пудра з частинками, що мають лускову форму (наприклад, марки ПАК, ПП).

При помелі в кульовому млині загальна поверхня порошку збільшується. Крихкий шар первинної термічної плівки аморфного оксиду алюмінію розривається і розподіляється на поверхні нових частинок острівцями.

На свіжоутворених поверхнях утворюється гідрооксидна плівка як результат окислення твердого алюмінію у вологій атмосфері. У табл. 2.18 приводяться характеристики лускових порошків ПАК.

У промисловому виробництві також випускається алюмінієвий порошок типу АСД–Т з додаванням титану, який отримується методом пульверизації розплавленого алюмінію в струмені нагрітого азоту. Як сировину використовують первинний алюміній та губчастий титан марки ТГ з твердістю не менше *НВ* 120. Готовий продукт являє собою сірий порошок із сферичною формою частинок. Вміст активного металу в порошку становить не менше 99 %, питома поверхня – 100–160 м²/кг, а ступінь дисперсності відповідає залишку на ситі № 0125 не більше 0,25 % за масою. Концентрація титану в порошку становить 0,35–0,60 %.

Отримання алюмінієвих порошків механічним способом ускладнюється через налипання частинок алюмінію на ріжучий інструмент навіть при мінімальній подачі заготовки. Легування алюмінію іншими металами дозволяє значно знизити цю проблему та уникнути налипання.

Інший спосіб, що дозволяє подолати це утруднення, ґрунтується на пристрої, що є верстатом, на якому злитки прямокутного перетину подрібнюються за допомогою циліндрової багатозубної фрези, яка окрім обертання навкруги своєї осі скоює за допомогою гідравлічного вузла коливальний рух по дузі кола. Розміри стружки визначаються шириною і кроком зубів фрези, відстанню між центром коливання та віссю обертання фрези, швидкістю обертання фрези і швидкістю подачі чушки.

Таблиця 2.18 – Характеристики лускових порошоків ПАК

Марка	Хімічний склад, %						Максимально допустимий залишок на ситі №, не більше %			Вміст активного Al, не менше, %
	Fe	Si	Cu	Mg	Волога, не більше	Жир, не більше	008	0056	0045	
ПАК – 1	0,7	0,7	0,1	0,01	0,1	3,8	4,0	–	–	90
ПАК – 2	0,7	0,7	0,1	0,01	0,1	3,5	1,5	–	–	87
ПАК – 3	0,7	0,7	0,1	0,01	0,1	3,8	1,0	–	–	87
ПАК – 4	0,7	0,7	0,1	0,01	0,1	3,8	–	0,3	0,5	82

Для отримання ультрадисперсних алюмінієвих порошоків можуть бути використані електролітичні і термічні методи.

Якщо припустити, що зародок має форму, аналогічну елементарній кристалічній решітці, то при кристалізації алюмінію сумарна вільна енергія залежно від розміру кристалічного зародка (кубічна решітка $a = 4,04 \cdot 10^{-10}$ м) визначається співвідношенням:

$$\Delta Z_{\text{сум}} = \Delta Z \cdot A^3 + 6A^2\delta, \quad (2.15)$$

де A – ребро куба; δ – питома поверхнева енергія.

При малому розмірі зародка робота утворення межі розділу дорівнює третині вільної енергії кристала, що дозволяє провести орієнтовні розрахунки, в результаті яких отримано:

$$A_{Al} = -1,33 \frac{\delta}{\Delta Z}. \quad (2.16)$$

Ці розрахунки показали, що у принципі можна отримати ультрадисперсні порошки з мінімальним розміром частинок, аж до елементарної комірки кристалічної решітки, тобто до $4 \cdot 10^{-10}$ м.

Фізико-хімічні властивості фторопластів та продуктів їх розкладання. У піротехнічному виробництві фторопласти (Ф – 3, Ф – 4 та ін.) широко використовуються у якості сильних окиснювачів у різних виробках (спалахувальних та запалювальних патронах та снарядах, елементах ракетно-космічної техніки та ін.) [6, 74].

Фторопласти Ф – 3 (політрифторхлоретилен) та Ф – 4 (політетрафторетилен) є термопластичними та прескомпозиційними, що складаються лише з зв'язувальних речовин (смола). Являють собою білу, у тонкому шарі майже прозору речовину, що нагадує парафін або поліетилен. Мають елементарні ланки: $-\text{CF}_2 - \text{CF}_2 -$, та є м'якими та гнучкими матеріалами. При нагріванні їх міцнісні властивості знижуються, з підвищенням температури зростає твердість, однак навіть при низьких температурах вони не стають хрупкими. Мають низький коефіцієнт тертя, можуть застосовуватись у виробках, що піддаються підвищеним тискам (до 10 МН/м^2) та температурам нагріву (більше $500 \dots 600 \text{ К}$). За своєю хімічною стійкістю перевершують усі відомі синтетичні матеріали та благородні метали. Не руйнуються під впливом лугів, кислот та навіть сумішей азотної та соляної кислот. Руйнуються тільки розплавами лужних металів, фтором та трифторидом хлору. Основні теплофізичні властивості Ф – 3 та Ф – 4 представлено у табл. 2.19.

Основним активним продуктом розкладання Ф – 3 та Ф – 4 є фтор F_2 – блідно-жовтий газ з різким запахом. Має молярну масу $18,9984 \text{ а.е.м.}$

(г/моль). Електронна структура [He] $2s^2 2p^5$, конфігурація $1s^2 2s^2 2p^5$, радіус атома 74 пм, ковалентний радіус 72 пм, радіус іона ($-1e$) 133 пм, електровід'ємність 3,98 (шкала Полинга), електронний потенціал 2,87 В, ступінь окиснення 1,0, енергія іонізації (газовий електрон 1680,0 (17,41) кДж/моль (еВ), густина $1,696 \text{ кг/м}^3$, молярна теплоємність $31,34 \text{ Дж/К}\cdot\text{моль}$, коефіцієнт теплопровідності $0,028 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Є самим активним неметалом та взаємодіє майже з усіма речовинами (крім фторидів у вищих ступенях окиснення та рідкісних виключень – фторопластів), при цьому з більшістю з них – з горінням та вибухом. Утворює з'єднання з усіма хімічними елементами, крім гелію та неону. До взаємодії фтору при кімнатній температурі (293...300 К) стійкі деякі метали за рахунок утворення на їх поверхні щільної плівки фториду, що гальмує реакцію, наприклад, Al, Mg, Cu, Ni та ін.; при цьому для початку реакції достатньо невеликого нагріву ($> 300\ldots 400 \text{ К}$). Фтор не реагує з гелієм, неоном, аргоном, киснем, а при контакті з воднем – відбувається займання та вибух. У атмосфері фтору горять навіть вода та платина.

Таблиця 2.19 – Основні теплофізичні властивості фторопластів Ф – 3 та Ф – 4

Властивості \ Марка фторопласту	Ф – 3	Ф – 4
Густина ρ_f , 10^3 кг/м^3	2,05...2,16	2,15...2,24
Граничне напруження при розтягу σ_p^* , МПа	35...43	16...35
Граничне напруження при стисненні σ_c^* , МПа	55...60	10...12
Граничне напруження при згині, σ_z^* , МПа	60...82	14...18
Температура плавлення $T_{пл}^f$, К	483...488	543...600
Температура розкладання T_p^f , К	593	698
Питома теплоємність c_f , кДж/кг·К	1,14	1,04
Коефіцієнт теплопровідності λ_f , Вт/м·К	0,18	0,25
Коефіцієнт лінійного термічного розширення k_f , 10^{-5} К^{-1}	5...19	8...25
Питома в'язкість H_f , кДж/м ²	92	98

2.3. Характеристики зразків ущільнених сумішей

Зразки піротехнічних сумішей формувалися із застосуванням типових технологій пресування порошкоподібних компонентів, до складу яких входили порошки окиснювачів (фторопласти (Ф-3 та ін.)), металеві пальні (Mg, Al та ін.), а також широкий спектр органічних і неорганічних добавок, зокрема парафін, тіокол, уротропін, стеарин, ЕД-5, СКН-10-1, MnO_2 , Ni_2O_3 , KMnO_4 , V_2O_5 , CuO , Cr_2O_3 та інші речовини [6, 74].

Це необхідно для отримання заданої густини спресованого зразка. При цьому коефіцієнт ущільнення $K_y = \frac{\rho_c}{\rho_{\max}}$ (ρ_c – густина зразка (досягнута), $\rho_{\max}$ – максимально можлива густина зразка) для зразків, що розглядаються, складає 0,95....0,96, тобто зразки сумішей, що використовуються, мали практично максимальні значення K_y і були газонепроникними.

У практичній діяльності співвідношення компонентів у піротехнічних сумішах кількісно оцінюється за допомогою коефіцієнта надлишку окиснювача, який відображає ступінь відхилення складу даної суміші від стехіометричного співвідношення реагуючих компонентів:

$$\alpha = \frac{\xi_{ок}}{\xi_m \cdot l_c}, \quad (2.17)$$

де ξ_m , $\xi_{ок}$ – відносні масові вмісти у суміші відповідно металевих палих та окиснювача; l_c – стехіометричний коефіцієнт (наприклад, для суміші Mg + Ф-3 – $l_c \approx 0,59$, а для суміші Al + Ф-3 – $l_c \approx 2,2$ [6, 74]). При цьому суміші з $\alpha < 1$ вважаються перебагаченими металевим палим, при $\alpha > 1$ – перебагаченими окиснювачем, а у випадку $\alpha = 1$ – суміш є стехіометричною. Дисперсність промислових порошків окиснювачів та металевих палих оцінювалася за середніми розмірами частинок відповідно окиснювачів $d_{ок}$ (мкм) та металевих палих d_m (мкм), що розраховувалися за загальноприйнятими методиками піротехнічної

промисловості. Для досліджень використовувалися зразки сумішей різного діаметру D (м) як без оболонок, так і в оболонках з різних матеріалів (мідь, сталь, картон). При цьому товщина оболонок складала $\Delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \dots 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, висота зразків $h = (1,5 \dots 2,0) \cdot D$.

В результаті проведених експериментальних досліджень для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту органічних та неорганічних речовин ε , середнього розміру частинок порошків металевго пального d_m (мкм) та окиснювача $d_{ок}$ (мкм), коефіцієнта ущільнення K_v , D (м) та матеріалу оболонки, а також зовнішніх чинників (температури нагріву T_0 (К), зовнішнього тиску P (Па)) для сумішей були визначені їх концентраційні межі горіння $\alpha_{ВМГ}$ та $\alpha_{НМГ}$ ($\alpha_{ВМГ}$ – верхня концентраційна межа горіння (максимально припустимий вміст металевго пального у суміші, при якому процес горіння ще має стійкий характер), $\alpha_{НМГ}$ – нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст окиснювача у суміші, при якому процес горіння не затухає).

Для знаходження концентраційних меж горіння (меж горіння по α): верхніх концентраційних меж горіння $\alpha_{ВМГ}$ і нижніх концентраційних меж горіння $\alpha_{НМГ}$ ($\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$) використовувались перехідні суміші, що складаються з тих же компонентів, що і основні, але з меншим надлишком металевго пального (при знаходженні $\alpha_{ВМГ}$) або з його великим вмістом (при знаходженні $\alpha_{НМГ}$). При цьому для визначення $\alpha_{ВМГ}$ (аналогічно $\alpha_{НМГ}$) використовувалась наступна формула [6, 74]

$$\xi_{ВМГ} = \frac{\xi_{m1} + \xi_{m2}}{2}, \quad (2.18)$$

де ξ_{m1} – відносний масовий вміст металевго пального, при якому вже не горить жоден з узятих для дослідження зразків; ξ_{m2} – відносний масовий вміст металевго пального, при якому ще згоряють усі зразки; $\xi_{ВМГ}$ – відносний масовий вміст металевго пального у системі, відповідний $\alpha_{ВМГ}$.

2.4. Методики досліджень та обладнання, що моделюють процеси займання та розвитку горіння зразків сумішей в умовах зовнішніх термічних дій

Нижче представлено сучасні методики експериментальних та теоретичних досліджень, а також стандартне піротехнічне обладнання [6, 7, 11, 13, 74, 39, 104, 108], призначені для моделювання впливу основних параметрів зовнішніх термічних дій — підвищених температур нагріву (до 800 K) та зовнішніх тисків (до $3 \cdot 10^7$ Па) — на піротехнічні вироби, а також на процеси їх займання та розвитку горіння піротехнічних сумішей.

Методичні основи експериментальних і теоретичних досліджень базувалися на результатах попередніх робіт, присвячених проблемам займання та горіння піротехнічних сумішей [6, 11, 39, 74, 104, 108]. Для ініціювання горіння зразків застосовувалися ніхромові спіралі двох конструктивних типів — циліндричні та плоскі, а також навішування зернених спалахних складів, розміщені у спалахній камері пірогенного типу, сопло якої було спрямоване на поверхню зразка, або у перкалевому мішечку безпосередньо біля його торця. Як зернені навішування використовувалися спеціальні піротехнічні склади, димний порошок ДРП або гвинтівковий порошок ВТ. При цьому встановлено, що час займання та поширення полум'я по поверхні зразка при використанні ніхромових спіралей у 1...3 рази перевищує відповідні значення, отримані при застосуванні навішувань.

Визначення лінійної швидкості горіння u (м/с) зразків сумішей здійснювалося із застосуванням безконтактних методів, широко впроваджених у піротехнічній практиці, на основі стандартних датчиків оптичного та теплового випромінювання, які забезпечували реєстрацію моментів початку та завершення горіння зразка висотою h . Середнє значення швидкості горіння обчислювали за співвідношенням $u = \frac{h}{\tau}$,

де τ – середній час згоряння зразка. Відносна похибка вимірювання швидкості горіння u не перевищувала 5...7 %.

У ході експериментальних досліджень застосовувався комплекс відомих методів фізико-хімічного аналізу [6, 11, 39, 74, 104, 108]: термопарні методи вимірювання температури горіння з використанням вольфрам-рениевих термопар, оснащених спеціальними захисними екранами для запобігання налипанню конденсованих продуктів згоряння; безконтактні методи фіксації моментів початку та закінчення горіння суміші (температурні індикатори, фоточутливі елементи тощо); а також методи кінозйомки та мікрокінозйомки процесів горіння сумішей і окремих частинок металу з використанням кінокамери «Конвас-автомат» зі швидкістю зйомки 30 кадр/с та камери СКС-1М зі швидкістю 3000...5000 кадр/с із масштабним зменшенням у 1,5...2 рази [6, 74].

У теоретичних дослідженнях застосовувалися сучасні методи математичного моделювання, зокрема чисельно-аналітичні підходи до розв'язання задач нелінійної теплопровідності (інтегральні перетворення Фур'є, чисельні методи розв'язання нелінійних рівнянь, обчислення інтегралів та інші), а також методи математичної обробки експериментальних даних, такі як регресійний та інтерполяційний аналіз [8].

Усі розрахунки за запропонованими моделями виконувалися в інтерактивному режимі на сучасних персональних комп'ютерах із використанням стандартних пакетів прикладних програм [6, 8, 74].

Стандартне піротехнічне обладнання, призначене для моделювання впливу основних параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні вироби, дозволяє досліджувати ефект різних джерел теплового випромінювання. Для імітації теплового впливу від різних вогнищ пожежі застосовувалися керовані ІЧ-нагрівачі з кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 із використанням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури поверхні виробів у діапазоні 300...1900 К [6, 8].

Для дослідження впливу підвищених температур нагріву (до 873 K) та зовнішніх тисків (до $3 \cdot 10^7$ Па) на процес займання та швидкість розвитку горіння сумішей використовувалася спеціалізована установка, призначена для одночасного спалювання трьох зразків. Точність підтримки робочого тиску в установці складає $\pm 5\%$.

Установка включає прилад постійного тиску та систему нагріву, терморегулювання і реєстрації температури. Прилад постійного тиску (рис. 2.3) складається з трьох камер згорання, об'єднаних у єдиний блок, який з'єднаний із корпусом рідинного фільтра, заповненого водою перед випробуванням. Термостатування зразків проводиться безпосередньо у камерах згорання до початку спалювання. Під час експерименту прилад наддувається інертним газом, а всі три зразки запалюються одночасно. Продукти згорання, охолоджені та очищені від конденсованих частинок у рідинному фільтрі, надходять до клапана постійного тиску, який керується стислим газом.

Камера згорання (рис. 2.4) складається з корпусу 1, сполученого патрубком із загальною кришкою блоку камер. У тій частині камери, де розташований зразок 5, встановлюється знімний електронагрівач 3. Електронагрівач виконаний у вигляді ніхромової спіралі, розміщеної в ізоляційній кераміці. Корпус нагрівача зварний, герметичний, виготовлений з нержавіючої сталі. Простір між корпусом і спіраллю заповнений азбестовим набиванням. До нагрівального елемента підводиться змінна напруга 100–200 В. Задня кришка камери обладнана різьбленням для встановлення фотодатчика, який фіксує момент закінчення горіння зразка через отвір у донному бронюванні. Напроти зразка, у частині камери, що не піддається термостатуванню, передбачено місце для монтажу пірогенного запальника, змонтованого на вузлі електроконтактів 6.

Для контролю та регулювання температури термостатування у корпусі камери закріплена ХА-термопара, з'єднана із системою терморегулювання, виконаною на базі електронного регулюючого потенціометра ЕПР-09МЗ. Електронний регулюючий потенціометр є ключовим елементом системи: він забезпечує послідовну реєстрацію температури в трьох камерах установки на діаграмній стрічці та видачу електричних сигналів для включення або вимкнення нагрівальних елементів при досягненні заданих значень температури.

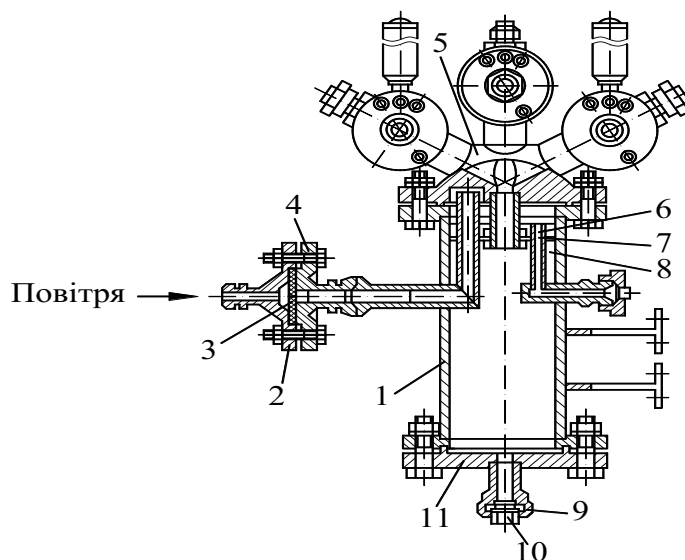


Рисунок 2.3 – Установка: 1 – корпус фільтра; 2 – кришка клапана; 3 – мембрана; 4 – корпус клапана; 5 – блок камер згорання; 6 – зливний патрубок; 7 – механічний дисковий фільтр; 8 – вода; 9 – гайка; 10 – заглушка; 11 – кришка фільтра.

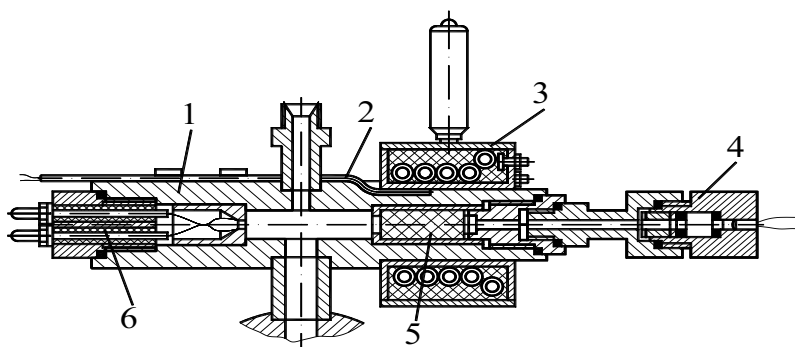


Рисунок 2.4 – Камера згорання установки: 1 – корпус камери; 2 – термопара; 3 – нагрівач; 4 – фотодатчик; 5 – зразок суміші; 6 – вузол електроконтактів із запальником.

Точність підтримання температури термостатування становить близько 2 %. Для створення попереднього наддування перед спалюванням зразків установка оснащена відповідною пневмосистемою, до складу якої входять пневмоциліндр, редуктори, балонна батарея та допоміжні елементи. Можливість одночасного спалювання трьох зразків в ідентичних умовах експерименту забезпечує зниження похибки визначення швидкості горіння до рівня 2–3 %.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено загальну методику проведення теоретичних і експериментальних досліджень процесів нагріву, займання та розвитку горіння ущільнених сумішей на основі порошків магнію, алюмінію та фторопластів під дією зовнішніх термічних впливів, характерних для пожеж у складських приміщеннях, під час транспортування та експлуатації піротехнічних виробів.
2. Виконано систематизацію та аналіз ключових фізико-хімічних властивостей порошків металевих палив (Mg, Al) та фторопластів (Ф-3, Ф-4), а також пресованих зразків їх сумішей, що є необхідною базою для теоретичного моделювання та інтерпретації експериментальних даних.
3. Для проведення досліджень застосовувався керований комплекс стандартного піротехнічного обладнання, який дозволяє моделювати зовнішні теплові впливи на піротехнічні вироби різних осередків пожежі за допомогою ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 із контролем температури на поверхні виробів за допомогою термодатчиків РИФ-101 у діапазоні 300...1900 К. Крім того, комплекс забезпечує моделювання процесів займання та розвитку горіння зразків сумішей на основі порошків металевих палив та фторопластовмісних окиснювачів в умовах підвищених температур нагріву (до 873 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па), що дозволяє прогнозувати можливі передчасні пожежно-вибухонебезпечні спрацьовування виробів при екстремальних зовнішніх впливах.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВУ, ЗАЙМАННЯ ТА РОЗВИТКУ ГОРІННЯ ДВОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ З ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ ТА ФТОРОПЛАСТІВ

У цьому розділі представлені результати досліджень з визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів (теплових потоків, часу їх дії тощо), перевищення яких спричиняє передчасне займання сумішей, вибухонебезпечне прискорення процесу їх горіння та пожежонебезпечне руйнування піротехнічних виробів на їх основі [93, 96, 99, 101, 134, 135, 138, 139].

Аналіз фізико-хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння сумішей, дозволив встановити механізм їх горіння та сформулювати математичну модель, яка описує поведінку цих сумішей під дією зовнішніх термічних дій. Модель дає змогу розрахунковим шляхом визначати вибухонебезпечні режими горіння у заданих умовах.

Достовірність математичних моделей перевіряється шляхом зіставлення результатів розрахунків із наявними експериментальними даними, а також з результатами отриманих даних (див. розділ 4).

Усі розрахунки впливу параметрів зовнішніх термічних дій на поверхню зарядів сумішей та швидкість розвитку їх горіння виконувались на сучасних персональних комп'ютерах у режимі діалогу та реального часу з використанням необхідних фізико-технічних характеристик і стандартних пакетів прикладних програм.

3.1. Математичні моделі процесів зовнішніх термічних дій на зразки сумішей

Плоско-паралельний зразок суміші. При зовнішній тепловій дії на поверхню зразка поступає рівномірно розподілений тепловий потік $q_n(t)$

(рис. 3.1). При цьому розглядається зразок, для якого $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

(одномірність розподілу тепла углиб зразка), а також враховується теплообмін на нижньому його боці. Також вважається, що тепловтрати за рахунок випромінювання знехтувано малі (внаслідок малих значень температури поверхні заряду (не більше 1100...1300 К [6, 74])).

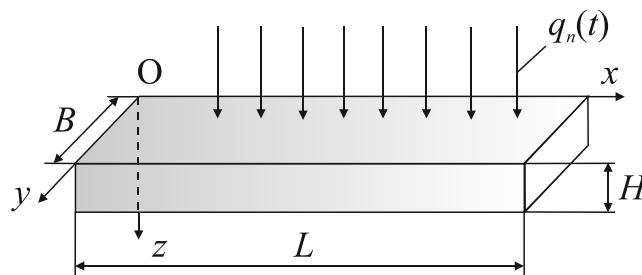


Рисунок 3.1 – Схема нагрівання зразка суміші зовнішньою тепловою дією: B , H , L – ширина, товщина та довжина зразка, м; $B < L$, $H < B$; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м².

Таким чином, розглядається така одномірна, нестационарна та нелінійна математична модель поверхневого нагріву зразка [6, 8]:

$$C_V(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right), \quad 0 < z < H, \quad t > 0, \quad (3.1)$$

$$T(z,t)|_{t=0} = T_0, \quad (3.2)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = q_n(t), \quad (3.3)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (3.4)$$

де $T(z,t)$ – температура в різних точках z по товщині пластини в різні моменти часу t , T_0 – початкова температура пластини, К.

Для знаходження розв'язку задачі (3.1) – (3.4) врахуємо залежності об'ємної теплоємності $C_V(T)$ і коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$ сумішей [6, 74]:

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^\nu, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu, \quad (3.5)$$

де C_{V0} , λ_0 , ν – емпіричні константи.

Зробимо заміну змінних

$$\theta(z, t) = T(z, t)^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}. \quad (3.6)$$

Одержуємо систему рівнянь

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2}, \quad (3.7)$$

$$\theta(z, t) \Big|_{t=0} = 0, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \bar{q}_n(t), \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (3.10)$$

$$\text{де} \quad \bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t), \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}. \quad (3.11)$$

Для розв'язання системи рівнянь (3.7) – (3.11) використовуємо стандартне косинус-перетворення Фур'є [8] та, у підсумку, отримуємо для функції $\theta(z, t)$ наступний вираз:

$$\begin{aligned} \theta(z, t) = & \frac{a_0^2}{H} \cdot \int_0^t \bar{q}_n(\tau) d\tau + \frac{2 \cdot a_0^2}{H} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H} \cdot \\ & \cdot \left(\int_0^t \bar{q}_n(\tau) \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot (t-\tau)} d\tau \right). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Для випадку $\bar{q}_n(t) = q_{n0} = \text{const}$ вираз (3.12) спрощується:

$$\theta(z, t) = \bar{q}_{n0} \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} \right].$$

$$\cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \cdot \left. \right]. \quad (3.13)$$

Враховуючи (3.6) та $\bar{q}_n = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_{n0}$ ($q_{n0} = const$), остаточно, отримуємо

$$T(z,t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 \cdot t} \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (3.14)$$

Як показали попередні розрахунки, ряд у виразі (3.14) швидко сходиться по n . Тому у розрахунках з прийнятною для практики точністю можна обмежитись 4...5 членами ряду.

Зразок суміші у вигляді бруска малої товщини. Розглядається зразок, для якого виконуються такі умови: $\delta < L$, $\delta \approx H$ та $\delta > B$, тобто $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (двовірне температурне поле $T(x,z,t)$); при цьому середовище уздовж осі Oz розглядається як обмежене, тобто враховується теплообмін на нижньому його боці (рис. 3.2). При відсутності конвективних та радіаційних тепловтрат з поверхонь бруска зазначений теплообмін при $z = H$ збігається з умовою адіабатичності теплового процесу.

Рівняння математичної моделі процесу нагрівання зразка малої товщини мають вигляд [6, 8]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

$$t > 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad 0 < z < H, \quad (3.15)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.16)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (3.17)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (3.18)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty. \quad (3.19)$$

З урахуванням залежностей $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ маємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (3.20)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (3.21)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (3.23)$$

де

$$\theta = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t). \quad (3.24)$$

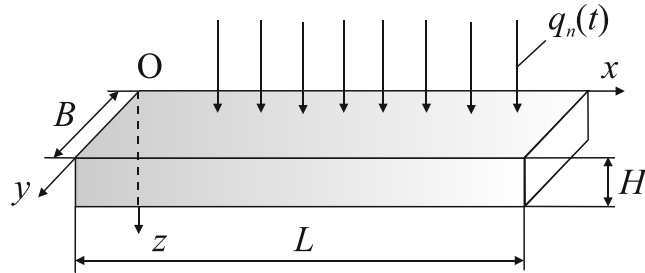


Рисунок 3.2 – Схема нагрівання зразка різної товщини зовнішньою тепловою дією: B , H , L – ширина, товщина та довжина зразка, м; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м².

Використовуючи метод інтегральних перетворень Фур'є (по координаті x) і метод поділу змінних (по координаті z) [8] та враховуючи (3.18) для $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$, одержуємо

$$T(x, z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \frac{d\tau}{t-\tau} \cdot \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{H} \right)^2 \cdot (t-\tau)} \right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (3.25)$$

Зразок суміші у вигляді бруска великої товщини. Для розглядуваного зразка великої товщини виконуються такі умови: H і $\delta > B$, тобто $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (двовірне температурне поле $T(x, z, t)$); при цьому середовище уздовж осі Oz розглядається як напівнескінченне (див. рис. 3.2).

Рівняння математичної моделі процесу нагрівання бруска великої товщини мають вигляд [8]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

$$t > 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad 0 < z < +\infty, \quad (3.26)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.27)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (3.28)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad z \rightarrow +\infty. \quad (3.29)$$

Використовуючи залежності $C_V(T)$ і $\lambda(T)$, одержуємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (3.30)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (3.31)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (3.32)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad z \rightarrow +\infty, \quad (3.33)$$

де

$$\theta = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t). \quad (3.34)$$

Для розв'язання системи рівнянь (3.30) – (3.33) використовуємо методи інтегральних перетворень Фур'є (спочатку по координаті x , а потім по координаті z), а також, з врахуванням (3.34) та $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$, одержуємо:

$$T(x, z, t) = \left[T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^{t+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x-\xi)^2 + z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}}}{t-\tau} d\tau d\xi \right]^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (3.35)$$

Зразок суміші у вигляді прямокутного елемента малої товщини. Розглядаються зразки малої товщини: $\delta \approx H$, $\delta < B, L$, тобто маємо тривимірне температурне поле $T(x, y, z, t)$. При цьому глибина проникнення теплової хвилі у зразок порівнянна з його товщиною, тобто необхідно враховувати умови теплообміну на нижньому боці ($z = H$) його поверхні, які збігаються з умовами адіабатичності (рис. 3.3).

Рівняння математичної моделі процесу нагрівання зазначеного елемента мають вигляд [8]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

$$-\infty < x, y < +\infty, \quad 0 < z < H, \quad (3.36)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.37)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (3.38)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (3.39)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty. \quad (3.40)$$

З огляду на залежності $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ та заміну змінних (3.24), одержуємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (3.41)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (3.42)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (3.44)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty. \quad (3.45)$$

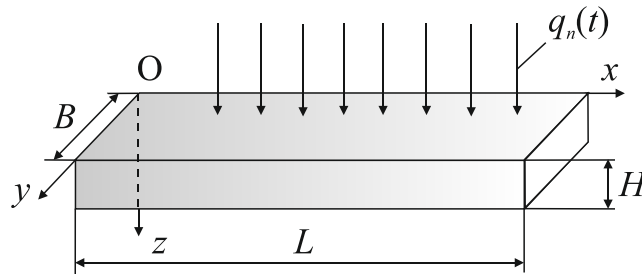


Рисунок 3.3 – Схема нагрівання зразка суміші різної товщини зовнішньою тепловою дією: B, H, L – ширина, товщина та довжина елемента, м; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м².

Розв'язуючи задачу (3.41) – (3.45) за допомогою інтегральних перетворень Фур'є (по координатах x та y) і методу поділу змінних (по координаті z) [8], а також з врахуванням $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$, одержуємо:

$$T(x, y, z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{8 \cdot \pi^{\frac{3}{2}} \cdot a_0 \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{H}\right)^2 \cdot (t-\tau)} \right] \cdot \frac{1}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi d\eta \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (3.46)$$

Зразок суміші у вигляді прямокутного елемента великої товщини. Розглядаються зразки суміші великих розмірів: $\delta < H, B, L$, тобто маємо тривимірне температурне поле $T(x, y, z, t)$. У цьому випадку глибина проникнення теплової хвилі у зразок набагато менша його товщини, тобто зразок можна розглядати як напівобмежене середовище в напрямку осі Oz (див. рис. 3.3).

Рівняння математичної моделі процесу нагрівання розглядуваного елемента мають вигляд:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

$$-\infty < x, y < +\infty, \quad z > 0, \quad (3.47)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.48)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (3.49)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow +\infty. \quad (3.50)$$

З урахуванням залежностей $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ маємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (3.51)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (3.52)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(x), \quad (3.53)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y}, \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow +\infty, \quad (3.54)$$

де

$$\theta = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t). \quad (3.55)$$

Для розв'язання задачі (3.51) – (3.54) використовуємо методи інтегральних перетворень Фур'є (по координатах x , y і z) [8], а також з врахуванням $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$, одержуємо:

$$T(x, y, z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{8 \cdot \pi^{\frac{3}{2}} \cdot a_0 \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \frac{d\tau}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi d\eta \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (3.56)$$

Результати розрахунків, представлених у якості прикладу для плоско-паралельних зразків сумішей на рис. 3.4, 3.5, показують, що температура поверхні заряду суміші, сильно залежить від величини зовнішнього теплового потоку та часу його впливу на поверхню зразка.

При цьому, зростання величини q_n в діапазоні $1,8 \cdot 10^5 \dots 3,4 \cdot 10^6$ Вт/м² призводить до збільшення температури поверхні зразка T_n у 2,4...3,6 разу для $t = 15 \dots 30$ с, а збільшення t до 70...90 с та більше веде до зростання T_n більше, ніж у 4...9 разів (розходження між розрахунковими даними та результатами експериментальних досліджень знаходяться в межах 6...8 %).

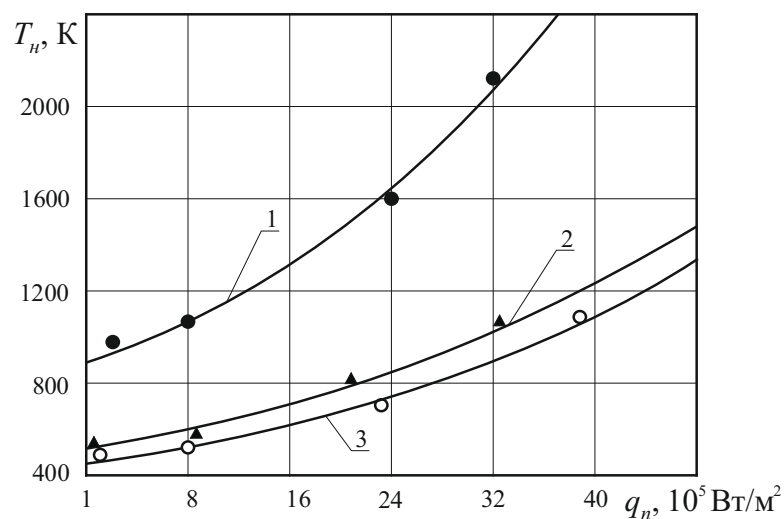


Рисунок 3.4 – Залежність температури поверхні зразка від величини зовнішнього теплового потоку для різних значень часу теплового впливу ($T_0 = 293 \text{ K}$; $H = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$): 1 – $t = 84 \text{ с}$; 2 – $t = 45 \text{ с}$; 3 – $t = 35 \text{ с}$; ●, ○, ▲ – експериментальні дані [6, 74].

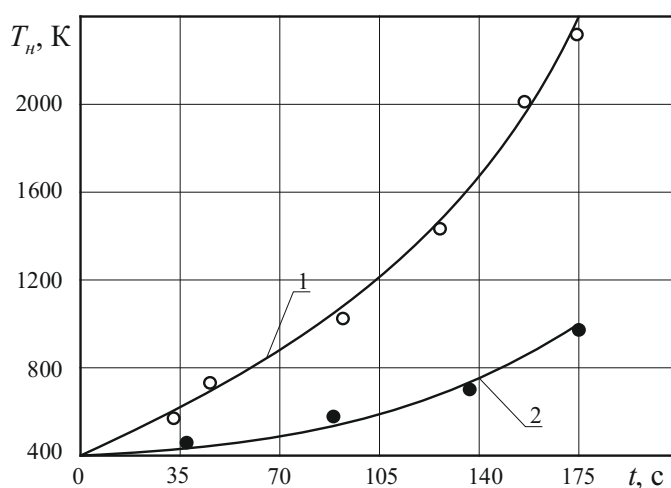


Рисунок 3.5 – Залежність температури поверхні зразка від величини часу зовнішньої термічної дії для різних значень теплового потоку ($T_0 = 293 \text{ K}$; $H = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$): 1 – $q_n = 3,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; ●, ○ – експериментальні дані [6, 74]).

3.2. Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, перевищення яких призводить до передчасного загоряння зразків сумішей та пожежонебезпечних руйнувань виробів

В якості пожежонебезпечних термодій на поверхню виробів з зарядами сумішей в умовах їх зберігання, транспортування приймаються дії, що мають критичні значення параметрів (значення зовнішніх теплових потоків від джерел тепла ($q_{nj}, j = 1, 2, \dots$) та часів їх теплового впливу ($t_j^*, j = 1, 2, \dots$), значення критерію Рейнольдса Re), при яких температура поверхонь зарядів сумішей задовольняє наступній умові:

$$T_n > T_3^{(i)}, i = 1, 2, \quad (3.57)$$

де T_n – температура поверхні зразка суміші; $T_3^{(i)}$ – температура, при якій починається саморозігрів заряду сумішей в результаті процесу екзотермічного окислення металевго пального в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (так звана температура займання частинок металів в активних газоподібних продуктах (див. розділ 1), яка залежить, як від технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності), так й від зовнішніх чинників (температури, тиску)); при цьому індекс “ i ” відповідає порядковому номеру суміші у формулах (3.58) – (3.59) (див. нижче). Виконання умов (3.57) призводить до швидкого спалахування заряду суміші (в межах $0^{-4} \dots 10^{-3}$ с) з подальшим прискоренням процесу його горіння з вказуванням різкого підвищення температури нагріву та тиску навколишнього середовища, що призводить до передчасного спрацьовування виробів та пожежонебезпечного руйнування окремих частин їх корпусів та викиду в навколишнє середовище високотемпературних (до $2500 \dots 3500$ К [6, 74]) продуктів згоряння сумішей, а також нагрітих залишків корпусів та частин зарядів, що не згоріли, які здатні займатися та руйнувати навколишні об’єкти.

Визначення діапазоні зміни критичних значень параметрів q_{nj} та t_j^ для заряду суміші. Експериментально було встановлено наступні діапазони*

зміни температури займання T_3 частинок Mg та Al у активних газоподібних продуктах розкладання окиснювача (фторопласт $\Phi - 3$), які характерні для подальшого розвитку стійкого, не вибухонебезпечного їх горіння ($P = 10^5$ Па):

для суміші $Mg + \Phi - 3$:

$$T_3 = 1150 \dots 1370 \text{ К} (56 \text{ мкм} \leq d_m \leq 305 \text{ мкм}); \quad (3.58)$$

для суміші $Al + \Phi - 3$:

$$T_3 = 1340 \dots 1550 \text{ К} (54 \text{ мкм} \leq d_m \leq 310 \text{ мкм}). \quad (3.59)$$

Порівнюючи отримані вище діапазони температури T_{n1} з вказаними діапазонами зміни температур $T_3^{(i)}$ ((3.58), (3.59)) можна встановити, що, дійсно, тільки при певних значеннях розглядуваних параметрів зовнішніх термодій (q_{n1j} ($j = 1, 2, \dots$)) та t_j^* ($j = 1, 2, \dots$)) значення температури T_{n1} починають перевищувати $T_3^{(i)}$ (рис. 3.6, 3.7). Зокрема, з результатів, представлених на рис. 3.6, 3.7, випливає, що пожежонебезпечні термодії на поверхню заряду суміші визначаються природою сумішей та матеріалом оболонки (табл. 3.1).

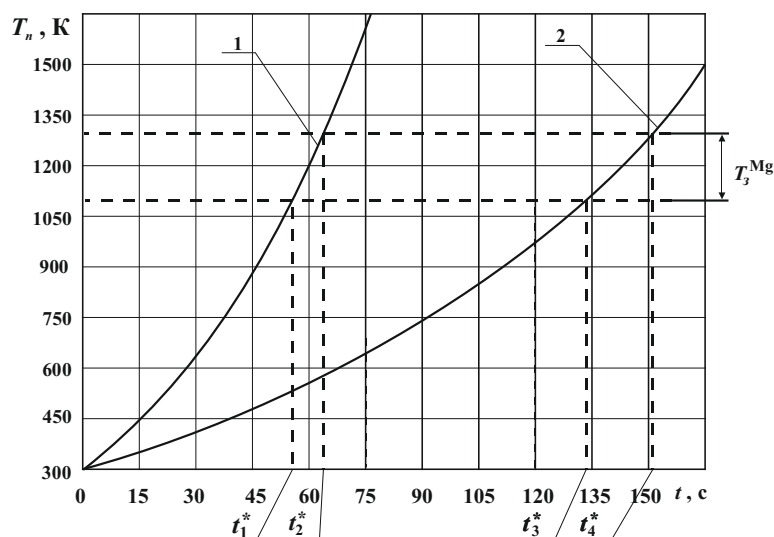


Рисунок 3.6 – Значення q_{nj} та t_j^* для заряду суміші $Mg + \Phi - 3$:

$$1 - q_{n1} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2; \quad 2 - q_{n2} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

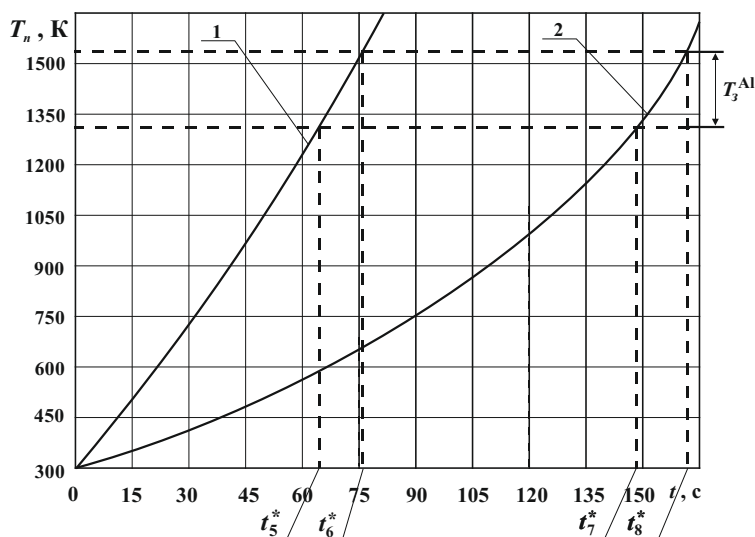


Рисунок 3.7 – Значення q_{nj} та t_j^* для заряду суміші А1 + Ф – 3:

$$1 - q_{n1} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2; 2 - q_{n2} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким чином, важливо на стадії проектування та стендових випробувань виробів, що моделюють вказані зовнішні термодії, вміти прогнозувати критичні значення параметрів зовнішніх термодій, а також технологічних параметрів, що характеризують заряд суміші та суттєво впливають на температуру займання частинок металів в газоподібних продуктах розкладання окиснювача, перевищення яких призводить до передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування виробів. При цьому збільшення T_3 (наприклад, за рахунок використання більш дрібнодисперсних металевих порошків) може призводити до зростання критичних часів спрацьовування піротехнічних виробів в умовах вимушених зовнішніх термодій у декілька разів, тобто регулюючи технологічними параметрами зарядів сумішей на стадії їх виготовлення можна у декілька разів підвищувати час для гасіння пожежі, що виникла, наприклад, у складському приміщенні протипожежними засобами, що є в наявності.

Таблиця 3.1 – Діапазон зміни критичних значень зовнішніх теплових потоків q_{nj}^* ($j = 1, 2, \dots$) та часів їх дії t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) на заряд суміші

Параметр Суміш	q_{nj}^* , Вт/м ²	t_j^* , с
Mg + Ф – 3	$3,4 \cdot 10^6$	$t_1^* > 43$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{min} = 1150$ К
		$t_2^* > 64$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{max} = 1370$ К
	$1,8 \cdot 10^5$	$t_3^* > 34$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{min} = 1150$ К
		$t_4^* > 153$ при $T_n > (T_3^{Mg})_{max} = 1370$ К
Al + Ф – 3	$3,4 \cdot 10^6$	$t_5^* > 58$ при $T_{n1} > (T_3^{Al})_{min} = 1340$ К
		$t_6^* > 76$ при $T_n > (T_3^{Al})_{max} = 1530$ К
	$1,8 \cdot 10^5$	$t_7^* > 149$ при $T_n > (T_3^{Al})_{min} = 1340$ К
		$t_8^* > 163$ при $T_n > (T_3^{Al})_{max} = 1530$ К

3.3. Дослідження впливу технологічних чинників та зовнішніх умов на температуру та вміст конденсованих продуктів згорання сумішей

Термодинамічні розрахунки максимальної температури продуктів згорання сумішей Al + Ф – 3 (T_{max} , К) та відносного вмісту у них високотемпературного конденсату (g_k) проводили при тисках $P = 10^5 \dots 10^7$ Па, коефіцієнтах надлишку окиснювача $\alpha = 0,5 \dots 1,5$ (в межах стійкого горіння), вмістах добавки органічної речовини $\varepsilon = 5 \dots 20$ %.

За даними розрахунків температура продуктів згорання сумішей суттєво залежить від співвідношення компонентів та тиску і має максимум $T_{max} = 4050 \dots 5260$ К, що знаходиться у області $\alpha = \alpha_{T_{max}} = 0,95 \dots 1,03$ (рис. 3.8, 3.9). З розрахункових даних по впливу добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну та антрацену) на максимальну температуру згорання сумішей випливає, що збільшення вмісту добавки у складі вихідної суміші від 5 % до 20 % призводить до зменшення максимальної температури у 1,8...2,1 раза; при цьому збільшення тиску від 10^5 Па до 10^7 Па сприяє збільшенню значень T_{max} у 1,31...1,42 раза та підсиленню залежності

$T_{\max}(\varepsilon)$. Встановлено, що із зростанням зовнішнього тиску від $P = 10^5$ до $P = 10^7$ Па відбувається збільшення відносного масового вмісту високотемпературного конденсату у продуктах згоряння суміші (рис. 3.10, 3.11): у 1,19...1,45 разу – для добавок парафіну; у 1,21...1,41 разу – для добавок стеарину; у 1,22...1,49 разу – для добавок нафталіну; у 1,4...1,51 разу – для добавок антрацену. При цьому для усіх зовнішніх тисків $P = 10^5...10^7$ Па збільшення вмісту добавки у суміші суттєво впливає на характер залежності $g_k(\varepsilon)$ (рис. 3.12, 3.13): при зростанні ε значення g_k спочатку зменшуються при значеннях ε до $\varepsilon_{\min} = 0,07...0,12$, а потім зростають при значеннях ε до $\varepsilon = 0,2$.

Таким чином, відносний масовий вміст конденсату у продуктах згоряння суміші має мінімум $g_{k\min}$ при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$, який залежить як від природи добавки, так й від зовнішнього тиску (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 –Значення $g_{k\min}$ для добавок органічних речовин у склад суміші для різних зовнішніх тисків ($\alpha = 1,0$)

Зовнішній тиск $P, 10^5$ Па	1	10	50	100
Органічна речовина				
Парафін	0,3993	0,4236	0,4783	0,4891
Стеарин	0,3981	0,4455	0,4892	0,5286
Нафталін	0,3693	0,4257	0,4586	0,4796
Антрацен	0,4705	0,3797	0,4537	0,4745

Також отримано, що вплив тиску на характер залежності $g_k(\varepsilon)$ наступний: як при $\varepsilon < \varepsilon_{\min}$, так й при $\varepsilon > \varepsilon_{\min}$ збільшення зовнішнього тиску призводить до підсилення залежності $g_k(\varepsilon)$.

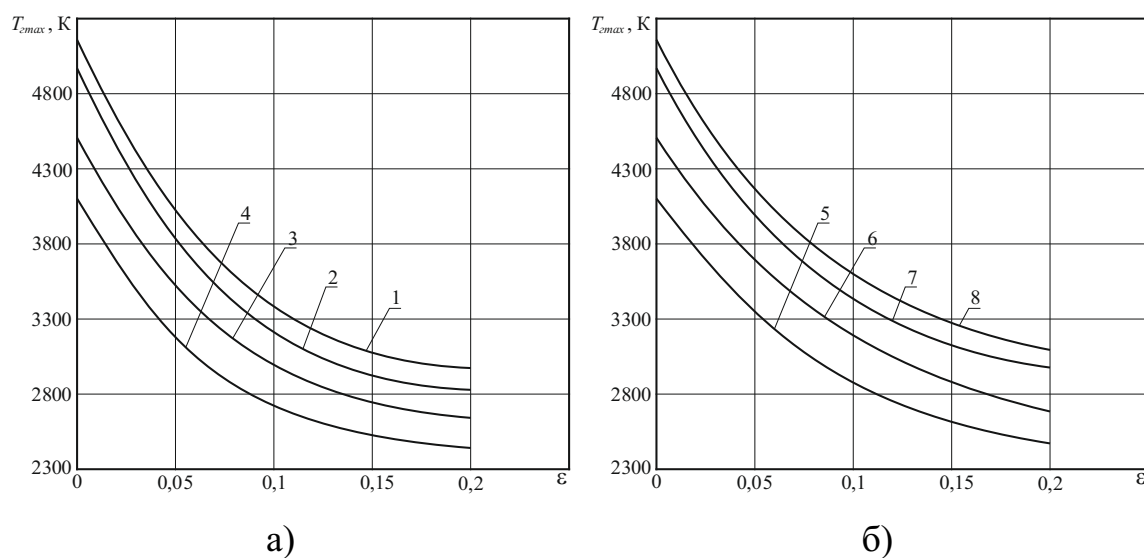


Рисунок 3.8 – Залежності максимальної температури T_{max} продуктів згоряння суміші від величини добавки парафіну (а) та стеарину (б): а) – 1 – $P = 10^7$ Па; 2 – $P = 5 \cdot 10^6$ Па; 3 – $P = 10^6$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; б) – 5 – $P = 10^5$ Па; 6 – $P = 10^6$ Па; 7 – $P = 5 \cdot 10^6$ Па; 8 – $P = 10^7$ Па.

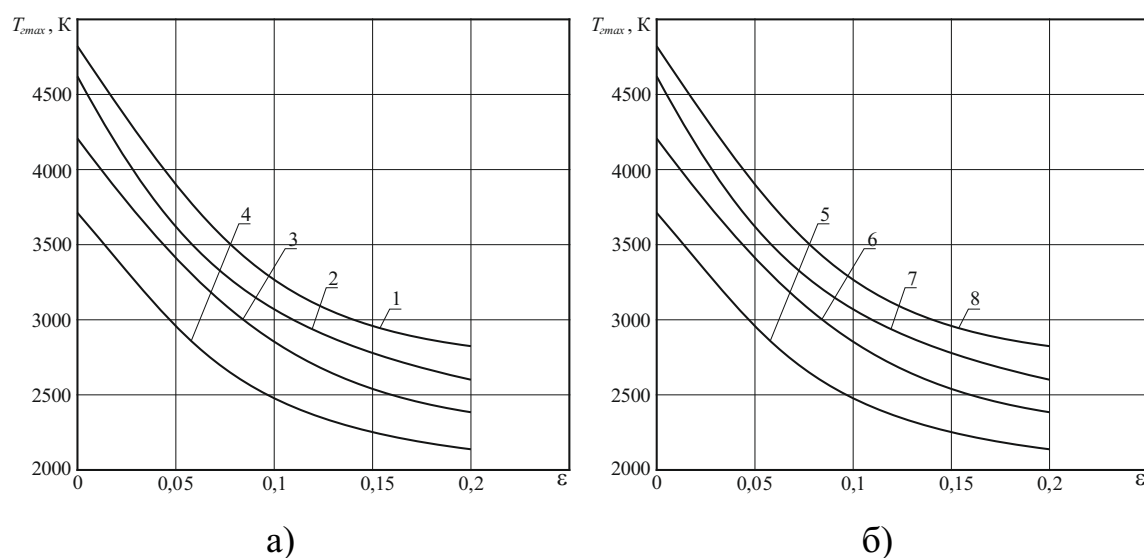


Рисунок 3.9 – Залежності максимальної температури T_{max} продуктів згоряння суміші від величини добавки нафталіну (а) та антрацену (б) ($\alpha = 1$): а) – 1 – $P = 10^7$ Па; 2 – $P = 5 \cdot 10^6$ Па; 3 – $P = 10^6$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; б) – 5 – $P = 10^5$ Па; 6 – $P = 10^6$ Па; 7 – $P = 5 \cdot 10^6$ Па; 8 – $P = 10^7$ Па.

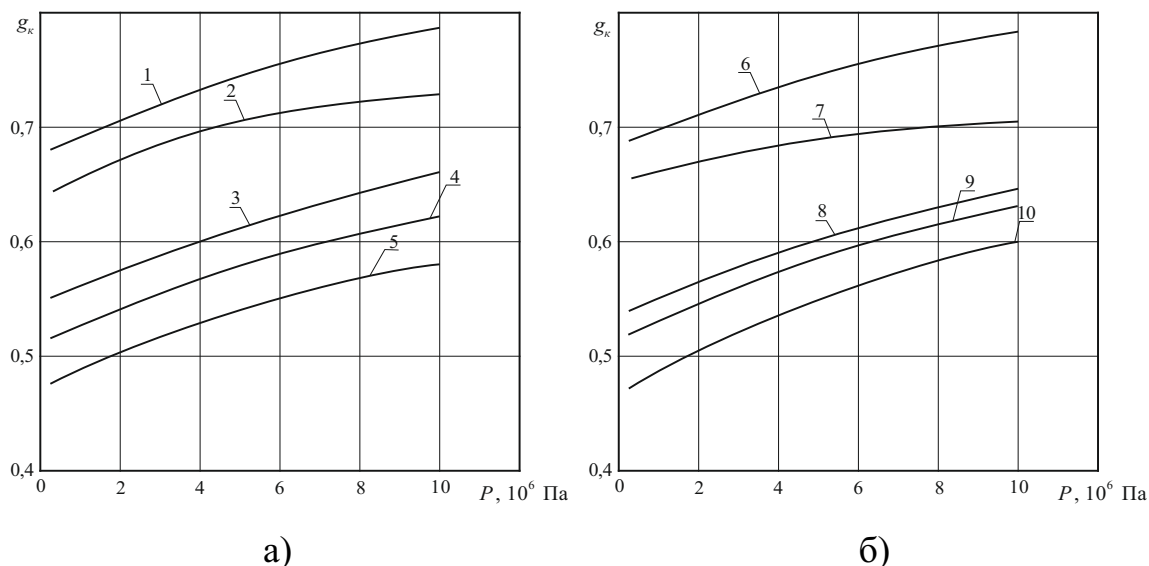


Рисунок 3.10 – Вплив добавки парафіну (а) та стеарину (б) на залежність відносного масового вмісту високотемпературного конденсату g_k у продуктах згоряння сумішей від зовнішнього тиску ($\alpha = 1,0$): а) – 1 – $\varepsilon = 0$; 2 – $\varepsilon = 0,05$; 3 – $\varepsilon = 0,1$; 4 – $\varepsilon = 0,15$; 5 – $\varepsilon = 0,2$; б) – 6 – $\varepsilon = 0$; 7 – $\varepsilon = 0,05$; 8 – $\varepsilon = 0,1$; 9 – $\varepsilon = 0,15$; 10 – $\varepsilon = 0,2$.

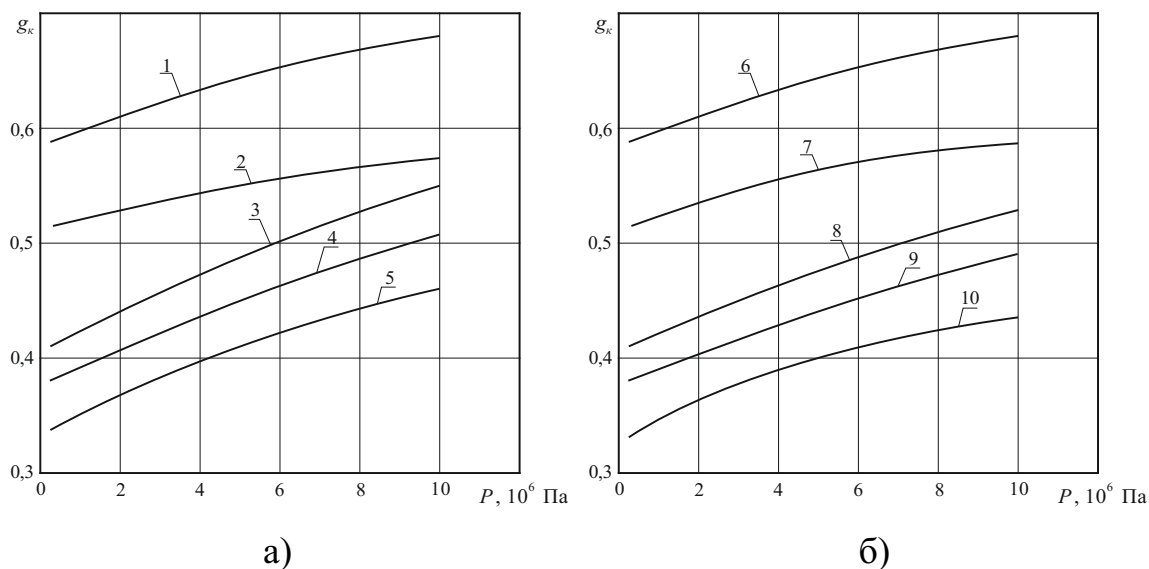


Рисунок 3.11 – Вплив добавки нафталіну (а) та антрацену (б) на залежність відносного масового вмісту високотемпературного конденсату g_k у продуктах згоряння сумішей від зовнішнього тиску ($\alpha = 1,0$): а) – 1 – $\varepsilon = 0$; 2 – $\varepsilon = 0,05$; 3 – $\varepsilon = 0,1$; 4 – $\varepsilon = 0,15$; 5 – $\varepsilon = 0,2$; б) – 6 – $\varepsilon = 0$; 7 – $\varepsilon = 0,05$; 8 – $\varepsilon = 0,1$; 9 – $\varepsilon = 0,15$; 10 – $\varepsilon = 0,2$.

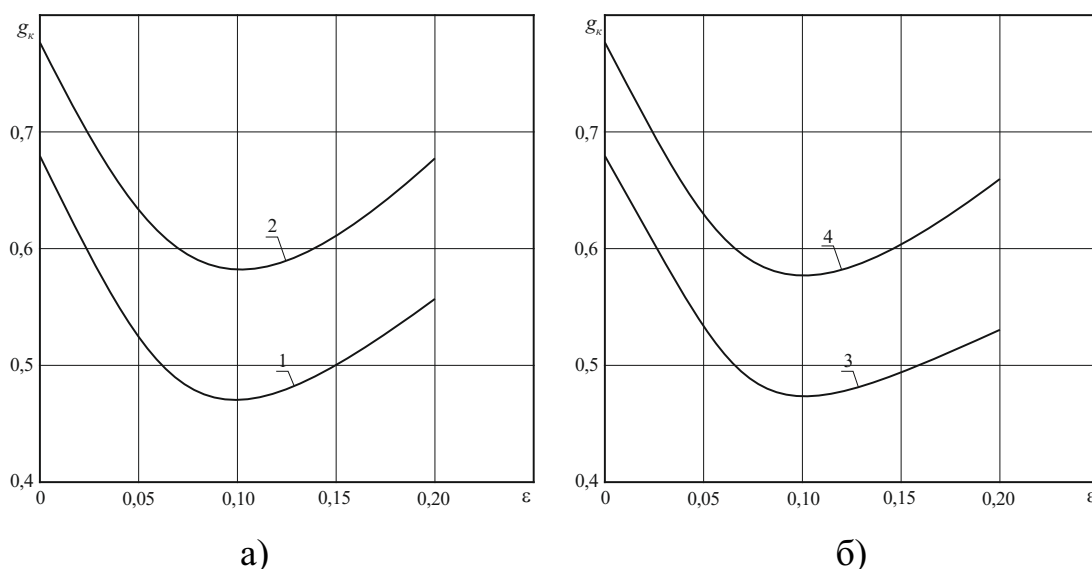


Рисунок 3.12 – Залежність відносного масового вмісту високотемпературного конденсату g_k в продуктах згоряння суміші від величини добавки парафіну (а) та стеарину (б) ($\alpha = 1,0$): а) 1 – $P = 10^5$ Па; 2 – $P = 10^7$ Па; б) – 3 – $P = 10^5$ Па; 4 – $P = 10^7$ Па.

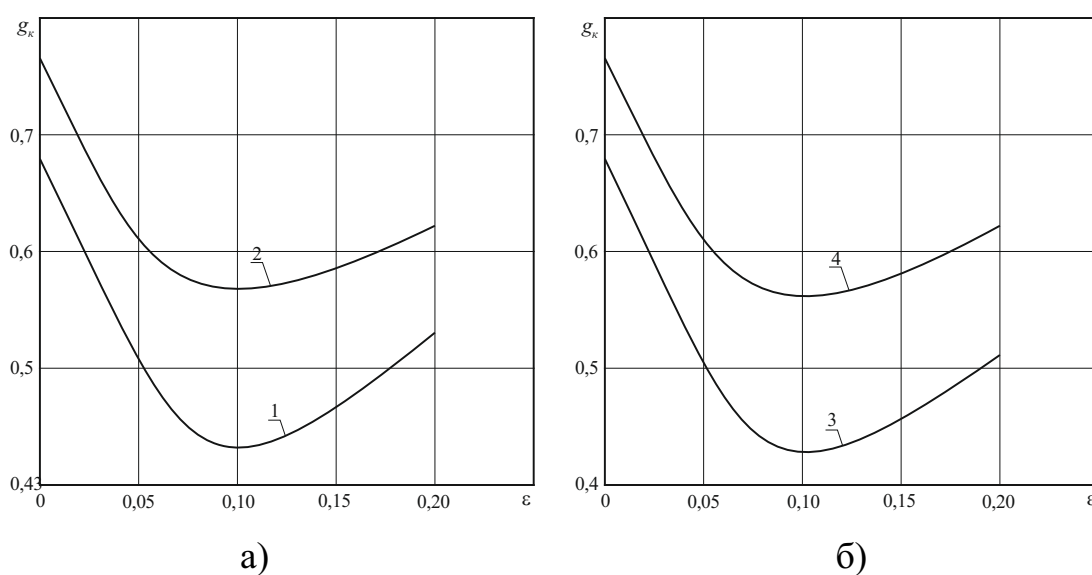


Рисунок 3.13 – Залежність відносного масового вмісту високотемпературного конденсату g_k в продуктах згоряння суміші від величини добавки нафталіну (а) та антрацену (б) ($\alpha = 1,0$): а) – 1 – $P = 10^5$ Па; 2 – $P = 10^7$ Па; б) – 3 – $P = 10^5$ Па; 4 – $P = 10^7$ Па.

3.4. Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесів горіння ущільнених сумішей металеве пальне + фторопласт в умовах зовнішніх термічних дій

Фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння сумішей.

Проведені дослідження поведінки компонентів сумішей з порошків Mg, Al та фторопластів (Ф – 3, Ф – 4 та ін.) в умовах підвищених температур нагріву, притаманних процесу горіння зміцнених сумішей порошків металевих палив з окиснювачами, що розкладаються у межах к-фази, дозволили встановити, що процес горіння зарядів розглядуваних сумішей у середньому стаціонарний та протікає таким же чином, як у сумішевих твердих ракетних палив (СТРП), у декількох просторово розділених зонах: конденсованій фаз (к-фазі), на поверхні горіння та у газовій фазі (г-фазі – зоні полум'я) (рис. 3.14).

Так, з даних про термічне розкладання фторопластів та окиснення порошків магнію та алюмінію у активних газових середовищах (див. розділ 1) впливає, що при нагріванні зарядів сумішей до температур 1200...1400 К, відповідних значенням температур поверхні горіння сумішей T_n , відбувається повне розкладання окиснювача з виділенням активних газоподібних продуктів (фтор та ін.) по наступному кінетичному рівнянню:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = K_1 e^{-E_1/RT}, \quad (3.60)$$

де ψ_1 – відносний ступінь розкладання окиснювача; K_1 , E_1 – кінетичні константи ($E_1 \gg RT$). Умова $E_1 \gg RT$ відповідає тому, що основне поглинання тепла в к-фазі, яке пов'язане з розкладанням окиснювача, практично повністю зосереджене у достатньо вузькому інтервалі температур $\Delta T \cong 2RT_n^2 / E_1$, що прилягає до температури поверхні горіння.

Згідно з експериментальними даними (див. розділ 1) у окиснювачі, що газифікується, у к-фазі починається процес окиснення частинок металу. Аналітична обробка кінетичних кривих окиснення частинок металу в

газоподібних продуктах розкладання окиснювача показує, що вказаний процес описується наступним рівнянням:

$$\frac{d\psi_2}{dt} = K_2 \cdot C^l \cdot \bar{\rho}^q \cdot e^{-E_2/RT} \quad \text{при} \quad E_2 \gg RT, \quad (3.61)$$

де ψ_2 – ступінь окиснення металу; K_2 – передекспоненціальний множник (с^{-1}); E_2 – енергія активації (кДж/моль); $C, \bar{\rho}$ – відносний масовий вміст активних продуктів у загальному потоці газоподібних продуктів розкладання, відносна густина газового середовища (по відношенню до нормальних умов) відповідно; l, q – емпіричні константи, що залежать від природи металевих пального. При цьому з умови $E_2 \gg RT$ випливає, що інтенсивне передполум'яне окиснення частинок металевих пального в газоподібних продуктах розкладання окиснювача також протікає у вузькій реакційній зоні к-фази, де відбувається повна газифікація вказаних компонентів.

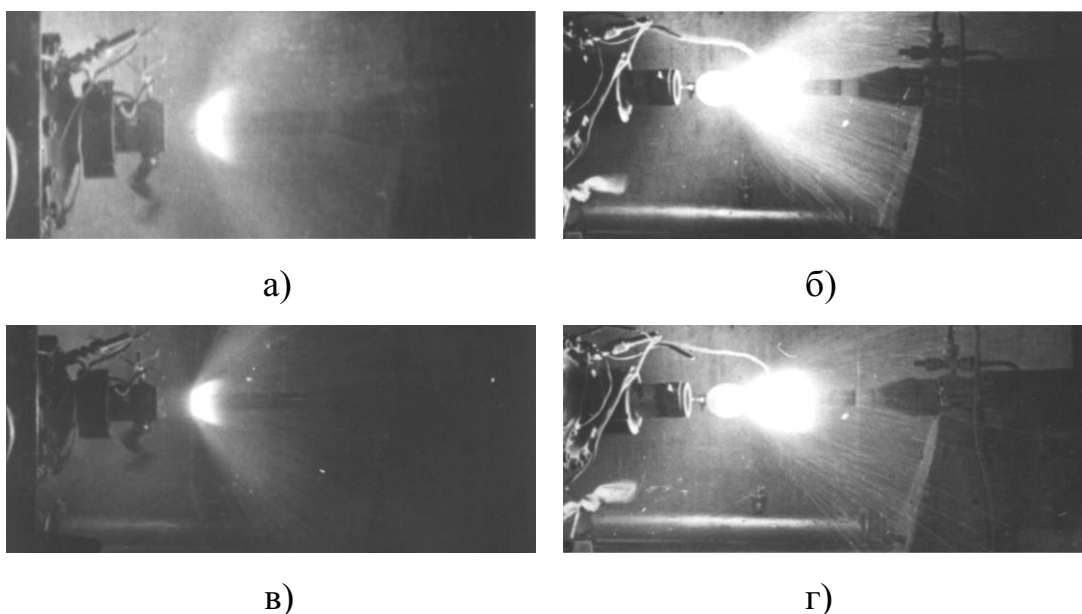


Рисунок 3.14 – Кінокадри зйомки загальної картини процесів горіння зарядів сумішей металевих пальных з фторопластами при зовнішніх термічних впливах: суміші $\text{Mg} + \Phi - 3$ з надлишком металевих пального (а) та окиснювача (б); суміші $\text{Al} + \Phi - 3$ з надлишком металевих пального (в) та надлишком окиснювача (г).

Мікрокінозйомка поверхні горіння суміші (використовувалася кінокамера СКС – 1 М, швидкість зйомки 3000...5000 кадр/с, див. розділ 2) показує, що спалахування частинок металевго пального відбувається одразу ж після їх виходу на поверхню горіння. При цьому поверхню горіння суміші, так само як і у СТРП, можна охарактеризувати середньою температурою T_n . Проте експериментальні дані показують, що для горючих сумішей розглядуваного типу визначення вказаної температури T_n є вельми складним. Це пов'язано з тем, що процеси, які протікають на поверхні горіння розглядуваної суміші (на відміну від СТРП), досить складні. Так, наприклад, детальний аналіз показав, що відмінність в температурах частинок металу і продуктів розкладання окиснювача на поверхні горіння може досягати значень 400...600 К. Більше того, навіть частинки порошку металу на поверхні горіння мають різні температури через нерівність поверхні горіння і різні гідродинамічні і фізичні умови навколо окремих частинок. Ці особливості поверхні горіння і затрудняють точне визначення T_n , тому про експериментально виміряну T_n , як про деяку середню величину для всієї поверхні горіння, можна говорити лише приблизно.

З даних мікрокінозйомки поверхні горіння сумішей також витікає, що практично усі частинки металевго пального спалахують на ній та виносяться (диспергують) у зону полум'я, де вони повністю дифузійно згоряють у потоці газоподібних продуктів термічного розкладання окиснювача (рис. 3.15, 3.16).

Механізм та математична модель горіння сумішей, рівняння для розрахунку швидкості розвитку їх горіння. Проведений аналіз експериментальних відомостей про фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння розглядуваних сумішей дозволяє встановити механізм їх горіння згідно якому процес перетворення вихідної суміші в продукти згоряння в першому наближенні є стаціонарним, одновимірним і протікає в наступних трьох найхарактерніших зонах (рис. 3.17).

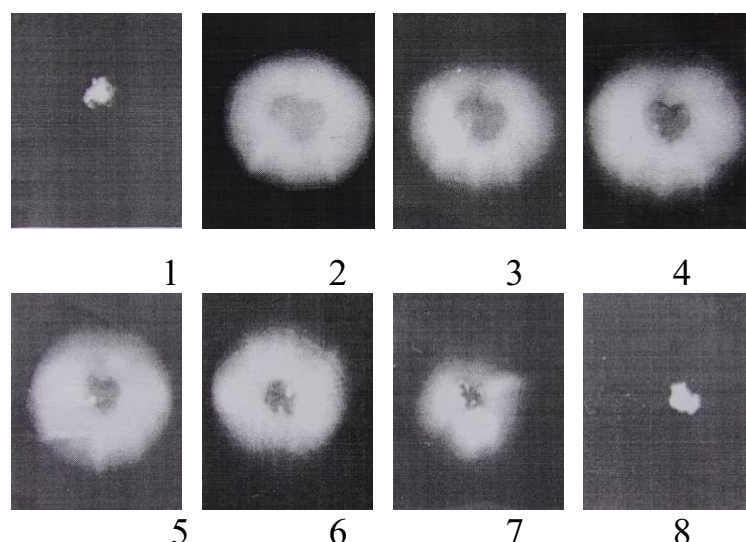


Рисунок 3.15 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу дифузійного згоряння частинки магнію у середовищі газоподібних продуктів розкладання окиснювача ($T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1 – знімок сферичної частинки металу до моменту її займання; 2, 3, 4, 5, 6 – знімки, що характеризують стаціонарне вигорання металу з частинки; 7 – знімок, що характеризує нестаціонарне вигорання металу з частинки; 8 – знімок частинки оксиду, що утворюється після згоряння частинки металу.

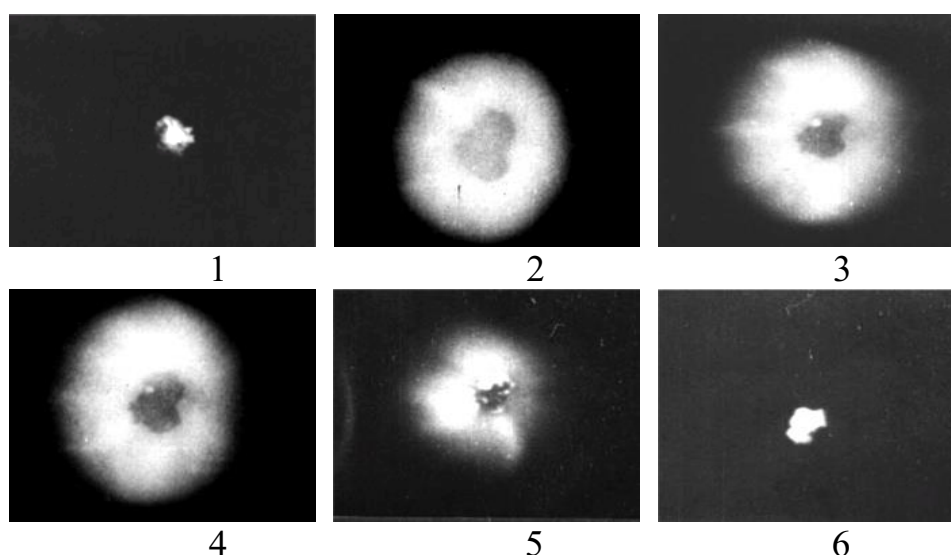


Рисунок 3.16 – Кінокадри швидкісної мікрозйомки процесу горіння частинок алюмінію у середовищі газоподібних продуктів розкладання окиснювача ($T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1, 2, 3, 4, 5, 6 – знімки для частинок металу розміром $d_m < 100 \dots 150$ мкм, що згоряють у газовому потоці.

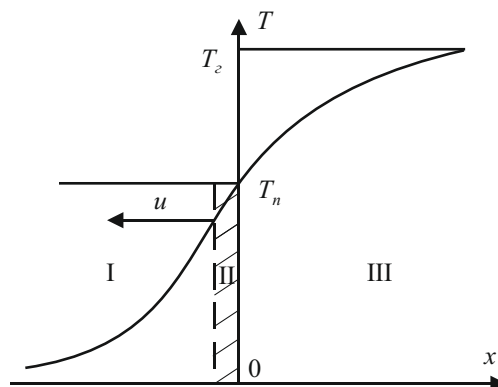


Рисунок 3.17 – Схематичне зображення розподілу температури поблизу поверхні горіння суміші.

Зона I – прогрітий шар в κ -фазі суміші, де можна знехтувати хімічними перетвореннями.

Зона II – реакційна зона κ -фазі суміші, в якій тверда суміш перетворюється в газ, що містить окремі частинки металу. В межах цієї зони відбувається розкладання окиснювача і енергійне окиснення частинок металевого пального, по реакціям, для яких $E \gg RT$ (E – енергія активації, R – газова стала). Спалахування частинок металу відбувається на поверхні горіння. Поверхня горіння визначається як площина, на якій тверда суміш втрачає властивості суцільного конденсованого середовища, і характеризується середньою температурою T_n . Більша частина частинок металу, що спалахнули, диспергуються у γ -фазу.

Зона III – зона тепловиділення γ -фазі. В цій зоні дисперговані частинки металевого пального згоряють в дифузійному режимі в потоці продуктів розкладання окиснювача, утворюючи продукти згорання з температурою T_z . Тепло, що виділяється, шляхом теплопровідності передається у κ -фазу.

При вказаних вище основних припущеннях про механізм горіння розглядуваних сумішей, а також в припущенні відсутності тепловтрат в навколишнє середовище і зовнішніх сил розповсюдження фронту реакції

горіння у к-фазі вихідної суміші можна описати наступною відомою в теорії горіння системою рівнянь [6, 74]:

$$\frac{d}{dx}(\lambda_c \frac{dT}{dx}) - \rho_c c_c \frac{dT}{dx} - H_{ок} \rho_c u \zeta_{ок} \frac{d\psi_1}{dx} + H_M \rho_c \zeta_M u \frac{d\psi_2}{dx} = 0; \quad (3.62)$$

$$u \frac{d\psi_1}{dx} = K_1 e^{-E_1/(RT)}; \quad (3.63)$$

$$u \frac{d\psi_2}{dx} = K_2 \cdot C_{O_2}^l \cdot \bar{p}_2^q e^{-E_2/(RT)}; \quad (3.64)$$

з граничними умовами:

$$T = T_0, \psi_1 = \psi_2 = 0 \text{ при } x \rightarrow -\infty; \quad (3.65)$$

$$T = T_n, \psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n}; \quad \lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = q_n + q_k \text{ при } x = 0. \quad (3.66)$$

Де ρ_c , c_c , λ_c – густина (кг/м³), питома теплоємність (Дж/кг·К) і коефіцієнт теплопровідності (Вт/м·К) суміші; $H_{ок}$ – тепловий ефект реакції розкладання окиснювача (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; $\zeta_{ок}$, ζ_M – відносні масові вмісти окиснювача та металевого пального в суміші відповідно; q_n – тепловий потік від частинок металу, що згоряють на поверхні горіння, Вт/м²; q_k – кондуктивний тепловий потік з зони полум'я, Вт/м².

Щоб отримати вирази для визначення швидкості горіння, систему (3.62) – (3.66) зручно звести до одного рівняння.

Проінтегрувавши рівняння (3.63) від $-\infty$ до x , отримаємо

$$\lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = \rho_c c_c u (T - T_0) - H_M \rho_c \zeta_M u \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right). \quad (3.67)$$

Помножимо рівняння (3.63) на $\frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M}$, потім віднімемо їх з рівняння (3.64):

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right) = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n \cdot e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M} e^{-E_1/(RT)}. \quad (3.68)$$

Розділимо (3.68) на (3.67):

$$\frac{u}{\lambda_c} \cdot \frac{d}{dT} \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right) = \frac{K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n \cdot e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M} e^{-E_1/(RT)}}{\rho_c c_c u (T - T_0) - H_M \rho_c \zeta_M u \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right)}. \quad (3.69)$$

Для випадку $E_i \gg RT$ ($i = \overline{1,2}$) (див. розділ 1) розглядувані реакції розкладання окиснювача з утворенням газоподібних продуктів та окиснення в них частинок металу протікають, в основному, у вузькій реакційній зоні к-фази, що прилягає до поверхні горіння суміші, тобто практично при температурі T_n . Тоді згідно відомому “методу розкладання експоненти”:

$$\frac{E_i}{RT} = \frac{E_i}{R(T_n + \Delta T)} = \frac{E_i}{RT_n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta T}{T_n}} \approx \frac{E_i}{RT_n} - \frac{E_i}{RT_n^2} \Delta T, \quad (3.70)$$

де $\Delta T = T - T_n$.

Тоді отримуємо, що

$$e^{-E_i/(RT)} \approx e^{E_i/(RT_n)} \cdot e^{E_i \cdot (T_n - T)/(RT_n^2)}. \quad (3.71)$$

Підставляючи (3.71) у (3.69), отримуємо

$$\begin{aligned} & u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right) = \\ & = \left[K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{\rho}_c^n \cdot e^{E_2/(RT_n)} \cdot e^{\frac{E_2 \cdot (T_n - T)}{RT_n^2}} - K_1 \cdot \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \cdot e^{E_1/(RT_n)} \cdot e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T)}{RT_n^2}} \right] \cdot \\ & \cdot [\rho_c c_c u (T_n - T_0) - H_M \rho_c u \zeta_M \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right)]^{-1}. \end{aligned} \quad (3.72)$$

Рівняння (3.72) повинне задовольняти граничним умовам

$$\psi_1 = \psi_2 \text{ при } T = T_0; \quad (3.73)$$

$$\psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n} \text{ при } T = T_n. \quad (3.74)$$

В результаті інтегрування рівняння (3.72) з граничними умовами (3.73) та (3.74) отримуємо наступний вираз:

$$\begin{aligned} & u^2 \left[\rho_c c_c (T_n - T_0) \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_{1n} \right) - \frac{H_M \zeta_M \rho_c}{2} \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_{1n} \right)^2 \right] = \\ & = \frac{\lambda_c K_2 C_{O_2}^m \bar{\rho}_c^n R T_n^2}{E_2} e^{-E_2/(RT_n)} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_2 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}} \right] - \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK} \zeta_{OK}}{E_1 H_M \zeta_M} \cdot e^{-E_1/(RT_n)} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}} \right]. \end{aligned} \quad (3.75)$$

Проведені експериментальні дослідження та теоретичні оцінки показують, що для розглядуваних сумішей тепловиділенням за рахунок окиснення частинок металевго пального окиснювачем, що газифікується, у порівнянні з загальним тепловим балансом к-фази вихідної суміші можна, у першому наближенні,

знехтувати (відносна похибка не перевищує 2...4 %), хоча вказаного тепла повністю вистачає для спалахування частинок металу на поверхні горіння. З рахуванням цього факту вираз (3.75) приймає наступний вигляд:

$$H_{ок}\zeta_{ок}\rho_c u^2 \cdot [c_c(T_n - T_0)\psi_{1n} + \frac{H_{ок}\zeta_{ок}}{2}\psi_{1n}^2] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{ок}\zeta_{ок}}{E_1} \cdot e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (3.76)$$

При $x = 0$ з рівняння (3.67) отримуємо, що

$$\psi_{1n} = \frac{q_n + q_k - \rho_c c_c u (T_n - T_0)}{H_{ок}\rho_c u \zeta_{ок}}. \quad (3.77)$$

Підставивши вираз (3.77) у (3.76), отримаємо для швидкості горіння наступне рівняння:

$$\rho_c^2 c_c^2 u^2 (T_n - T_0)^2 = (q_n + q_k)^2 + \frac{2c_c \rho_c K_1 H_{ок}\zeta_{ок} R T_n^2}{E_1} e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (3.78)$$

Далі, з отриманого спрощеного рівняння (3.78) випливає, що для розрахунку швидкості горіння сумішей необхідно знати параметри T_n , q_n , q_k .

Визначення T_n . Експериментальне визначення T_n існуючими методами є складним та достатньо наближеним [6, 74], а дослідження, які присвячені аналітичному визначенню T_n , в теперішній час обмежені. Тому, використовуючи систематизовані дані про кінетику термічного розкладання розглядуваного окиснювача (див. розділ 1) при температурах, властивих реакційній зоні κ -фази суміші, величину T_n можна визначити, виходячи з припущення про те, що при $T = T_n$ відбувається повне розкладання окиснювача. Таким чином, з (3.76) при $\psi_{1n} = \psi_{2n} \approx 1$ для визначення T_n отримуємо наступні рівняння:

$$\rho_c^2 u^2 [c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{ок}\zeta_{ок}}{2}] = \lambda_c K_1 R T_n^2 \cdot e^{-E_1/(RT_n)} [1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (3.79)$$

Аналіз даних макрозйомки поверхні горіння сумішей показує, що кількість частинок металу, які затримуються на поверхні аж до їх повного згоряння, складає не більше 2...3 % від кількості частинок металу, які диспергують у γ -фазу. Це дозволяє, у першому наближенні, знехтувати

тепловим потоком з поверхні горіння q_n у порівнянні з тепловим потоком з γ -фази q_k .

Таким чином, для розрахунку швидкості та температури поверхні горіння розглядуваних сумішей отримуємо наступну замкнуту систему рівнянь:

$$\rho_c^2 u^2 c_c^2 (T_n - T_0)^2 = q_n^2 + \frac{2c_c \rho_c K_1 H_{ок} \zeta_{ок} R T_n^2}{E_1} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{R T_n^2}} \right], \quad (3.80)$$

$$\rho_c^2 u^2 \left[c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{2} \right] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2}{\rho_c} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{R T_n^2}} \right]. \quad (3.81)$$

де $\zeta_{ок} = 1 - \zeta_m$.

Визначення q_k . Для наближеного аналітичного визначення q_k скористаємося відомим «методом теплового потоку» [6, 74], а саме: істинне значення теплового потоку із зони тепловиділення γ -фази замінимо його середнім значенням для цієї зони:

$$q_k = \lambda_c \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \bar{\lambda}_c \frac{T_z - T_n}{\Delta x}, \quad (3.82)$$

де $\bar{\lambda}_c$ – коефіцієнт теплопровідності газу при температурі $\bar{T} = (T_z + T_n)/2$; Δx – відстань від поверхні горіння до площини, на якій досягається температура T_z (температура T_z і відповідний їй склад продуктів згорання знаходяться в результаті термодинамічних розрахунків). При цьому величина Δx знаходиться з рівняння руху сферичної частинки металу радіусом r :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{3}{8} \cdot \frac{\bar{\rho}_c}{\rho_m} \cdot \frac{\bar{c}_x}{r} (V - \dot{x})^2, \quad (3.83)$$

де $\bar{\rho}_c$ – густина газового потоку при температурі $\bar{T}$; $\bar{c}_x$ – коефіцієнт опору частинки, в кінцевий вираз якого входять параметри газового потоку при температурі $\bar{T}$; V – швидкість газового потоку.

Експериментальним шляхом було встановлено збіг коефіцієнта опору частинок сферичній форми металу, що горять і не горять при значеннях критерію Рейнольдса $Re < 10^3$. Під критерієм Рейнольдса тут розуміється

відношення $Re = \frac{2r(V - \dot{x})}{\bar{\nu}_z}$, де $\bar{\nu}_z$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу

при температурі $\bar{T}$. Тому у вказаному діапазоні зміни критерію Рейнольдса для коефіцієнта опору частинки металу можна брати його значення для сферичної частинки, що не горить.

Експериментальні дані про швидкість відтоку газоподібних продуктів розкладання показують, що швидкість їх відносного руху в межах зони тепловиділення г-фази складає $V_n = 1 \dots 10$ м/с. Це, у свою чергу, дає наступний діапазон зміни числа Рейнольдса $0,4 \leq Re \leq 850$ (для $P = 10^5 \dots 10^7$ Па).

У зв'язку з вищевикладеним приймемо для коефіцієнта опору частинки металу наступне його значення для сферичної частинки, що не горить:

$$\bar{c}_x = \pi(0,128 + 12,8 / Re), \quad (3.84)$$

яке добре апроксимує експериментальну залежність $\bar{c}_x = f(Re)$ в цікавому для нас діапазоні зміни критерію Рейнольдса.

Підставивши $\bar{c}_x$ з (3.84) у (3.83), отримаємо

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0,15 \frac{\bar{\rho}_z(V - \dot{x})^2}{\rho_m r} + 7,52 \frac{\bar{\rho}_z \bar{\nu}_z (V - \dot{x})}{\rho_m r^2}. \quad (3.85)$$

Враховуючи, що згідно експериментальним даним про швидкість відтоку газоподібних продуктів в межах зони тепловиділення полум'я $V \gg \dot{x}$ та практично не змінюється по її довжині (не більше 3...4% від значення при $T = T_n$), рівняння (3.85) можна переписати у вигляді

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0,15 \frac{\bar{\rho}_z V_n^2}{\rho_m r} + 7,52 \frac{\bar{\rho}_z \bar{\nu}_z V_n}{\rho_m r^2}. \quad (3.86)$$

Проінтегрувавши рівняння (3.86) з врахуванням початкових умов на поверхні горіння (при $t = 0$; $x = 0$, $\dot{x} = u$), знайдемо залежність зсуву частинки від часу:

$$\Delta x = u \tau_z + 0,15 \frac{\bar{\rho}_z V_n^2}{\rho_m} \int_0^{\tau_z} \left[\int_0^t \frac{dt}{r(t)} \right] dt + 7,52 \frac{\bar{\rho}_z \bar{\nu}_z V_n}{\rho_m} \int_0^{\tau_z} \left[\int_0^t \frac{dt}{r^2(t)} \right] dt, \quad (3.87)$$

де τ_z – час горіння частинки металу при зміні її радіусу від $r_0 = \frac{d_m}{2}$ до

$r_k = \frac{d_k}{2}$ (r_k (d_k) – радіус (діаметр) частинки металу в кінці зони

тепловиділення полум'я).

Для знаходження τ_z скористаємося відомим рівнянням [3, 8]:

$$\left| \frac{dr}{dt} \right| = \frac{1}{2\rho_m r} \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}_z}{\bar{c}_p} \right) \cdot \bar{Nu} \cdot \ln \bar{\eta}, \quad (3.88)$$

$$\text{де } \bar{\eta} = \frac{1 + m_{ок} \cdot \left(\frac{H_m}{L} \right) + \left(\frac{\bar{c}_p}{L} \right) \cdot (\bar{T} - T_k)}{\left(1 + \frac{m_{ок}}{\gamma^*} \right) \cdot (1 - m_{ок})^{1/\gamma^*}}, \quad (3.89)$$

$$\bar{Nu} = 2 \left[1 - 0,08 \left(2r \cdot V_n / \bar{v}_z \right)^{2/3} \right], \quad (3.90)$$

$m_{ок}$ – відносна концентрація кисню в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача та органічних речовин (згідно експериментальним даним по відтоку газоподібних продуктів значення $m_{ок}$ вважається рівною її значенню при повному розкладанні окиснювача та органічних речовин);

γ^* – відношення масового потоку кисню до масового потоку пари металу;

L , T_k – прихована теплота випаровування та температура кипіння металу;

$\bar{\lambda}_z$, $\bar{c}_p$, $\bar{v}_z$ – параметри газового потоку, які беруться при середній

температурі $\bar{T} = \frac{T_n + T_z}{2}$. Коефіцієнти $\bar{\lambda}_z$, $\bar{c}_p$, $\bar{v}_z$ можна представити у

вигляді ($T_0^* = 293$ К, $P_a = 10^5$ Па та λ_z^0 , c_p^0 , v_z^0 – значення параметрів при

T_0^* та P_a):

$$\bar{\lambda}_z \approx \lambda_z^0 \left(\frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \right)^{1/2}, \quad (3.91)$$

$$\bar{c}_P \approx c_P^0 \left(\frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \right), \quad (3.92)$$

$$\bar{v}_z \approx v_z^0 \left(\frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{P_a}{P} \right), \quad (3.93)$$

Підставляючи вирази (3.89) – (3.93) у (3.88), отримуємо наступне рівняння для швидкості горіння частинки металу

$$\begin{aligned} \left| \frac{dr}{dt} \right| &= \frac{\lambda_z^0}{\rho_M \cdot r \cdot c_P^0} \cdot \left(\frac{2T_0^*}{T_n + T_z} \right)^{1/2} \cdot \\ &\cdot \left[1 - 0,16 \cdot \frac{T_0^*}{T_n + T_z} \cdot \left(\frac{2r \cdot \rho_c \cdot u \cdot l_c \cdot \alpha \cdot T_n}{v_z^0 \cdot \rho_z^0 (1 + l_c \cdot \alpha) \cdot T_0^*} \right)^{2/3} \right] \cdot \\ &\cdot \ln \left[\frac{1 + m_{OK} \cdot \left(\frac{H_M}{L} \right) + \frac{c_P^0}{L} \cdot \frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \cdot \left(\frac{T_n + T_z}{2} - T_K \right)}{\left(1 + \frac{m_{OK}^*}{\gamma^*} \right) \cdot (1 - m_{OK})^{1/\gamma^*}} \right]. \end{aligned} \quad (3.94)$$

Проінтегрувавши рівняння (3.94) з врахуванням наступних початкових та кінцевих умов:

$$r|_{t=0} = \frac{d_M}{2}, \quad (3.95)$$

$$r|_{t=\tau_z} = \frac{d_K}{2}, \quad (3.96)$$

отримаємо

$$\begin{aligned} \tau_z &= \frac{3}{4a \cdot b^2} \cdot \left\{ 2 \left[\left(\frac{d_M}{2} \right)^{2/3} - \left(\frac{d_K}{2} \right)^{2/3} \right] + b \left[\left(\frac{d_M}{2} \right)^{4/3} - \left(\frac{d_K}{2} \right)^{4/3} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{b} \cdot \ln \left[\frac{1 - b \left(\frac{d_M}{2} \right)^{2/3}}{1 - b \left(\frac{d_K}{2} \right)^{2/3}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3.97)$$

де a, b мають наступний вигляд:

$$a = \frac{\lambda_z^0}{\rho_m \cdot c_P^0} \cdot \left(\frac{2T_0^*}{T_n + T_z} \right)^{1/2} \cdot \ln \left[\frac{1 + m_{ок} \cdot \left(\frac{H_m}{L} \right) + \frac{c_P^0}{L} \cdot \frac{T_n + T_z}{2T_0^*} \cdot \left(\frac{T_n + T_z}{2} - T_k \right)}{\left(1 + \frac{m_{ок}}{\gamma^*} \right) \cdot (1 - m_{ок})^{1/\gamma^*}} \right]; \quad (3.98)$$

$$b = 0,16 \cdot \frac{T_0^*}{T_n + T_z} \cdot \left(\frac{2 \cdot \rho_c \cdot u \cdot l_c \cdot \alpha \cdot T_n}{\nu_z^0 \cdot \rho_z^0 (1 + l_c \cdot \alpha) \cdot T_0^*} \right)^{2/3}. \quad (3.99)$$

Величину d_k визначимо через відносний масовий вміст неокисленого металу в продуктах згоряння суміші:

$$g_{me}^k = \frac{P_{me}^k}{P_{me}^0 + P_{ок}} = \frac{P_{me}^k}{(1 + l_c \cdot \alpha) \cdot P_{me}^0}, \quad (3.100)$$

де P_{me}^k – масовий вміст неокисленого металевго пального в продуктах згорання; P_{me}^0 , $P_{ок}$ – масовий вміст у вихідної суміші відповідно металевго пального та окиснювача.

Далі (3.100) можна переписати у вигляді

$$g_{me}^k = \frac{1}{1 + l_c \cdot \alpha} \cdot \left(\frac{d_k}{d_m} \right)^3, \quad (3.101)$$

Звідси

$$d_k = d_m \left[(1 + l_c \cdot \alpha) \cdot g_{me}^k \right]^{1/3}. \quad (3.102)$$

Підставляючи (3.102) у (3.97), остаточно, отримуємо наступний вираз для τ_z :

$$\tau_e = \frac{3}{4a \cdot b^2} \cdot$$

$$\cdot \left\{ 2 \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \left[1 - (1 + l_c \cdot \alpha)^{2/9} (g_{me}^\kappa)^{2/9} \right] + b \left(\frac{d_m}{2} \right)^{4/3} \left[1 - (1 + l_c \cdot \alpha)^{4/9} (g_{me}^\kappa)^{4/9} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{b} \cdot \ln \left[\frac{1 - b \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3}}{1 - b \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \cdot (1 + l_c \cdot \alpha)^{2/9} (g_{me}^\kappa)^{2/9}} \right] \right\}. \quad (3.103)$$

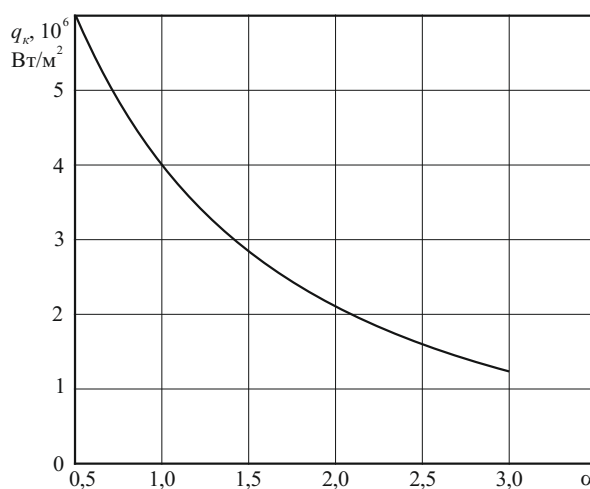


Рисунок 3.18 – Залежність величини теплового потоку q_k від коефіцієнта надлишку окиснювача для суміші $\text{Mg} + \Phi - 3$ ($d_m = 74,5$ мкм; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па).

Проведені розрахунки по формулам (3.82), (3.87), (3.102) та (3.103) з залученням усіх необхідних даних по сумішам та їх компонентам показують, що тепловий потік q_k найбільш сильно залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача та дисперсності металевого пального (рис. 3.18, 3.19): при збільшенні α від 0,5 до 3,0 значення q_k зменшуються від $5,79 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,31 \cdot 10^6$ Вт/м²; при збільшенні d_m від 74,5 мкм до 182 мкм значення q_k зменшується від $3,9 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,8 \cdot 10^6$ Вт/м².

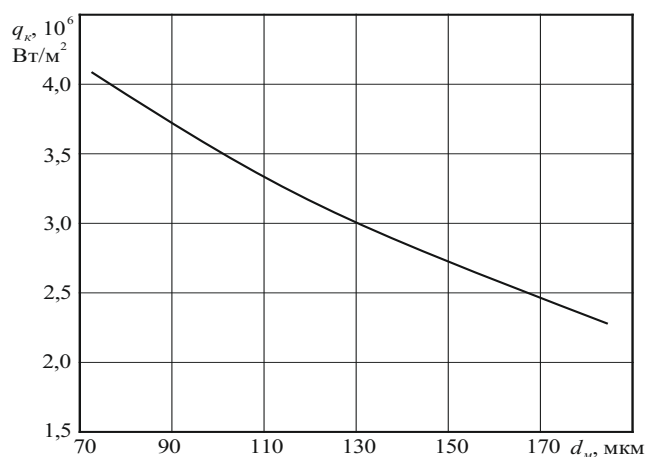


Рисунок 3.19 – Залежність величини теплового потоку q_k від дисперсності металевого пального для суміші $Mg + \Phi - 3$ ($\alpha = 1,0$; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па).

3.5. Визначення критичних діапазонів зміни швидкості горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій

Отримані вище вирази (3.80) – (3.82), (3.87), (3.100) дозволяють розраховувати швидкість розвитку горіння розглядуваних сумішей u , температуру їх поверхні горіння T_n , а також швидкість горіння частинок металу у продуктах розкладання цих сумішей $\frac{dm(r_m)}{dt}$ та тепловий потік з γ -фази сумішей q_k . З використанням необхідних значень фізико-хімічних параметрів сумішей та їх компонентів [6, 74] на ПК з використанням стандартного програмного забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм по сучасним чисельним методам [6, 8] було проведено розрахунки залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів (співвідношення компонентів, дисперсності металевого пального), а також основних параметрів зовнішніх термічних дій (температури нагріву, зовнішнього тиску) (рис. 3.20, 3.21). З результатів зіставлення розрахункових залежностей з отриманими у даній роботі (див. розділ 4) експериментальними даними випливає, що між ними спостерігається

повний якісний збіг, що відповідає запропонованому вище механізму горіння сумішей. Що стосується кількісних відмінностей між розрахунком та експериментом, то вони не перевищують 6...8 % (замість 10...12 % у існуючих моделей горіння піротехнічних металізованих сумішей).

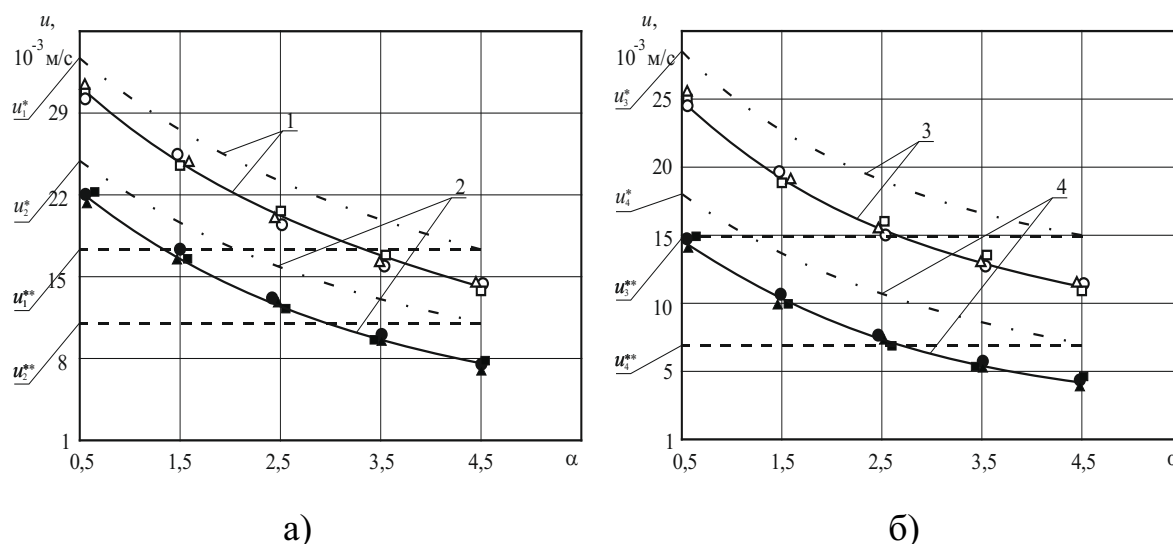


Рисунок 3.20 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші магній + $\Phi - 3$ від відносного вмісту металевого пального: а) – вплив T_0 (1 – $T_0 = 873$ К; 2 – $T_0 = 293$ К; $d_M = 74,5$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па); б) – вплив P (3 – $P = 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_M = 135$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 293$ К): - - - - розрахункова крива; — — експериментальна крива по отриманим в даній роботі даним (див. розділ 4).

Крім цього, в результаті проведених розрахунків було встановлено наступні критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей, перевищення яких призводить до нестабільного вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння або різкого його затухання в умовах зовнішніх термодій (табл. 3.3):

$$u_i^* \leq u \leq u_i^{**}, i = \overline{1,8}, \quad (3.104)$$

де індексу “ i ” відповідає конкретним умовам (див. рис. 3.20, 3.21).

Таким чином, зовнішні термодії на поверхню корпусів виробів з зарядами розглядуваних сумішей в умовах їх зберігання, транспортування, можуть призводити до нагріву їх корпусів до рівня температур, що перевищують значення температури займання розглядуваних частинок металів у продуктах розкладання окиснювача в умовах підвищених температур нагріву. Це призводить, в кінцевому підсумку, до розвитку вибухонебезпечного процесу горіння заряду суміші в замкнутому об'ємі під корпусом виробу в умовах підвищених температур нагріву та тисків зовнішнього середовища, що є основною причиною прискорення процесу його горіння, передчасного спрацьовування виробу та його пожежонебезпечного руйнування. Тому важливо на стадії проектування та стендових випробувань виробів, що моделюють вказані зовнішні термодії, вміти прогнозувати критичні значення параметрів зовнішніх термодій, а також технологічних параметрів, що характеризують заряд суміші та суттєво впливають на температуру займання частинок металів в газоподібних продуктах розкладання окиснювача, перевищення яких призводить до передчасного спрацьовування виробів. При цьому збільшення T_z (наприклад, за рахунок використання більш дрібнодисперсних металевих порошків та окиснювачів з меншим вмістом кисню у продуктах розкладання) може призводити до зростання критичних часів спрацьовування піротехнічних виробів в умовах вимушених зовнішніх термодій у декілька разів, тобто регулюючи технологічні параметри зарядів сумішей на стадії їх виготовлення можна у декілька разів підвищувати пожежобезпечність виробів.

Висновки до розділу 3

1. Для більш точного знаходження значень температур на поверхнях зарядів сумішей, розроблено нелінійні нестационарні математичні моделі їх нагріву зовнішніми тепловими потоками, які на відміну від аналогічних моделей враховують температурні залежності їх теплофізичних

властивостей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності) та вплив основних параметрів термодій (величини теплових потоків та часів їх дії) від зовнішніх джерел спалахування відомих палих матеріалів.

2. В результаті проведення теоретичних досліджень зовнішніх термодій на поверхню оболонок зарядів сумішей встановлено наступні закономірності: збільшення величини теплового потоку від $1,8 \cdot 10^5$ Вт/м² до $3,4 \cdot 10^6$ Вт/м² призводить до зростання температури поверхні заряду у 2,4...3,6 разу для часів теплового впливу $t = 15 \dots 30$ с, подальше збільшення t до 70...90 с та більше веде до її різкого зростання вже більше, ніж на порядок.

3. Зіставлення результатів численних розрахунків температурних полів у зарядах сумішей при термодії зовнішніх джерел нагріву з отриманими експериментальними даними показало, що розроблені математичні моделі на практиці можуть бути використані в якості більш точних методів (відносна похибка знижена до 6...8 % замість 10...12 % – у існуючих методів) для визначення рівнів температур на поверхні зарядів сумішей, та критичних значень як параметрів зовнішніх термодій, так й технологічних параметрів сумішей шляхом застосування необхідних даних по температурам займання частинок металів в газоподібних продуктах розкладання окиснювача.

4. В результаті проведених термодинамічних розрахунків встановлено, що:

– введення добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) у суміш алюмінію з фторопластом Ф – 3 у кількості 5...20 % призводить до зменшення максимальної температури продуктів згоряння у 1,8...2,1 разу при змінах коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші в діапазоні 0,95...1,03;

– залежність відносного масового вмісту високотемпературного конденсату у продуктах згоряння суміші g_k від величини добавки органічної речовини має мінімум $g_{kmin} = 0,4705 \dots 0,5986$ при $\varepsilon_{min} = 0,07 \dots 0,12$ для

коефіцієнтів надлишку окиснювача 0,3...1,5 та зовнішніх тисків $10^5 \dots 10^7$ Па;

– підвищення зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до підвищення максимальної температури продуктів згоряння у 1,31... 1,42 разу та сприяє підсиленню її залежностей від величини добавки органічної речовини; до зростання відносного масового вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння суміші з добавками парафіну, стеарину, нафталіну та антрацену у 1,19...1,51 разу, а також до послаблення його залежності від величини органічної добавки.

5. На основі проведених експериментальних досліджень фізико-хімічних процесів, що протікають у конденсованій фазі зарядів сумішей, на поверхні горіння та у зоні полум'я встановлено механізм та розроблено модель горіння ущільнення двокомпонентних сумішей з порошків металевих паливних та фторопластів, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує кінетичні характеристики термічного розкладання окиснювача та високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металу у продуктах розкладання, що дозволяє більш точно (відносну похибку знижено з 10...15 % до 6...9 % у існуючих моделей) розраховувати залежності швидкості горіння сумішей від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень технологічних параметрів (співвідношення компонентів та дисперсності металевого пального) та визначати її критичні значення в цих умовах, перевищення яких призводить до прискорення або затухання процесу горіння сумішей та передчасного пожежовибухонебезпечного руйнування виробів або до їх відказу при штатному використанні.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРІННЯ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ УМОВ

У даному розділі на базі проведених експериментальних досліджень наводяться нові експериментальні дані з визначення закономірностей впливу добавок органічних та неорганічних речовин на основні характеристики процесу горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластвмісних окиснювачів (температуру займання та час горіння частинок металу в продуктах розкладання окиснювачів, швидкість горіння) [33, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 100, 103]. Вперше експериментально встановлено закономірності основних параметрів зовнішніх термічних впливів (підвищених температур нагріву (T_0 , К) та зовнішніх тисків (P , Па)) на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння сумішей для робочих діапазонів зміни їх технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача (α), природи та величини добавки (ε), природи металевого пального та середнього розміру його частинок (d_m , мкм) та ін.

4.1. Закономірності впливу технологічних параметрів на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку процесу горіння сумішей

Вплив добавок органічних та неорганічних речовин. В результаті проведених досліджень встановлено (рис. 4.1, 4.2), що органічні добавки можуть істотно впливати не тільки на величину швидкості горіння, але й на характер її залежностей від різних параметрів. По дії на швидкість горіння суміші Mg з Ф – 3 органічні добавки можуть бути розташовані в ряд: стеаринова кислота, себацінова кислота, сечовина, уротропін, фталева кислота, нітрогуанідин, парафін. При цьому для парафіну спостерігається

суттєва залежність від вмісту добавки ε : при $\varepsilon \leq 8,5\%$ він за ефективністю останній у вказаному ряду; при $\varepsilon > 8,5\%$ його ефективність різко зростає. Добавки органічних речовин у суміші Мґ з Ф – 3 різко послаблюють залежність швидкості горіння від тиску, причому у ряді випадків реалізується закон горіння з $\nu = 0$, що призводить до стабілізації процесу горіння сумішей та зниження його залежності від зовнішніх впливів.

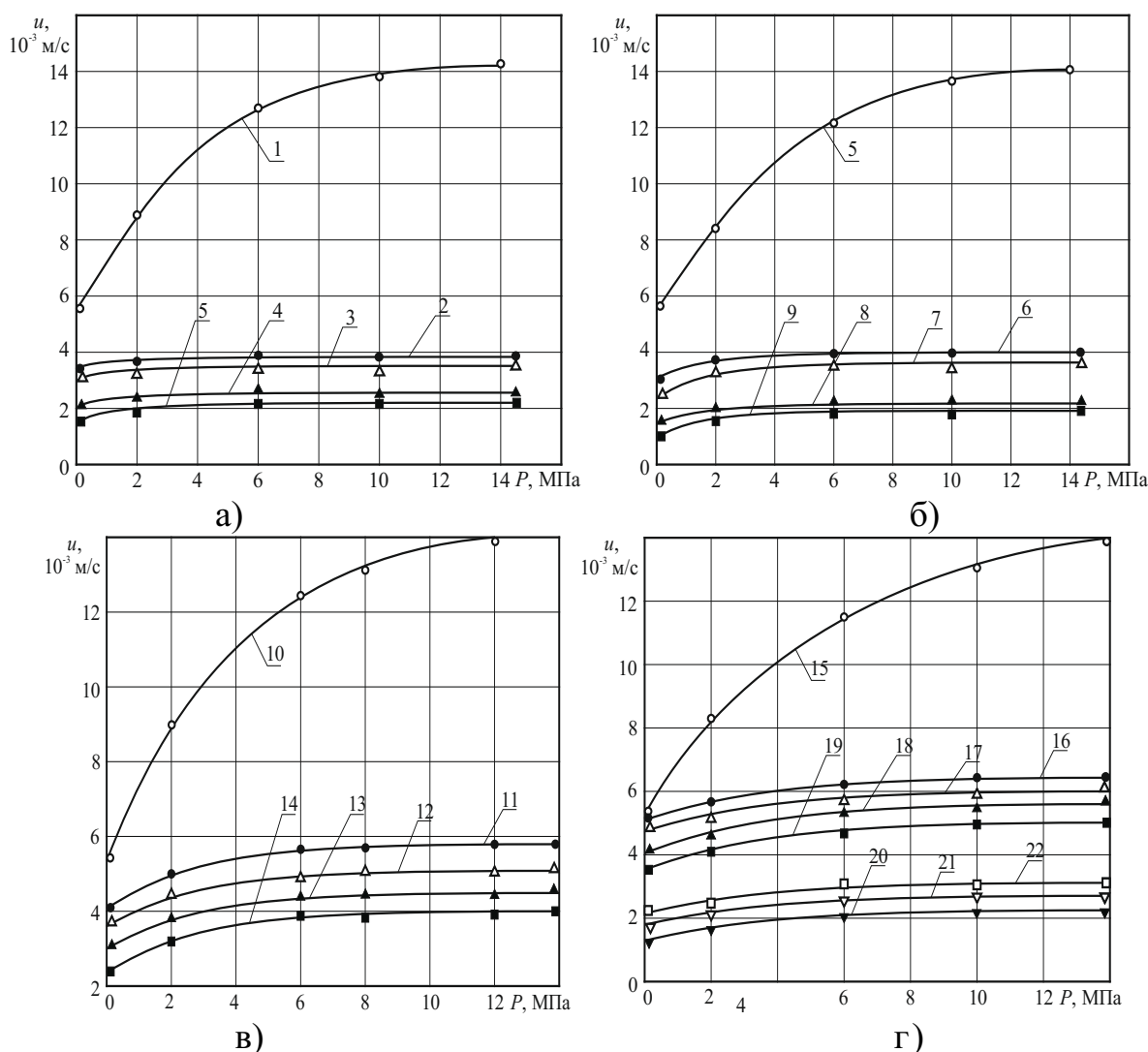


Рисунок 4.1 – Залежності швидкості горіння суміші 75 % МПФ – 3 + 25 % Ф – 3 від зовнішнього тиску при різному вмісті органічної добавки ($K_V = 0,9$; $d_M = 135$ мкм): а) – відносний вміст епоксидної смоли ЕД-5: $\varepsilon = 0$ (1); $\varepsilon = 0,05$ (2); $\varepsilon = 0,07$ (3); $\varepsilon = 0,1$ (4); $\varepsilon = 0,13$ (5); б) – відносний вміст каучуку СКН-10-1: $\varepsilon = 0$ (5); $\varepsilon = 0,05$ (6); $\varepsilon = 0,07$ (7); $\varepsilon = 0,1$ (8); $\varepsilon = 0,13$ (9); в) – відносний вміст тіоколу: $\varepsilon = 0$ (10); $\varepsilon = 0,05$ (11); $\varepsilon = 0,07$ (12); $\varepsilon = 0,1$ (13); $\varepsilon = 0,13$ (14); г) – відносний вміст добавок: $\varepsilon = 0$ (15); $\varepsilon = 0,05$ ПГН (16); $\varepsilon = 0,07$ ПГН (17); $\varepsilon = 0,1$ ПГН (18); $\varepsilon = 0,13$ ПГН (19); $\varepsilon = 0,07$ П-9 (20); $\varepsilon = 0,1$ П-9 (21); $\varepsilon = 0,13$ П-9 (22); $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$, $\blacksquare$, $\square$, $\blacktriangledown$, ∇ – експериментальні дані.

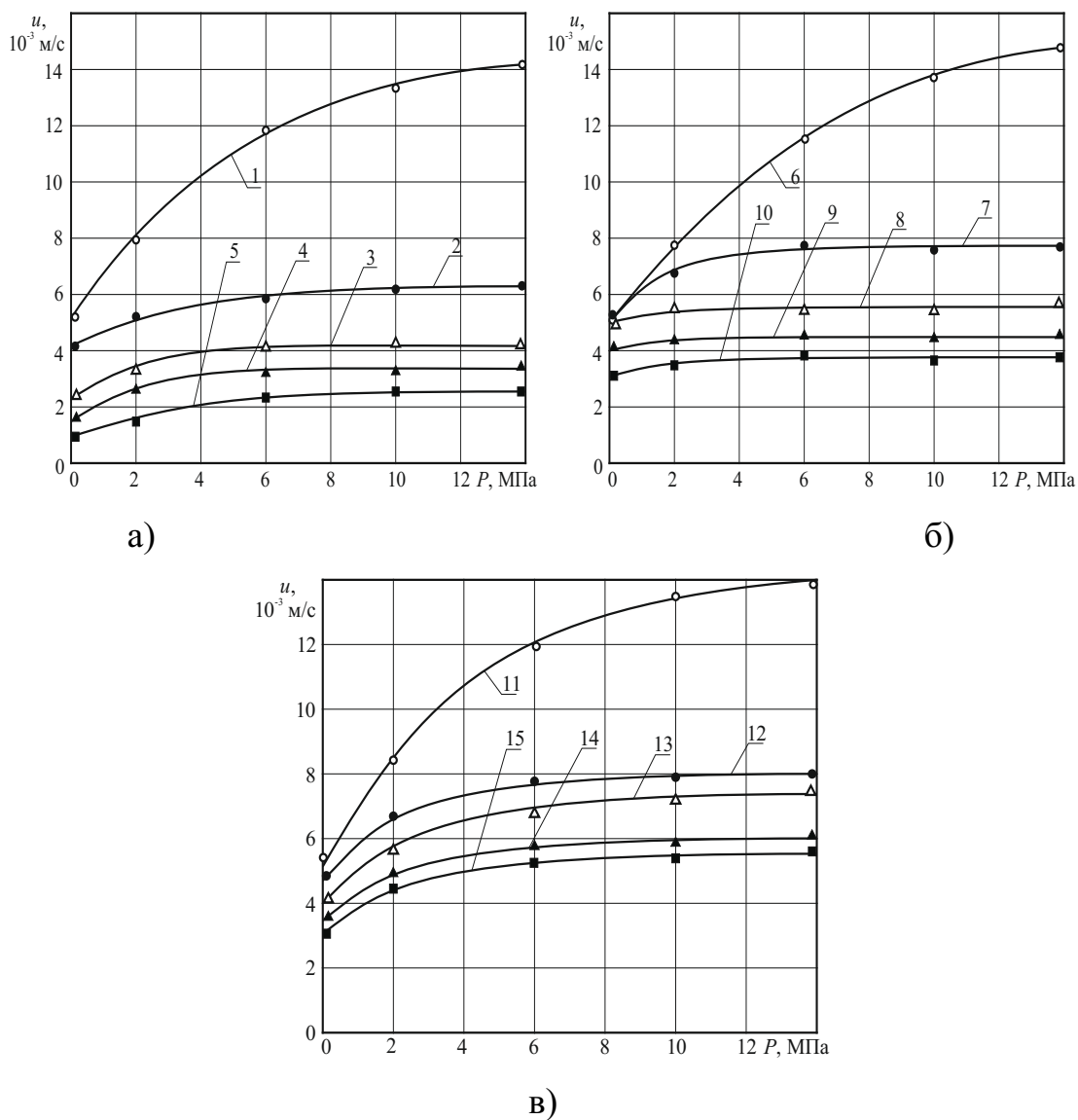


Рисунок 4.2 – Вплив вмісту стеарину (а), парафіну (б) та уротропіну (в) суміші 75 % МПФ – 3 + 25 % Ф – 3 на залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску ($K_V = 0,9$; $d_m = 135$ мкм): а) – $\varepsilon = 0$ (1); $\varepsilon = 0,05$ (2); $\varepsilon = 0,07$ (3); $\varepsilon = 0,1$ (4); $\varepsilon = 0,13$ (5); б) – $\varepsilon = 0$ (6); $\varepsilon = 0,05$ (7); $\varepsilon = 0,07$ (8); $\varepsilon = 0,1$ (9); $\varepsilon = 0,13$ (10); в) – $\varepsilon = 0$ (11); $\varepsilon = 0,05$ (12); $\varepsilon = 0,07$ (13); $\varepsilon = 0,1$ (14); $\varepsilon = 0,13$ (15); $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$, $\blacksquare$ – експериментальні дані.

Результати експериментів щодо дослідження добавок різних оксидів до сумішей Al з Ф – 3 наведено на рис. 4.3. Видно, що для сумішей, в яких є сферичний порошок алюмінію, ефективність добавок знижується у ряду MnO_2 , Ni_2O , $KMnO_4$, V_2O_5 . Добавка Cr_2O_3 практично не впливає на швидкість горіння, а добавка CuO навіть дещо знижує її.

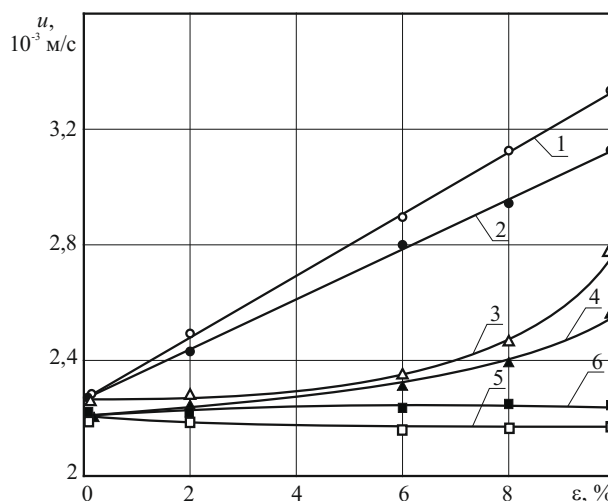


Рисунок 4.3 – Залежність швидкості горіння суміші 60 % АСД – 4 + 40 % Φ – 3 від вмісту добавок: 1 – MnO₂; 2 – Ni₂O₃; 3 – KMnO₄; 4 – V₂O₅; 5 – Cr₂O₃; 6 – CuO; ○, ●, Δ, ▲, ■, □ – експериментальні дані.

Вплив технологічних параметрів на швидкість розвитку процесу горіння двокомпонентних сумішей Mg, Al + Φ – 3. В результаті проведених експериментальних досліджень впливу коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності металевого пального, коефіцієнта ущільнення, діаметра та матеріалу оболонки зразка суміші на швидкість горіння встановлено наступні закономірності.

Суміш Mg + Φ – 3. При збільшенні K_y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 2,0...2,5 раза. Зростання α від 0,6 до 3,0 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 3,2...4,3 раза та послаблення залежності $u(K_y)$ у 1,4...1,5 раза (рис. 4.4).

Встановлено наступні концентраційні межі горіння сумішей: $\alpha_{ВМГ} = 0,15$ (верхня концентраційна межа горіння – граничний вміст металевого пального у суміші) та $\alpha_{НМГ} = 5,0$ (нижня концентраційна межа горіння – граничний вміст окиснювача у суміші), в межах яких ($\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$, $\alpha_{ВМГ} < 1$ та $\alpha_{НМГ} > 1$) здійснюється стійкий, невибухонебезпечний розвиток процесу горіння сумішей (рис. 4.5 – 4.7). Криві $u(\alpha)$ має максимум u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення якого суттєво залежить від таких важливих технологічних параметрів, як дисперсність металевого пального, діаметр

зразка суміші та матеріал його оболонки. Так, при збільшенні d_m від 74,5 мкм до 135 мкм значення α_{max} зростають від 0,21 до 0,32 (у бік надлишку окиснювача); при цьому швидкість горіння суміші зменшується у 2,3...2,5 разу, а процес горіння стає більш стабільним, стійким до зовнішніх впливів. Зменшення D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м призводить вже до зменшення α_{max} від 0,32 до 0,18 (у бік надлишку металевго пального) та зростання швидкості горіння суміші у 1,7...1,9 разу, що дестабілізує процес горіння та робить його нестійким при деяких критичних значеннях D^* : суміші які запресовані у картонні оболонки з діаметром менше $(1,8...2,0) \cdot 10^{-2}$ м, не горять (тиск атмосферний, $d_{ок} < 180...200$ мкм). Перехід від менш теплопровідної оболонки до більш теплопровідної призводить до помітного збільшення α_{max} та u_{max} : $\alpha_{max} = 0,32$ та $u_{max} = 7,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка паперова); $\alpha_{max} = 0,45$ та $u_{max} = 8,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка сталева); $\alpha_{max} = 0,51$ та $u_{max} = 10,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка мідна); $\alpha_{max} = 0,63$ та $u_{max} = 12,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки), тобто суттєве зміщення α_{max} відбувається у бік надлишку окиснювача (більше, ніж у 1,5...2 рази), а швидкість горіння суміші збільшується у 1,4...1,7 разу, отже, заміна оболонки на більш теплопровідну (наприклад, паперову на мідну) і, тим більше, відсутність оболонки у зразків сумішей призводить як до суттєвого збільшення швидкості горіння суміші, так й до нестійкості, вибухонебезпечного розвитку процесу її горіння.

Суміш Al + Φ – 3. При зростанні K_y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,6...1,9 разу, а збільшення d_m від 56 мкм до 179 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 2,5...3,2 разу та послаблення залежності $u(K_y)$ у 1,2...1,3 разу (рис. 4.8).

Отримано наступні концентраційні межі горіння сумішей: $\alpha_{ВМГ} = 0,26$ та $\alpha_{НМГ} = 1,4$, в межах яких ($\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$) здійснюється стійкий, стабільний розвиток процесу горіння сумішей (рис. 4.9 – 4.11). Залежності $u(\alpha)$ також мають максимум u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення якого суттєво залежить від наступних технологічних параметрів: дисперсності металевго пального, діаметра зразка суміші та матеріалу його оболонки.

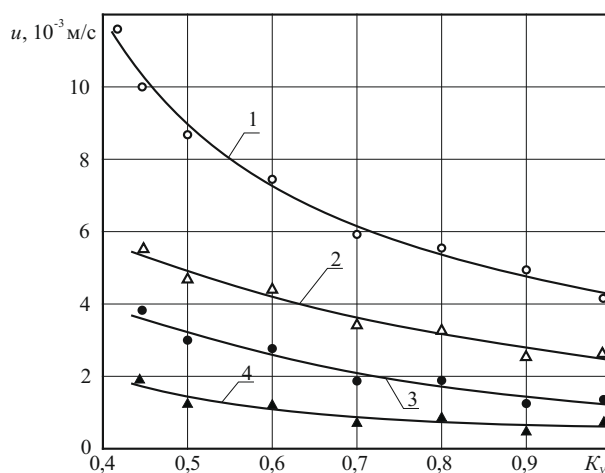


Рисунок 4.4 – Залежність швидкості горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ від коефіцієнта ущільнення для різних значень коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,7$; 4 – $\alpha = 3,0$; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані.

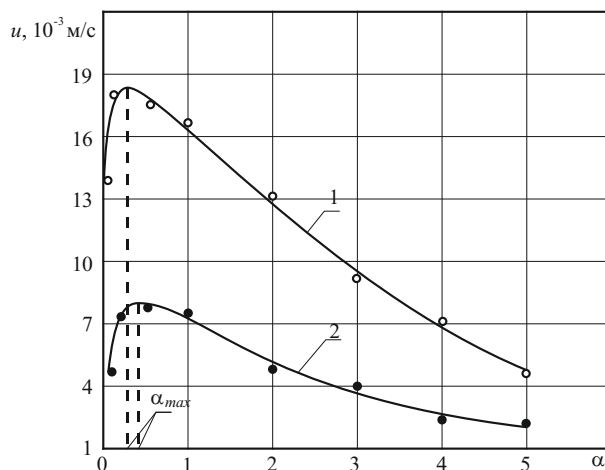


Рисунок 4.5 – Вплив дисперсності металевого пального у суміші $Mg + \Phi - 3$ на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_{ок} = 110...180$ мкм; $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1 – $d_m = 74,5$ мкм; $\alpha_{max} = 0,21$; 2 – $d_m = 135$ мкм; $\alpha_{max} = 0,32$; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні дані.

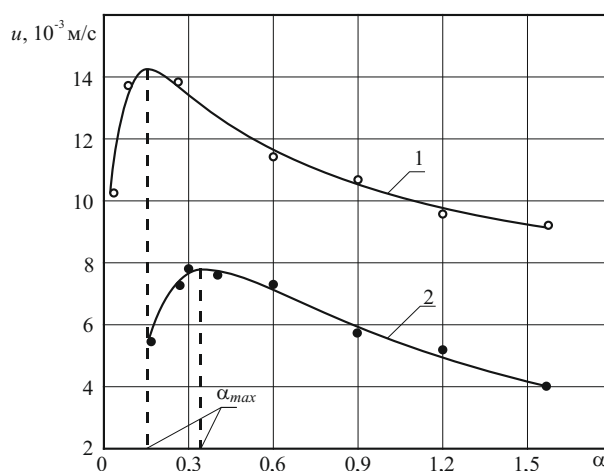


Рисунок 4.6 – Вплив діаметра зразка суміші $\text{Mg} + \Phi - 3$ на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 110...180 \text{ мкм}$; оболонка паперова; $K_Y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $D = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $\alpha_{max} = 0,18$; 2 – $D = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $\alpha_{max} = 0,32$; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні дані.

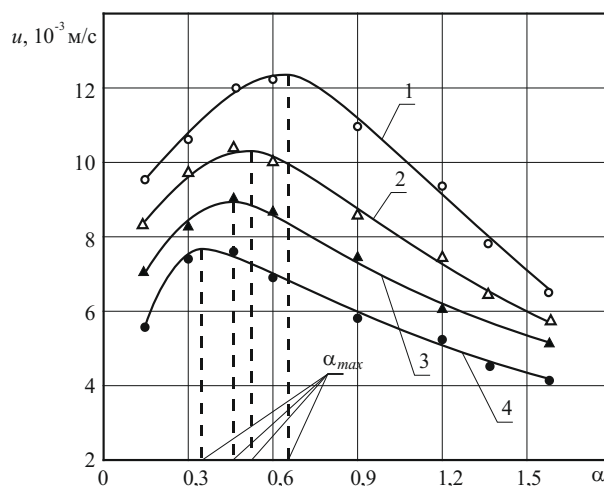


Рисунок 4.7 – Вплив матеріалу оболонки зразка суміші $\text{Mg} + \Phi - 3$ на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 110...180 \text{ мкм}$; $K_Y = 0,95...0,96$; $D = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – зразок без оболонки; $\alpha_{max} = 0,63$; 2 – зразок з мідною оболонкою; $\alpha_{max} = 0,51$; 3 – зразок зі сталевую оболонкою; $\alpha_{max} = 0,45$; 4 – зразок з паперовою оболонкою; $\alpha_{max} = 0,32$; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані.

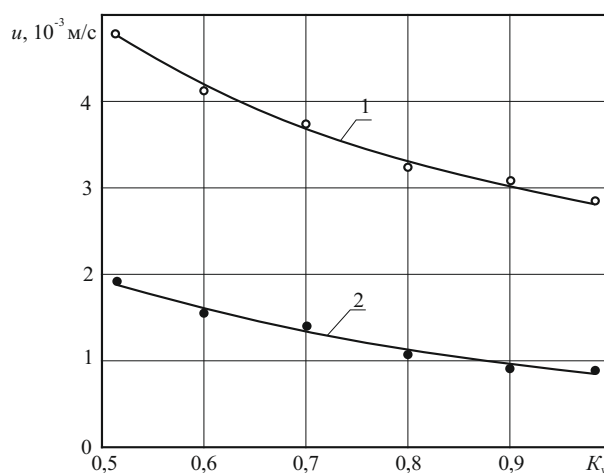


Рисунок 4.8 – Залежність швидкості горіння сумішей $\text{Al} + \Phi - 3$ від коефіцієнта ущільнення для різних значень дисперсності металевого пального ($\alpha = 1,2$; $d_{ок} = 110...180 \text{ мкм}$; $D = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; оболонка паперова; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 56 \text{ мкм}$; 2 – $d_m = 179 \text{ мкм}$; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні дані.

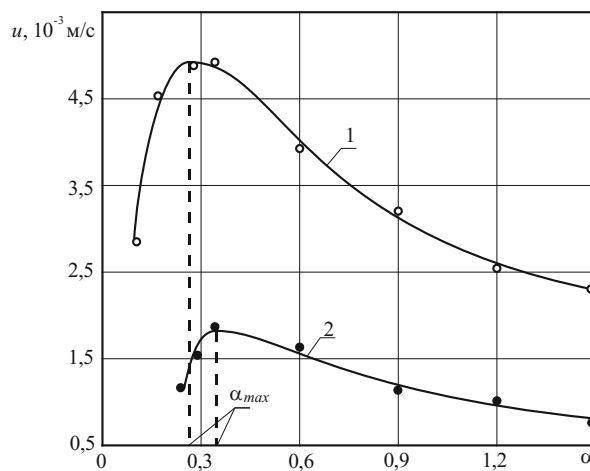


Рисунок 4.9 – Вплив дисперсності металевого пального у суміші $\text{Al} + \Phi - 3$ на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_{ок} = 110...180 \text{ мкм}$; $D = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; оболонка паперова; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 56 \text{ мкм}$; $\alpha_{max} = 0,28$; 2 – $d_m = 179 \text{ мкм}$; $\alpha_{max} = 0,35$; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні дані.

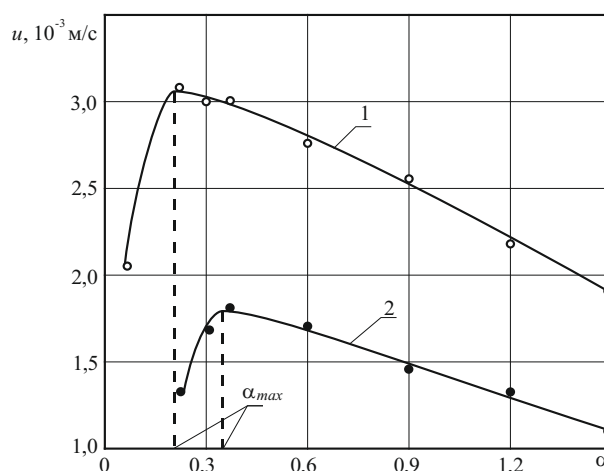


Рисунок 4.10 – Вплив діаметра зразка суміші $\text{Al} + \Phi - 3$ на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; оболонка паперова; $K_Y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1 – $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha_{max} = 0,23$; 2 – $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha_{max} = 0,35$; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні дані.

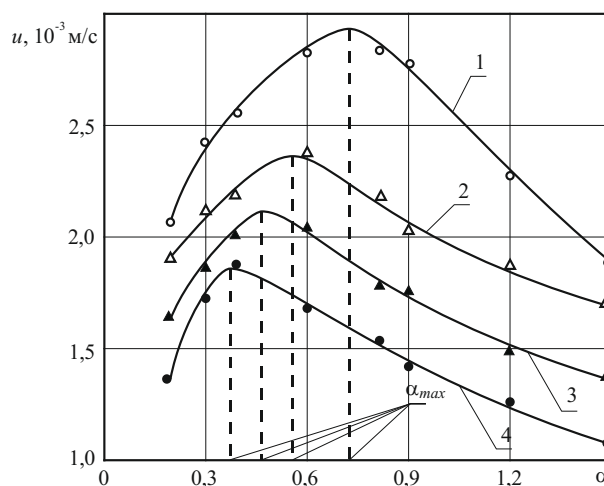


Рисунок 4.11 – Вплив матеріалу оболонки зразка суміші $\text{Al} + \Phi - 3$ на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_Y = 0,95...0,96$; $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): 1 – зразок без оболонки; $\alpha_{max} = 0,69$; 2 – зразок з мідною оболонкою; $\alpha_{max} = 0,57$; 3 – зразок зі сталевую оболонкою; $\alpha_{max} = 0,49$; 4 – зразок з паперовою оболонкою; $\alpha_{max} = 0,35$; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані.

Встановлено, що при збільшенні d_m від 56 мкм до 179 мкм значення α_{max} зростають від 0,28 до 0,35 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,1...2,4 разу, при цьому процес горіння стає більш стабільним та стійким. Зменшення D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м призводить до зменшення α_{max} від 0,35 до 0,23 (у бік надлишку металевого пального) та збільшення швидкості горіння суміші у 1,5...1,7 разу, що зменшує стабільність та стійкість її процесу горіння. Встановлено також критичні значення $D^* = (1,5...1,7) \cdot 10^{-2}$ м (оболонка паперова; $P = 10^5$ Па; $d_{ок} < 180...200$ мкм), при менших значеннях D суміші не горять. Отримано, що заміна менш теплопровідної оболонки на більш теплопровідну призводить до збільшення α_{max} та u_{max} : $\alpha_{max} = 0,35$ та $u_{max} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка паперова); $\alpha_{max} = 0,49$ та $u_{max} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка сталевая); $\alpha_{max} = 0,57$ та $u_{max} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка мідна); $\alpha_{max} = 0,69$ та $u_{max} = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки). Таким чином, перехід до більш теплопровідної оболонки (наприклад, від паперової до мідної або взагалі відсутність оболонки) значення α_{max} зростають у бік надлишку окиснювача у 1,3...1,8 разу, а швидкість горіння сумішей збільшується у 1,3...1,5 разу, що призводить до зниження стабільності та підвищення чутливості процесу їх горіння до різного роду зовнішніх впливів (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та ін.).

4.2. Закономірності впливу зовнішніх умов на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку процесу горіння сумішей

Вплив зовнішніх умов на швидкість розвитку процесу горіння сумішей Mg, Al + Ф – 3 + добавка органічної або неорганічної речовини. В результаті проведених експериментальних досліджень впливу підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на швидкість горіння сумішей Mg, Al + Ф – 3 для різних значень коефіцієнта надлишку окиснювача, а також на залежності швидкості горіння сумішей Mg, Al + Ф – 3 + добавка від

величини та природи органічної або неорганічної речовини встановлено наступні закономірності.

Суміш $Mg + \Phi - 3$. При підвищенні T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей зростає у 1,8...2,7 разу (рис. 4.12). При цьому зі збільшенням α від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,6...2 рази, а залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,3...1,5 разу (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші $Mg + \Phi - 3$ від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $P = 10^5$ Па)

α	0,6	1,2	2,0	2,5
$\bar{u}$	1,8	2,1	2,4	2,7

Примітка. Відносна швидкість горіння $\bar{u} = \frac{u|_{T_0=873\text{ К}}}{u|_{T_0=293\text{ К}}}$, де $u|_{T_0=293\text{ К}}$ – швидкість горіння при $T_0 = 293$ К; $u|_{T_0=873\text{ К}}$ – швидкість горіння при $T_0 = 873$ К.

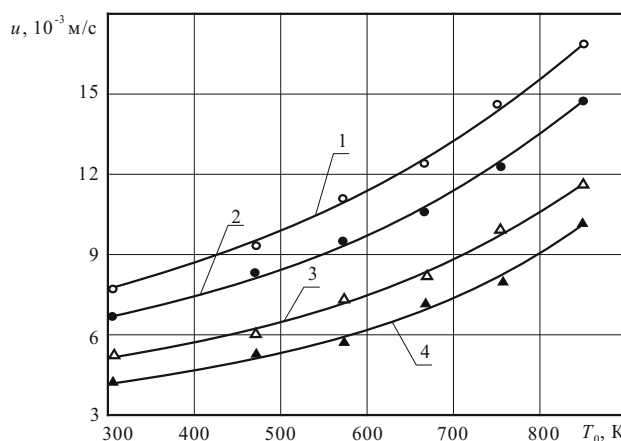


Рисунок 4.12 – Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ від температури нагріву ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $P = 10^5$ Па): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 1,2$; 3 – $\alpha = 2,0$; 4 – $\alpha = 2,5$; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані.

При зростанні P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей збільшується у 2,5...3 рази (рис. 4.13). Зі збільшенням α від 0,6 до 2,5

швидкість горіння сумішей зменшується вже у 2,1...3 рази, а залежність $u(P)$ підсилюється у 1,4...1,6 разу (табл. 4.2).

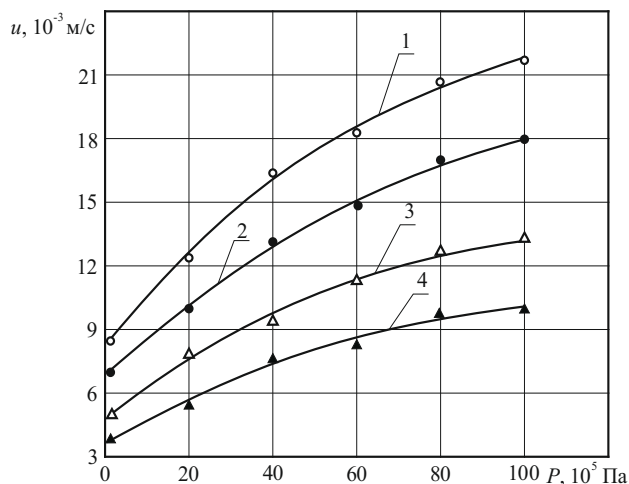


Рисунок 4.13 – Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ від зовнішнього тиску ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ K): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 1,2$; 3 – $\alpha = 2,0$; 4 – $\alpha = 2,5$; ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані.

Таблиця 4.2 – Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші $Mg + \Phi - 3$ від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ K)

α	0,6	1,2	2,0	2,5
$\bar{u}$	2,1	2,5	2,7	3,0

Примітка. Відносна швидкість горіння $\bar{u} = \frac{u|_{P=10^7 \text{ Па}}}{u|_{P=10^5 \text{ Па}}}$, де $u|_{P=10^5 \text{ Па}}$ – швидкість горіння при $P = 10^5$ Па; $u|_{P=10^7 \text{ Па}}$ – швидкість горіння при $P = 10^7$ Па.

Суміш $Mg + \Phi - 3$ + добавка органічної речовини. Збільшення відносного вмісту добавки ε від 0,02 до 0,13 при $T_0 = 293$ K ($P = 10^5$ Па) призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 1,4...3,6 разу (рис. 4.14): у 3,4...3,6 разу (для добавок СКН-10-1); у 2,5...2,8 разу (для добавок ЕД-5); у 2,0...2,2 разу (для добавок стеарину); у 1,7...1,9 разу (для добавок уротропіну); у 1,5...1,6 разу (для добавок тіоколу); у 1,3...1,4 разу

(для добавок парафіну). При підвищенні T_0 (до 873 K) при $P = 10^5$ Па швидкість горіння сумішей зменшується вже у 1,3...3,5 разу (рис. 4.15): у 3,2...3,5 разу (для добавок СКН-10-1); у 2,3...2,7 разу (для добавок ЕД-5); у 1,9...2,1 разу (для добавок стеарину); у 1,6...1,8 разу (для добавок уротропіну); у 1,4...1,5 разу (для добавок тіоколу); у 1,2...1,3 разу (для добавок парафіну). При зростанні P (до 10^7 Па) при $T_0 = 293$ K швидкість горіння сумішей зі збільшенням ε (до $\varepsilon = 0,13$) також зменшується у 2,3...5,7 разу: у 5,3...5,7 разу (для добавок СКН-10-1); у 4,2...4,5 разу (для добавок ЕД-5); у 3,4...3,8 разу (для добавок стеарину); у 3,1...3,3 разу (для добавок уротропіну); у 2,7...2,9 разу (для добавок тіоколу); у 2,3...2,5 разу (для добавок парафіну).

Вплив розглядуваних добавок органічних речовин у суміш $Mg + \Phi-3$ на залежність $u(\varepsilon)$ при підвищених P (до 10^7 Па) у 1,5...1,9 разу сильніше, ніж при підвищених T_0 (до 873 K). Крім цього, при підвищених T_0 залежність $u(\varepsilon)$ послаблюється у 1,3...1,4 разу, а при підвищених P – залежність $u(\varepsilon)$ вже підсилюється у 1,5...1,8 разу.

Таким чином, як при нормальних зовнішніх умовах ($T_0 = 293$ K, $P = 10^5$ Па), так й при підвищених T_0 (до 873 K) та P (до 10^7 Па) органічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ розташовуються у вигляді наступної послідовності:

СКН-10-1 > ЕД-5 > стеарин > уротропін > тіокол > парафін.

Суміш $Al + \Phi - 3$. При зростанні T_0 від 293 K до 873 K швидкість горіння сумішей збільшується у 1,7...2,3 разу (рис. 4.16). Зі збільшенням α від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,4...1,8 разу, а залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,3...1,4 разу (табл. 4.3).

При збільшенні P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей зростає у 1,9...2,5 разу (рис. 4.17). Зі зростанням α від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,5...1,9 разу, а залежність $u(P)$ підсилюється у 1,5...1,6 разу (табл. 4.4).

Таблиця 4.3 – Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші $Al + \Phi - 3$ від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110 \dots 180$ мкм; $K_Y = 0,95 \dots 0,96$; $P = 10^5$ Па)

α	0,6	0,9	1,2	1,4
$\bar{u}$	1,6	1,9	2,1	2,3

Суміш $Al + \Phi - 3 +$ добавка неорганічної речовини. Збільшення відносного вмісту добавки ε від 0,02 до 0,10 при $T_0 = 293$ К ($P = 10^5$ Па) призводить як до зменшення швидкості горіння сумішей (для добавок CuO та Cr_2O_3), так й до її збільшення (для добавок MnO_2 , Ni_2O_3 , $KMnO_4$ та V_2O_5) (рис. 4.18): у 1,2 разу (для добавок CuO); у 1,4 разу (для добавок Cr_2O_3); у 1,2 разу (для добавок V_2O_5); у 1,3 разу (для добавок $KMnO_4$); у 1,5 разу (для добавок Ni_2O_3); у 1,7 разу (для добавок MnO_2). Зростання T_0 (до 873 К) при $P = 10^5$ Па та $\varepsilon = 0,02 \dots 0,10$ призводить до наступних змін швидкості горіння сумішей: до зменшення швидкості горіння у 1,3 разу (для добавок CuO) та у 1,5 разу (для добавок Cr_2O_3); до збільшення швидкості горіння у 1,3 разу (для добавок V_2O_5); у 1,4 разу (для добавок $KMnO_4$); у 1,6 разу (для добавок Ni_2O_3) та у 1,8 разу (для добавок MnO_2).

Таблиця 4.4 – Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші $Al + \Phi - 3$ від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110 \dots 180$ мкм; $K_Y = 0,95 \dots 0,96$; $T_0 = 293$ К)

α	0,6	0,9	1,2	1,4
$\bar{u}$	1,9	2,1	2,3	2,4

При збільшенні P (до 10^7 Па) при $T_0 = 293$ К швидкість горіння сумішей зі зростанням ε (до $\varepsilon = 0,10$) також змінюється (рис. 4.19): зменшується у 1,15 разу (для добавок CuO) та у 1,2 разу (для добавок Cr_2O_3); збільшується у 1,1 разу (для добавок V_2O_5); у 1,2 разу (для добавок $KMnO_4$); у 1,4 разу (для добавок Ni_2O_3) та у 1,6 разу (для добавок MnO_2).

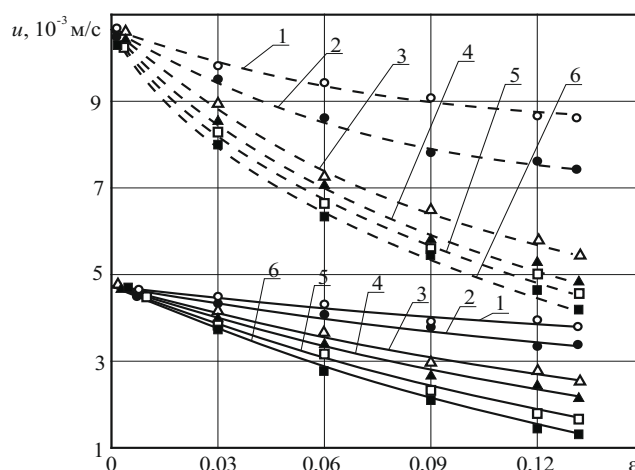


Рисунок 4.14 – Вплив підвищених температур нагріву на залежності швидкості горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ від величини добавок органічних речовин ($\alpha = 2,0$; $d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_V = 0,95...0,96$; $P = 10^5$ Па): 1 – парафін; 2 – тіокол; 3 – уротропін; 4 – стеарин; 5 – ЕД-5; 6 – СКН-10-1; — — — — $T_0 = 293$ К; — — — — $T_0 = 873$ К; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$ – експериментальні дані.

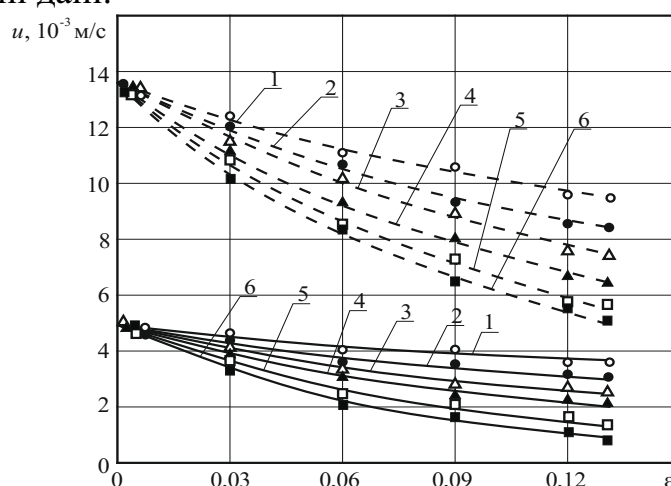


Рисунок 4.15 – Вплив підвищених зовнішніх тисків на залежності швидкості горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ від величини добавок органічних речовин ($\alpha = 2,0$; $d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_V = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К): 1 – парафін; 2 – тіокол; 3 – уротропін; 4 – стеарин; 5 – ЕД-5; 6 – СКН-10-1; — — — — $P = 10^5$ Па; — — — — $P = 10^7$ Па; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$ – експериментальні дані.

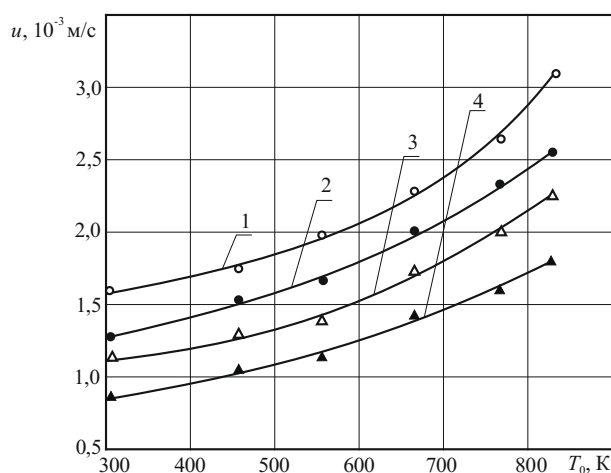


Рисунок 4.16 – Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей $\text{Al} + \Phi - 3$ від температури нагріву ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110 \dots 180$ мкм; $K_V = 0,95 \dots 0,96$; $P = 10^5$ Па): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 0,9$; 3 – $\alpha = 1,2$; 4 – $\alpha = 1,4$; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані.

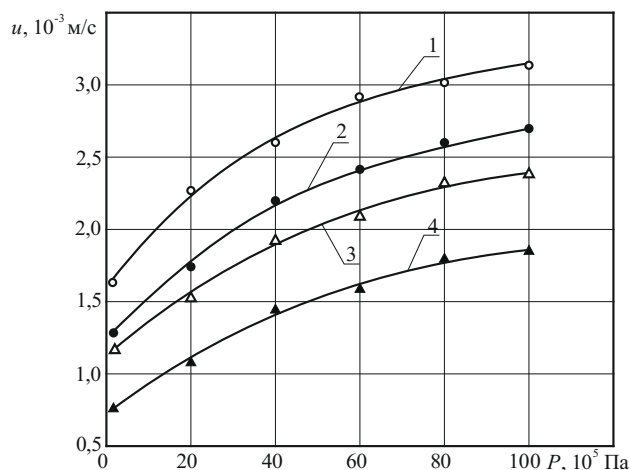


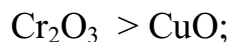
Рисунок 4.17 – Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей $\text{Al} + \Phi - 3$ від зовнішнього тиску ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110 \dots 180$ мкм; $K_V = 0,95 \dots 0,96$; $T_0 = 293$ К): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 0,9$; 3 – $\alpha = 1,2$; 4 – $\alpha = 1,4$; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані.

Таким чином, для сумішей $\text{Al} + \Phi - 3$ ступінь впливу підвищених T_0 та P на характер залежностей $u(\varepsilon)$ діаметрально протилежний: при підвищених T_0 (до 873 К) залежність $u(\varepsilon)$ підсилюється у 1,2...1,3 разу, а для підвищених зовнішніх тисків (до 10^7 Па) – послаблюється у 1,1...1,2 разу.

Як при нормальних зовнішніх умовах ($T_0 = 293$ К, $P = 10^5$ Па), так й при підвищених T_0 (до 873 К) та P (до 10^7 Па) неорганічні речовини за ступенем

їх впливу на швидкість горіння сумішей $Al + \Phi - 3$ розташовуються у вигляді наступних послідовностей:

за ступенем зменшення швидкості горіння



за ступенем зростання швидкості горіння

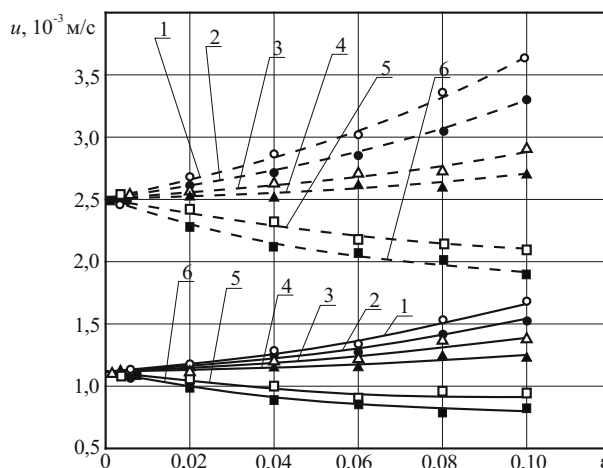
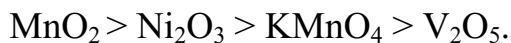


Рисунок 4.18 – Вплив підвищених температур нагріву на залежності швидкості горіння сумішей $Al + \Phi - 3$ від величини добавок неорганічних речовин ($\alpha = 1,2$; $d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $P = 10^5$ Па): 1 – MnO_2 ; 2 – Ni_2O_3 ; 3 – $KMnO_4$; 4 – V_2O_5 ; 5 – CuO ; 6 – Cr_2O_3 ; — — $T_0 = 293$ К; - - - - $T_0 = 873$ К; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$, $\blacksquare$, $\square$ – експериментальні дані.

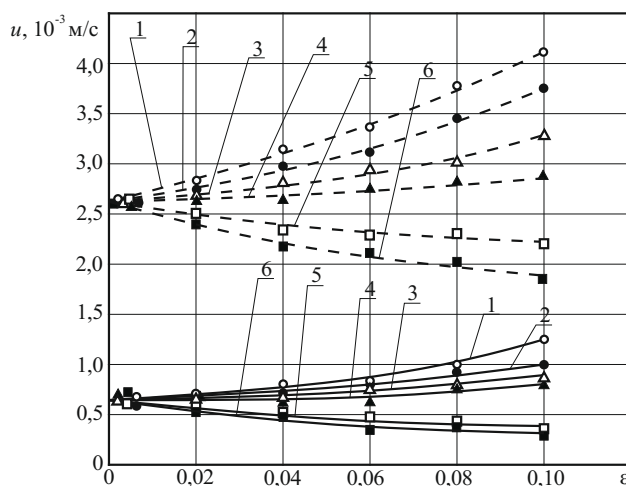


Рисунок 4.19 – Вплив підвищених зовнішніх тисків на залежності швидкості горіння сумішей $Al + \Phi - 3$ від величини добавок органічних речовин ($\alpha = 1,2$; $d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К): 1 – MnO_2 ; 2 – Ni_2O_3 ; 3 – $KMnO_4$; 4 – V_2O_5 ; 5 – CuO ; 6 – Cr_2O_3 ; — — $P = 10^5$ Па; - - - - $P = 10^7$ Па; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$, $\blacksquare$, $\square$ – експериментальні дані.

Підсумовуючи, необхідно відзначити, що на стадії виготовлення піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів, шляхом регулювання технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, діаметра зарядів сумішей та матеріалу їхніх оболонок) можна запобігати передчасному вибухонебезпечному розвитку горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів. Ці впливи можуть включати пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються піротехнічні вироби на основі вказаних сумішей, транспортування в умовах зовнішнього нагріву, а також термоударні впливи в умовах пострілу та польоту виробів та інше. Регулювання цих параметрів дозволяє підвищувати пожежну безпеку виробів у зазначених умовах.

4.3. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по температурам займання частинок металевих палих в газоподібних продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей

Моделі для розрахунку залежностей температури займання (T_z , K) від розміру частинок металу (d_m , мкм), коефіцієнта надлишку окиснювача (α) та зовнішнього тиску (P , Па). Експериментальні дані були отримані із застосуванням стандартного піротехнічного обладнання, а також відомих фотографічних методів та методів мікрокінозйомки. Мікрокінозйомка проводилася за допомогою кінокамери СКС–1М зі швидкістю 4500...5000 кадр/с зі зменшенням у 1,5...2 рази) [6, 74]. Математичні моделі для досліджуваних металів наведено нижче, причому їхня відносна похибка становить 5...7%. Це свідчить про достатній ступінь адекватності моделей експериментальним даним.

Магній

$$T_z(d_m, \alpha, P) = \alpha + 1,8 \cdot 10^{-2} \cdot (93 - 7,4 \cdot P) \cdot d_m^{0,6} + (353,5 - 83,7 \cdot P) \cdot (1 - \alpha) \cdot d_m^{-1} - 64,7 \cdot P^{-2} \cdot d_m + 971 - 1,7 \cdot P - 0,3 \cdot P^{0,5} \cdot (d_m + \alpha)^{-1}. \quad (4.1)$$

Діапазони зміни керованих параметрів $54 \leq d_m \leq 305$ мкм; $0,5 \leq \alpha \leq 1,5$;
 $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па.

Алюміній

$$\begin{aligned} T_2(d_m, \alpha, P) = & \alpha + 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot (115 - 7,1 \cdot P) \cdot d_m^{0,47} + (273,4 - 81,0 \cdot P) \cdot (1 - \alpha) \cdot d_m^{-1} - \\ & - 71,3 \cdot P^{-3,1 \cdot d_m} + 1387 - 1,74 \cdot P - 0,11 \cdot P^{0,53} \cdot (d_m + \alpha)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Діапазони зміни керованих параметрів $54 \leq d_m \leq 310$ мкм; $0,5 \leq \alpha \leq 1,5$;
 $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па.

Цирконій

$$\begin{aligned} T_2(d_m, \alpha, P) = & \alpha + 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot (101,4 - 7,5 \cdot P) \cdot d_m^{0,3} + (284,3 - 87,2 \cdot P) \cdot (1 - \alpha) \cdot d_m^{-1} - \\ & - 73,5 \cdot P^{-2,8 \cdot d_m} + 773 - 2,34 \cdot P - 1,2 \cdot P^{0,8} \cdot (d_m + \alpha)^{-1} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Діапазони зміни керованих параметрів $54 \leq d_m \leq 310$ мкм; $0,5 \leq \alpha \leq 1,5$;
 $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па.

На основі результатів розрахунків, отриманих за формулами (4.1) – (4.3) (рис. 4.20 – 4.31), встановлено наступні діапазони зміни температури спалахування частинок металів в продуктах термічного розкладання сумішей: $T_z = 680 \dots 1230$ К – для частинок магнію; $T_z = 1070 \dots 1890$ К – для частинок алюмінію; $T_z = 585 \dots 1800$ К – для частинок цирконію.

При цьому, за результатами проведених розрахунків, встановлено, що для діапазонів зміни технологічних (α , d_m) та зовнішніх параметрів (P), що використовуються на практиці, процеси займання та подальшого розвитку горіння частинок металів протікають стабільно, без набуття вибухового характеру. Крім того, виявлено, що варіація зазначених параметрів суттєво впливає на температуру спалахування частинок металів: збільшення α та d_m призводить до зменшення T_z відповідно у 1,3...1,6 разу та у 1,4...1,8 разу, а збільшення P – до зростання T_z у 1,5...1,7 разу.

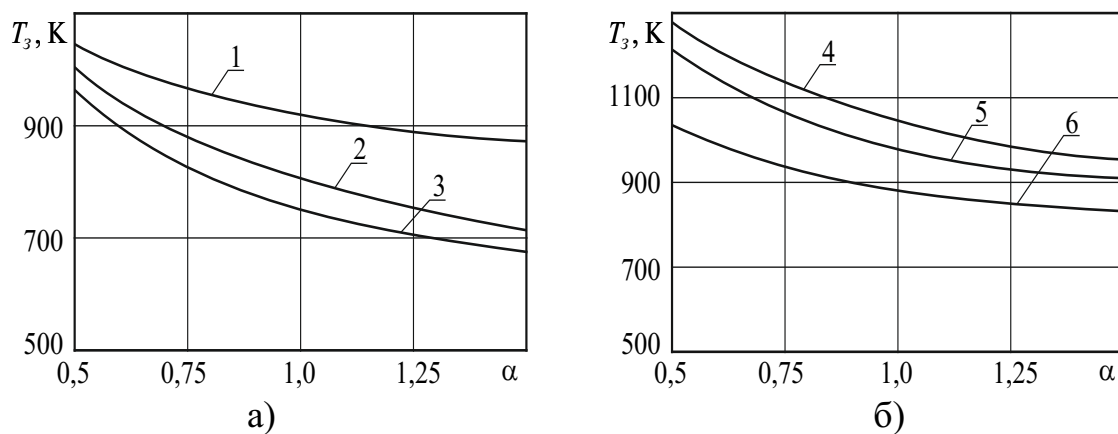


Рисунок 4.20 – Вплив розміру частинок магнію (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $d_m = 50$ мкм) на залежність температури їх займання від коефіцієнта надлишку окиснювача: 1 – $d_m = 50$ мкм; 2 – $d_m = 100$ мкм; 3 – $d_m = 300$ мкм; 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па.

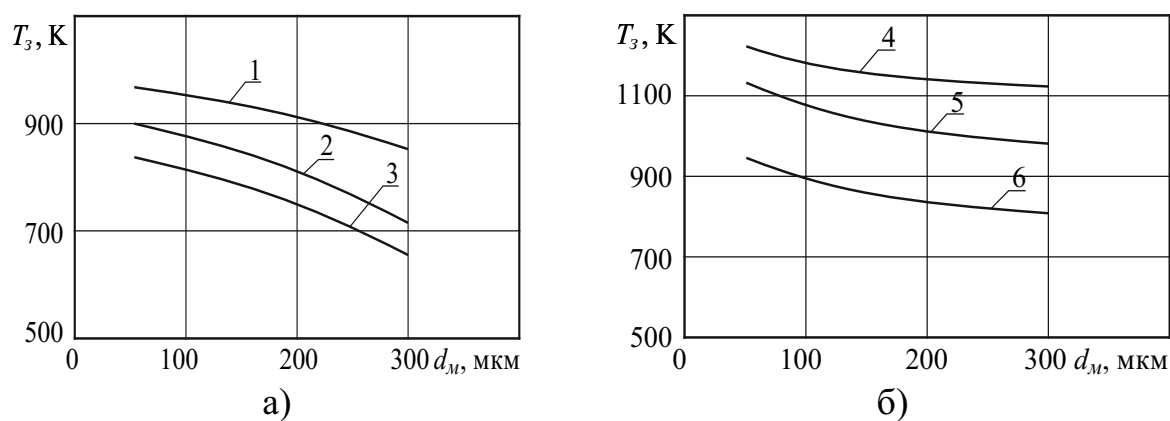


Рисунок 4.21 – Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $\alpha = 0,5$) на залежність температури займання частинок магнію від їх розміру: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,5$; 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па.

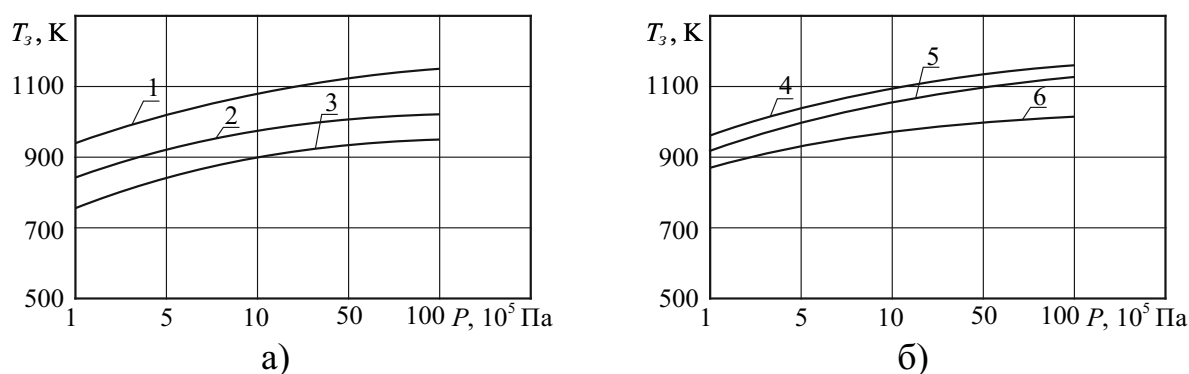


Рисунок 4.22 — Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача (а, $d_m = 50$ мкм) та розміру частинок магнію (б, $\alpha = 0,5$) на залежність температури їх займання від зовнішнього тиску: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,5$; 4 – $d_m = 50$ мкм; 5 – $d_m = 100$ мкм; 6 – $d_m = 300$ мкм.

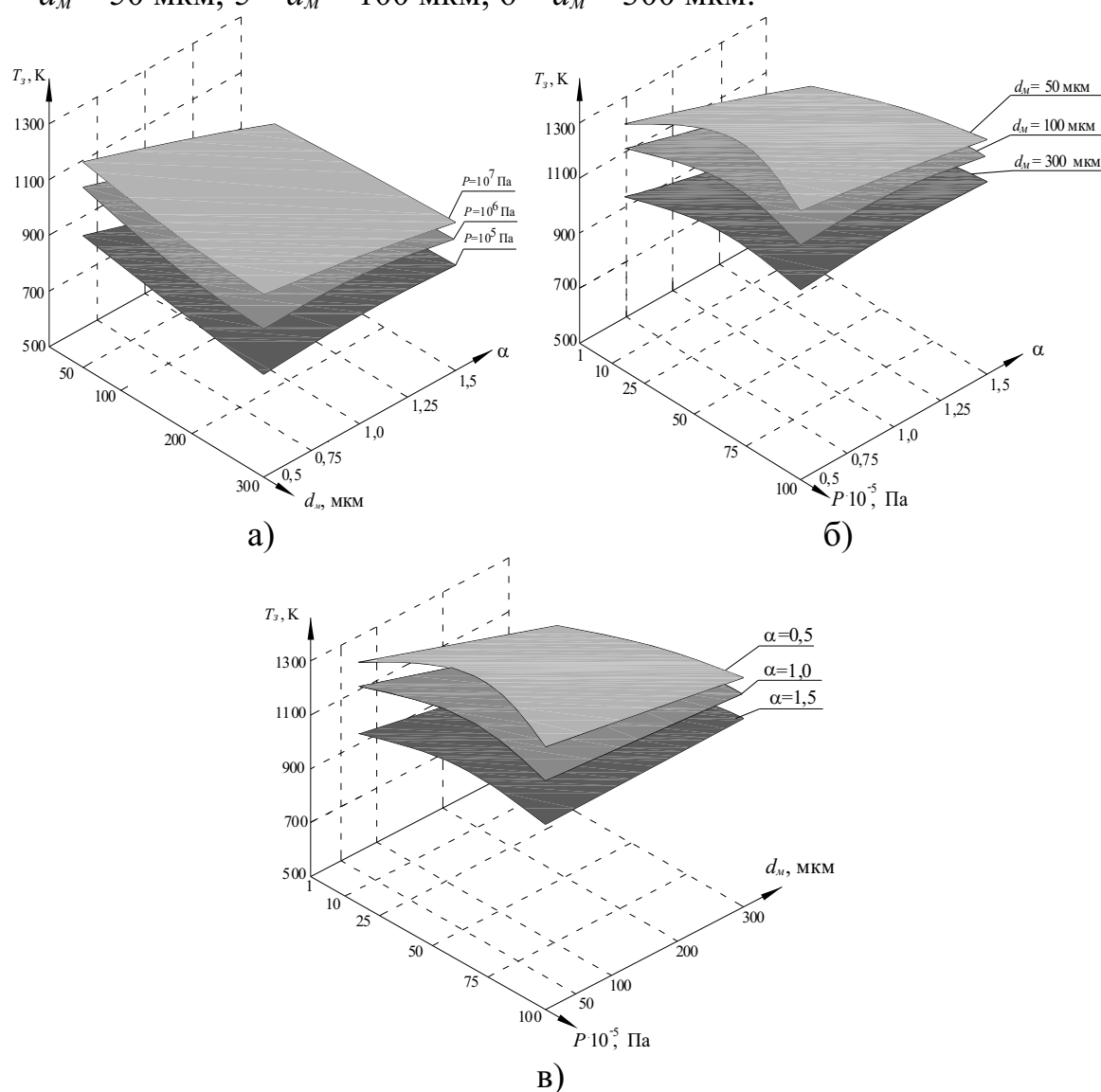
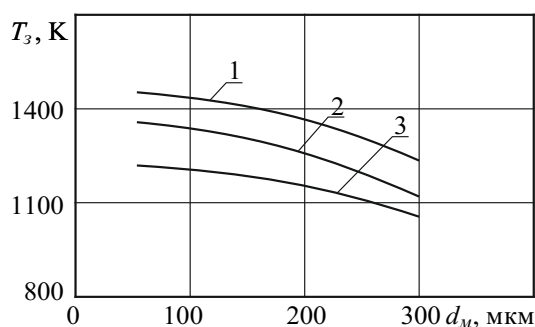
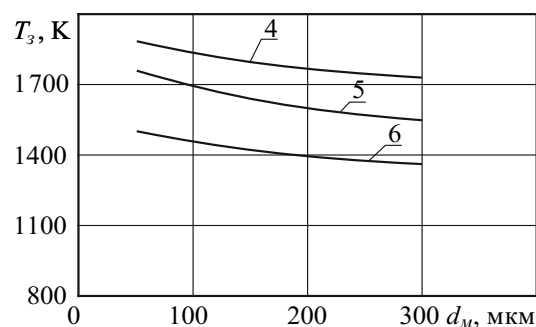


Рисунок 4.23 — Тримірне зображення залежностей температури займання частинок магнію від наступних параметрів: а) – від α та d_m ; б) – від α та P ; в) – від P та d_m .

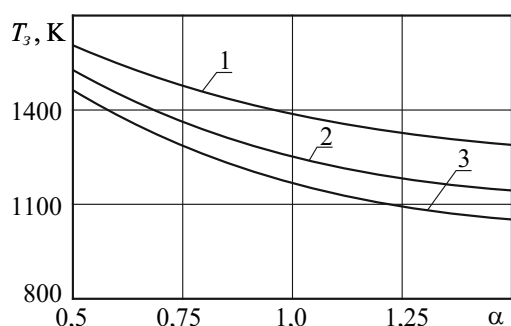


а)

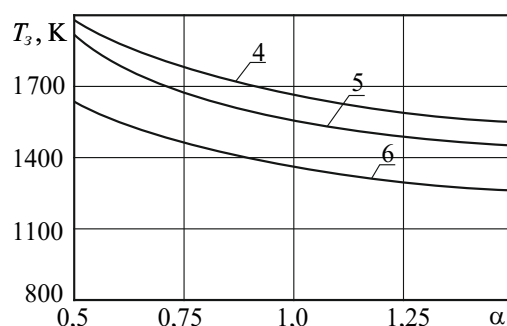


б)

Рисунок 4.24 — Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $\alpha = 0,5$) на залежність температури займання частинок алюмінію від їх розміру: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,5$; 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па.

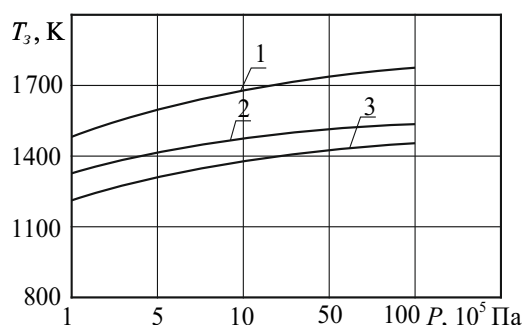


а)

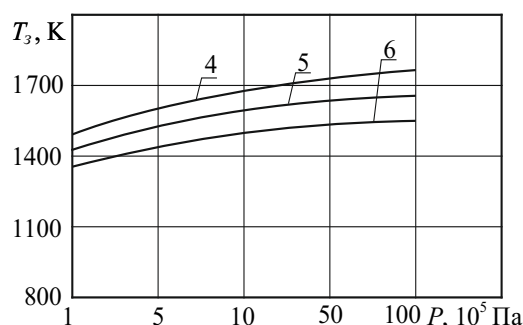


б)

Рисунок 4.25 — Вплив розміру частинок алюмінію (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $d_m = 50$ мкм) на залежність температури їх займання від коефіцієнта надлишку окиснювача: 1 – $d_m = 50$ мкм; 2 – $d_m = 100$ мкм; 3 – $d_m = 300$ мкм; 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па.



а)



б)

Рисунок 4.26 — Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача (а, $d_m = 50$ мкм) та розміру частинок алюмінію (б, $\alpha = 0,5$) на залежність температури їх займання від зовнішнього тиску: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,5$; 4 – $d_m = 50$ мкм; 5 – $d_m = 100$ мкм; 6 – $d_m = 300$ мкм.

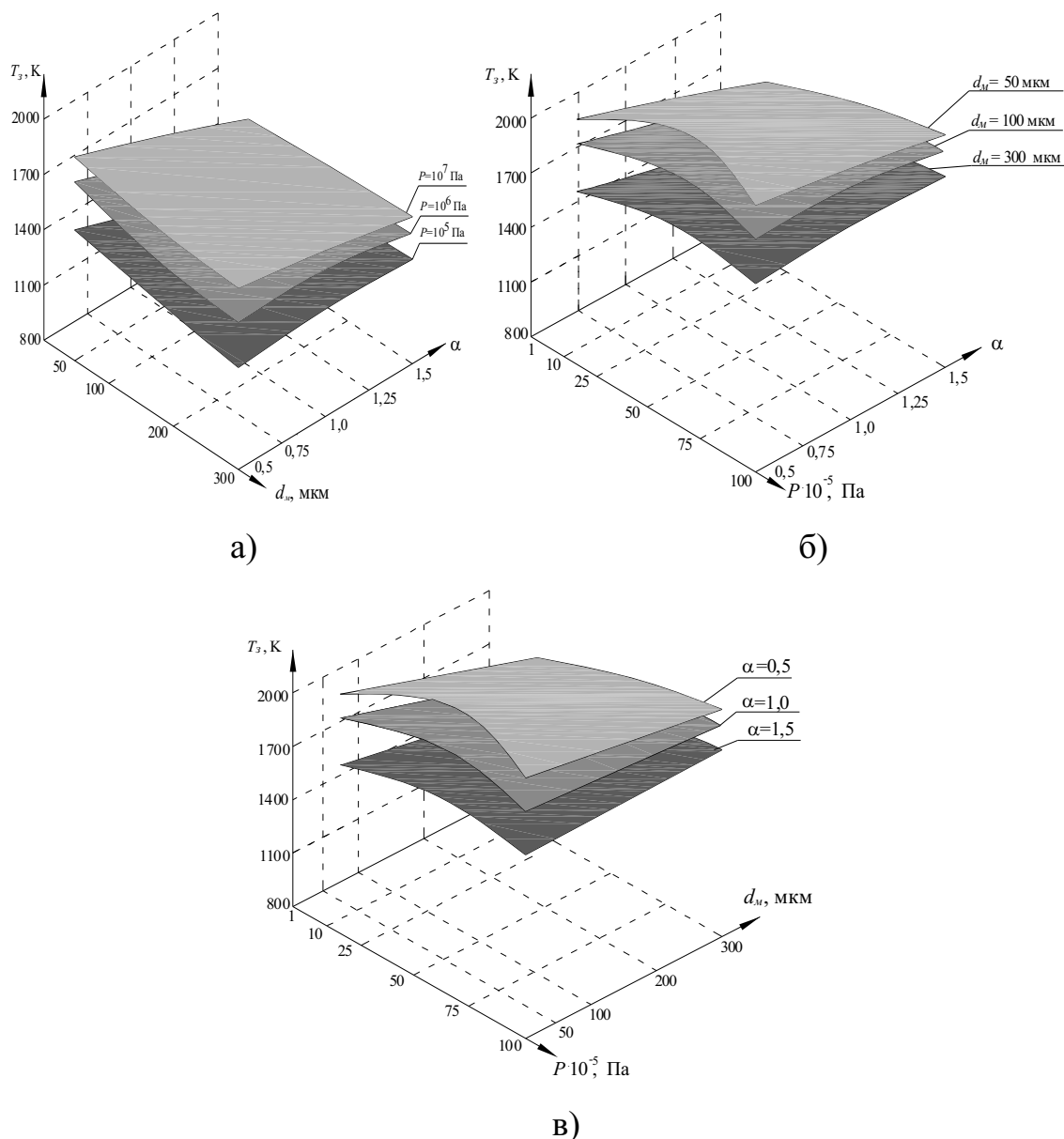


Рисунок 4.27 — Тримірне зображення залежностей температури займання частинок алюмінію від наступних параметрів: а) — від α та d_M ; б) — від α та P ; в) — від P та d_M .

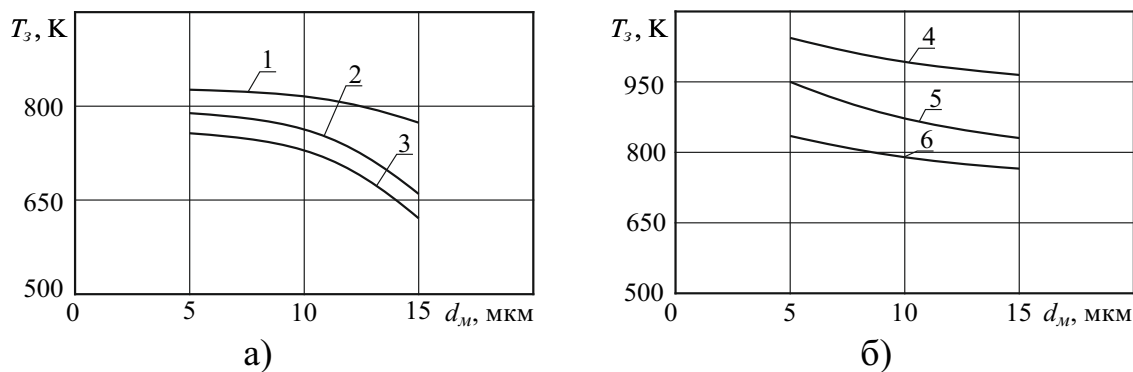
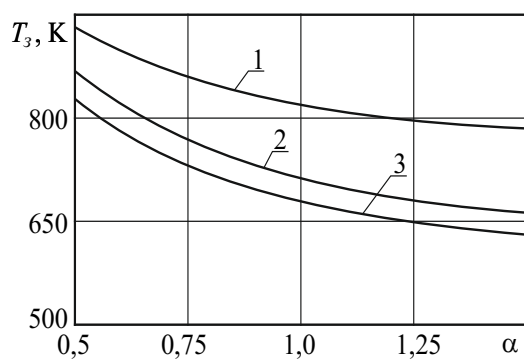
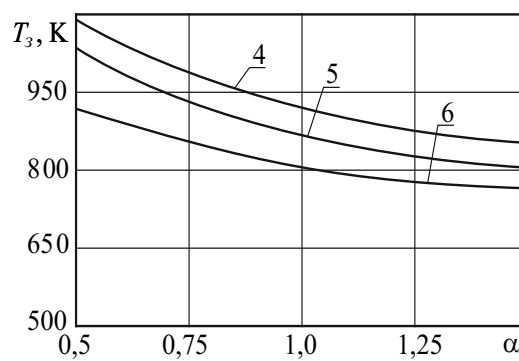


Рисунок 4.28 — Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $\alpha = 0.5$) на залежність температури займання частинок цирконію від їх розміру: 1 — $\alpha = 0.5$; 2 — $\alpha = 1.0$; 3 — $\alpha = 1.5$; 4 — $P = 10^7$ Па; 5 — $P = 10^6$ Па; 6 — $P = 10^5$ Па.

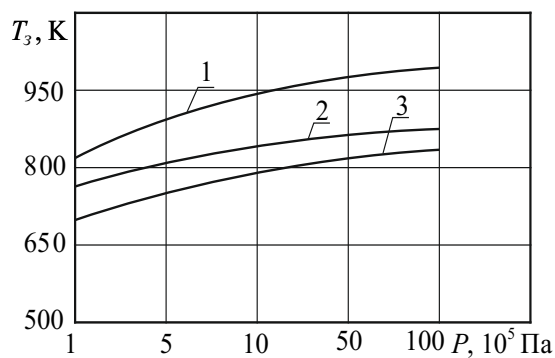


а)

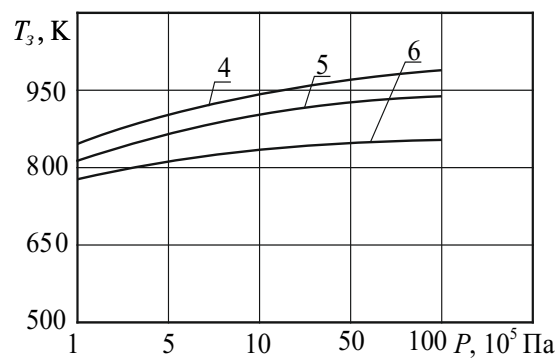


б)

Рисунок 4.29 — Вплив розміру частинок цирконію (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $d_m = 5$ мкм) на залежність температури їх займання від коефіцієнта надлишку окиснювача: 1 – $d_m = 5$ мкм; 2 – $d_m = 10$ мкм; 3 – $d_m = 15$ мкм; 4 – $P = 10^7$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^5$ Па.



а)



б)

Рисунок 4.30 — Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача (а, $d_m = 5$ мкм) та розміру частинок цирконію (б, $\alpha = 0,5$) на залежність температури їх займання від зовнішнього тиску: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,5$; 4 – $d_m = 5$ мкм; 5 – $d_m = 10$ мкм; 6 – $d_m = 15$ мкм

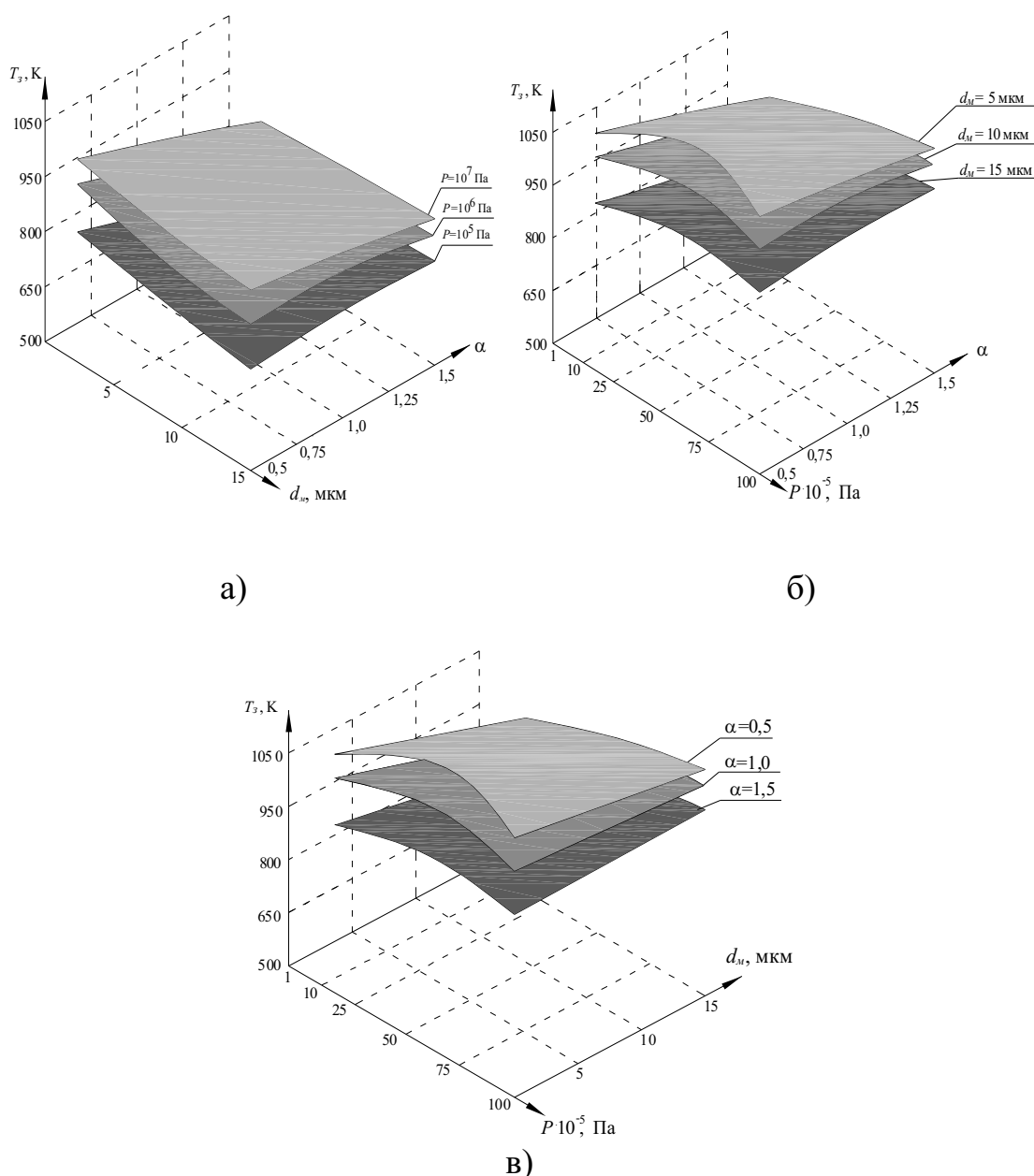


Рисунок 4.31 – Тримірне зображення залежностей температури займання частинок цирконію від наступних параметрів: а) – від α та d_m ; б) – від α та P ; в) – від P та d_m .

Розроблені експериментально-статистичні моделі (4.1) – (4.3) забезпечують можливість, за допомогою стандартного спеціального програмного забезпечення [6, 74] на персональному комп'ютері (ПК), формувати в діалоговому режимі керовану базу даних щодо температур займання частинок металів у газоподібних продуктах розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів в умовах зовнішнього нагріву. Зазначена база даних має потенціал бути інтегрована

як основа для створення більш загальної керованої бази теоретико-експериментальних даних, призначеної для прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів різного призначення в умовах зовнішніх термічних дій

4.4. Керована база даних по часам згоряння частинок металевих палих в продуктах термічного розкладання сумішей

Моделі для розрахунку залежностей часу горіння (τ_z , с) від розміру частинок металу (d_m , мкм), коефіцієнта надлишку окиснювача (α) в суміші, швидкості потоку (V , м/с) та зовнішнього тиску (P , Па). Розглядалися експериментальні дані, отримані для температур навколишнього середовища $T_z = 1100...1300$ К, які є характерними для реакційної зони та температури поверхні горіння досліджуваних сумішей. Використані експериментальні дані були отримані на стандартному піротехнічному обладнанні із застосуванням відомих фотографічних методів, а також методів мікрокінозйомки (за допомогою кінокамери СКС-1М, зі швидкістю зйомки 3000 – 5000 кадр/с) [6, 74].

Моделі для досліджуваних металів наведено нижче, причому їхня відносна похибка становить 5...7 %. Це підтверджує високий ступінь адекватності моделей експериментальним результатам.

Магній

$$\begin{aligned} \tau_z(d_m, \alpha, V, P) = & (0,019 - 4,3 \cdot \frac{P}{V}) \cdot \alpha^2 + (0,47 + 0,01 \cdot P \cdot V^{0,01}) \cdot \alpha + 0,84 + \\ & + 0,2 \cdot V \cdot P^{0,3} + 10^{-5} \cdot \frac{d_m}{P} + P^{0,2} \cdot (0,03 + 0,1 \cdot V^{1,1}) \cdot (V + \alpha + 0,5)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Алюміній

$$\begin{aligned} \tau_z(d_m, \alpha, V, P) = & (0,021 - 4,2 \cdot \frac{P}{V}) \cdot \alpha^2 + (1,17 + 0,01 \cdot P \cdot V^{0,02}) \cdot \alpha + 0,87 + \\ & + 0,4 \cdot V \cdot P^{0,3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{d_m}{P} + P^{0,3} \cdot (0,13 + 0,07 \cdot V^{1,23}) \cdot (V + \alpha + 0,15)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Цирконій

$$\tau_z(d_m, \alpha, V, P) = (0,017 - 3,4 \cdot \frac{P}{V}) \cdot \alpha^2 + (0,27 + 0,03 \cdot P \cdot V^{0,01}) \cdot \alpha + 0,65 + \\ + 0,07 \cdot V \cdot P^{0,2} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d_m}{P} + P^{0,54} \cdot (0,021 + 0,09 \cdot V^{1,25}) \cdot (V + \alpha + 0,18)^{-1}. \quad (4.6)$$

Результати розрахунків по формулам (4.4) – (4.6) (рис. 4.32 – 4.34) дозволили встановити наступні діапазони зміни часів згорання частинок металів в продуктах термічного розкладання піротехнічних нітратно-металевих сумішей ($\alpha = 0,5 \dots 1,5$; $P = 10^5 \dots 10^7$ Па; $V = 1 \dots 10$ м/с):

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

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

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

Додатково, за результатами проведених розрахунків, для діапазонів зміни параметрів, що використовуються на практиці (d_m – середній розмір частинок, α – коефіцієнт надлишку окиснювача, P та V), процес горіння частинок металів протікає стабільно, без вибухових фрагментацій.

Встановлено, що варіація цих параметрів суттєво впливає на час згорання частинок металів: збільшення d_m призводить до помітного зростання τ_z (у 9...11 разів), а збільшення α , P та V – до зменшення τ_z відповідно у 1,6 – 1,9 разу (для V), у 1,9 – 3,2 разу (для α) та у 10 – 12 разів (для P).

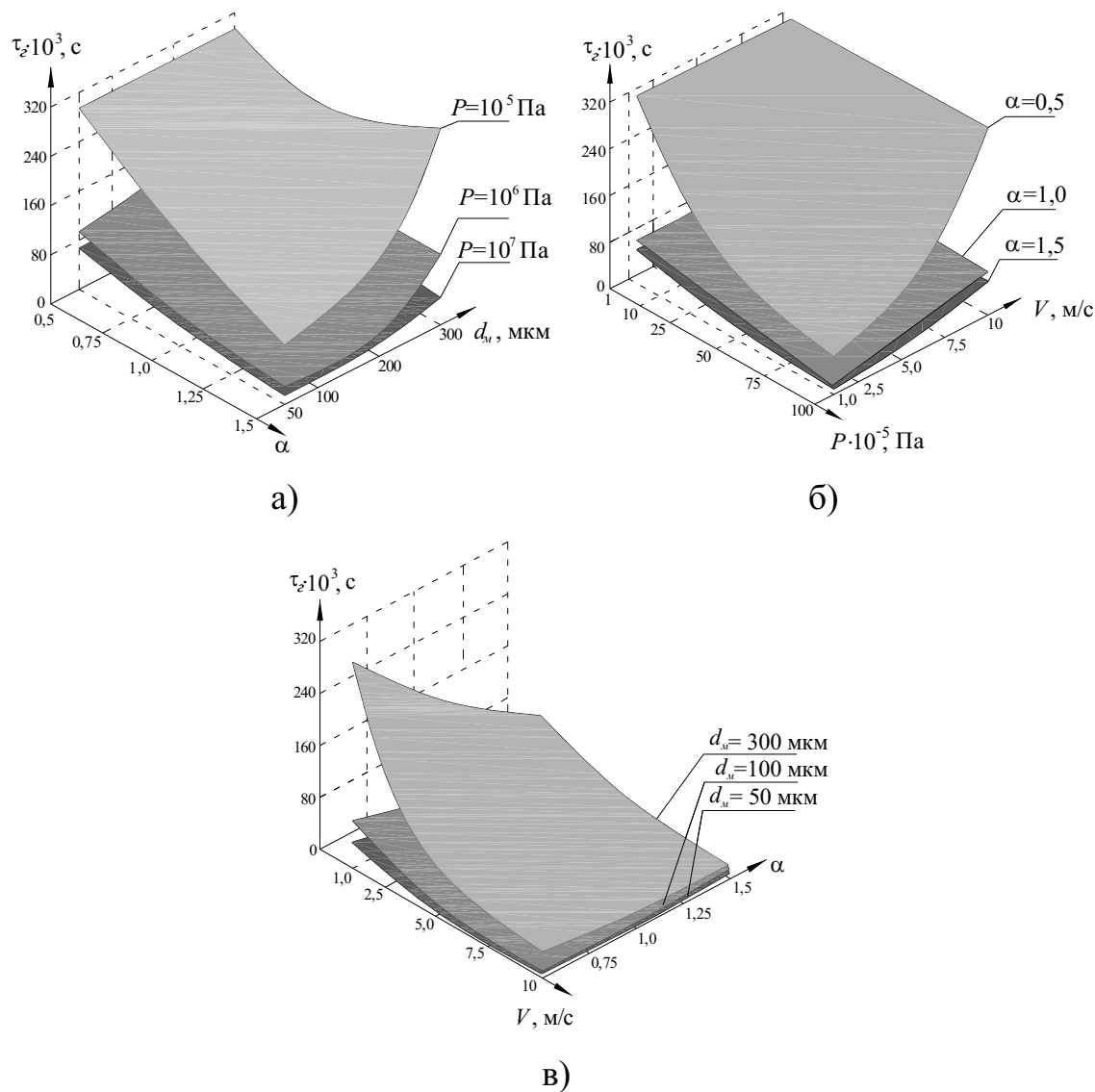


Рисунок 4.32 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок магнію від таких параметрів: а) – від d_m та α ($V = 1 \text{ м/с}$); б) – від V та P ($d_m = 50 \text{ мкм}$); в) – від α та V ($P = 10^5 \text{ Па}$).

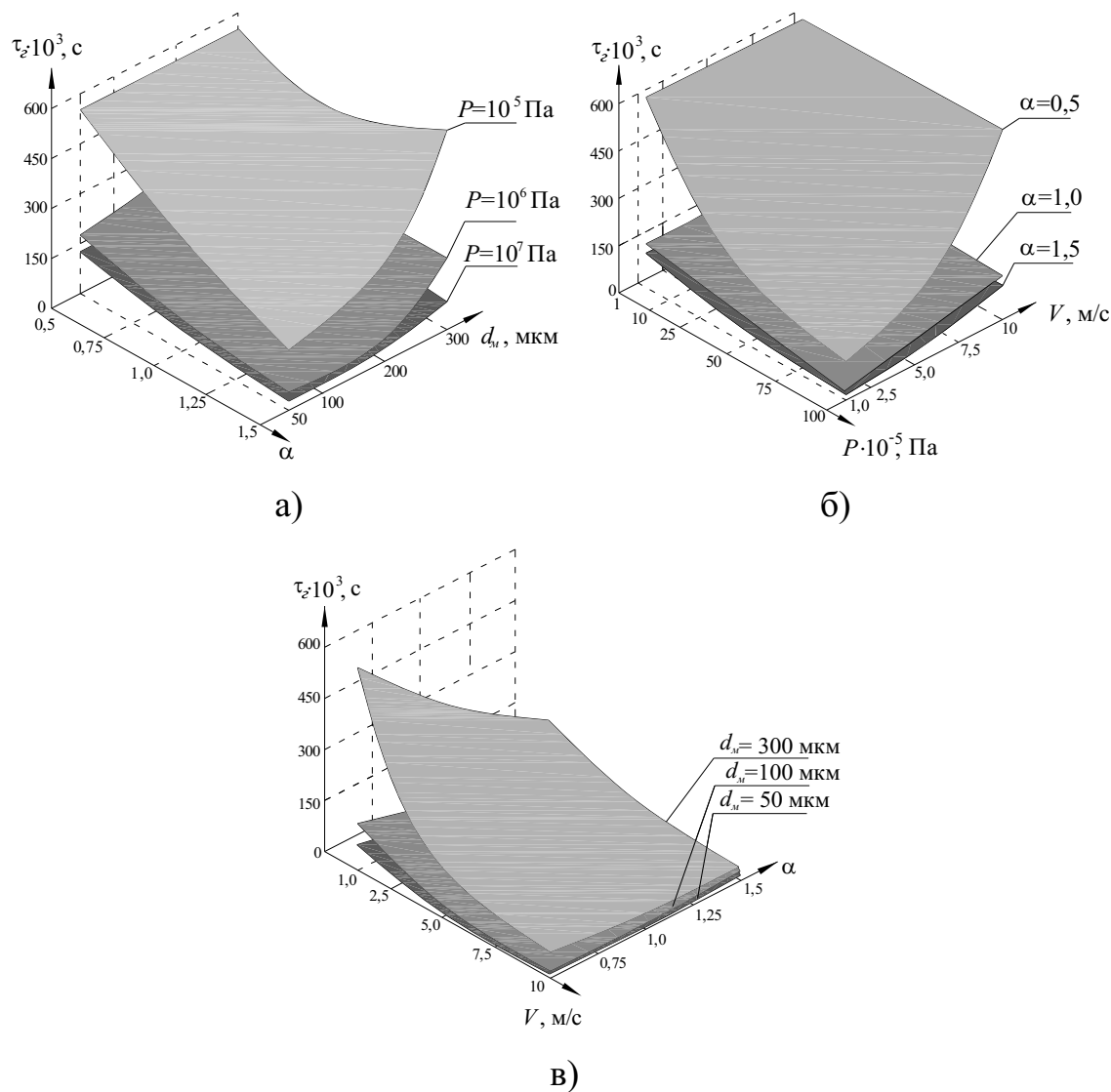


Рисунок 4.33 –Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок алюмінію від таких параметрів: а) – від d_m та α ($V = 1 \text{ м/с}$); б) – від V та P ($d_m = 50 \text{ мкм}$); в) – від α та V ($P = 10^5 \text{ Па}$).

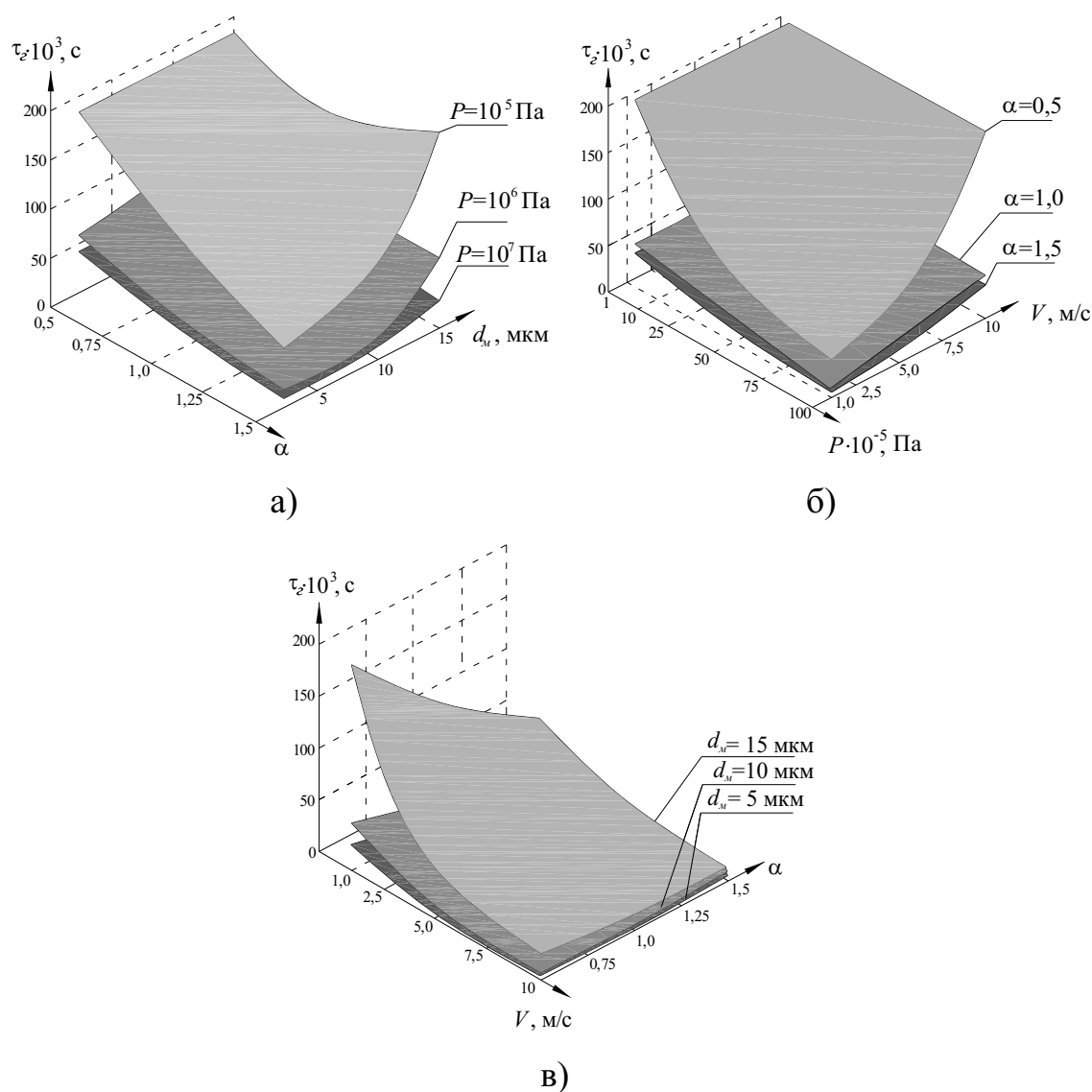


Рисунок 4.34 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок цирконію від таких параметрів: а) – від d_m та α ($V = 1 \text{ м/с}$); б) – від V та P ($d_m = 5 \text{ мкм}$); в) – від α та V ($P = 10^5 \text{ Па}$).

Розроблені експериментально-статистичні моделі (4.4) – (4.6) надають можливість, за допомогою стандартного спеціального програмного забезпечення на персональному комп'ютері (ПК), формувати в діалоговому режимі керовану базу даних щодо часів згоряння частинок металів у

продуктах розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів в умовах зовнішнього нагріву.

Зазначена база даних може бути використана як основа для створення більш загальної керованої бази експериментально-статистичних даних, призначеної для прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів різного призначення в умовах складних зовнішніх термічних дій. Ці умови включають радіаційно-конвективний нагрів в умовах виникнення пожежі; ударні термічні впливи зовнішнього надзвукового газового потоку на поверхню виробу в умовах пострілу та польоту тощо.

4.5. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкостям розвитку процесу горіння сумішей

Для забезпечення практичного використання отриманих результатів щодо горіння досліджуваних сумішей, критично необхідним є створення бази даних, яка буде зручною для оцінки пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів. Об'єктом оцінки є потрійні суміші: металеві пальні (Mg, Al) + окиснювач (Ф – 3, Ф – 4) + органічна речовина (парафін, стеарин, нафталін, антрацен) в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски). З метою формування такої бази даних необхідно систематизувати отримані дані по горінню розглядуваних сумішей у форматі простих експериментально-статистичних моделей, які є придатними для практичних оцінок.

Далі наводяться експериментально-статистичні моделі, які були отримані на основі встановлених експериментальних даних щодо швидкостей горіння сумішей при підвищених температурах нагріву T_0 (до 873 K) та зовнішніх тисках P (до 10^7 Па) із застосуванням відомих методів регресії та кореляції [6, 9]. За допомогою стандартного програмного забезпечення (пакетів прикладних програм) [74] стає можливим в режимах

діалогу та реального часу розраховувати рівні швидкості горіння розглядуваних сумішей за отриманими моделями. Ці значення, у свою чергу, характеризують їхню здатність до спалахування та згасання за умов підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

Моделі для розрахунку впливу органічних добавок на залежності швидкості горіння сумішей від температури нагріву. Такі моделі мають наступний вигляд:

$$u(\varepsilon, T_0) = u_0(\varepsilon) \cdot T_0^{\gamma_0(\varepsilon)} \text{ (м/с)}, \quad (4.7)$$

де $u_0(\varepsilon)$, $\gamma_0(\varepsilon)$ – емпіричні константи, які за допомогою відомих програмних засобів [6, 74] були отримані у вигляді поліноміальних багаточленів. Як результат, експериментально-статистичні моделі, призначені для прогнозування впливу величини ε на залежності $u(T_0)$ представлені у таблицях 4.5 – 4.8.

Порівняльний аналіз результатів розрахунків, виконаних за моделями (4.7), з отриманим масивом експериментальних даних показує, що розбіжності (відмінності) між ними не перевищують 5–7 %. Це підтверджує високу адекватність та точність розроблених експериментально-статистичних моделей.

Моделі для розрахунку впливу органічних добавок на залежності швидкості горіння сумішей від зовнішнього тиску. Такі моделі мають наступний вигляд:

$$u(\varepsilon, P) = u_1(\varepsilon) \cdot T_0^{\gamma_1(\varepsilon)} \text{ (м/с)}, \quad (4.8)$$

де $u_1(\varepsilon)$, $\gamma_1(\varepsilon)$ – емпіричні параметри.

Зазначені залежності $u_1(\varepsilon)$ та $\gamma_1(\varepsilon)$ за допомогою програмного забезпечення [6, 74] були отримані у формі простих поліноміальних багаточленів. З метою прогнозування впливу органічних добавок на залежності $u(P)$ були розроблені експериментально-статистичні моделі, представлені у таблицях 4.9 – 4.12.

Порівняльний аналіз результатів розрахунків, виконаних за моделями (4.8), з отриманими експериментальними даними засвідчує, що розбіжності між ними не перевищують 4–6 %. Це підтверджує високу адекватність та прогностичну здатність розроблених моделей.

Таблиця 4.5 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф – 3 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф – 3 + парафін	10^5	$u=(3,1 \cdot 10^{-4}-1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+6,27 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{65+1,78 \cdot \varepsilon-9,1 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,65-23,7 \cdot \varepsilon+0,43 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,13+1,84 \cdot \varepsilon-31,2 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 3 + стеарин	10^5	$u=(2,7 \cdot 10^{-4}-3,7 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+1,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,91+12,3 \cdot \varepsilon-3,4 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,71+3,19 \cdot \varepsilon-1,32 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+1,73 \cdot \varepsilon-3,4 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 3 + нафталін	10^5	$u=(3,24 \cdot 10^{-5}+7,1 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon-3,4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,94+1,83 \cdot \varepsilon-53,1 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,82-23,5 \cdot \varepsilon+41,3 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+1,2 \cdot \varepsilon-2,5 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 3 + антрацен	10^5	$u=(3,4 \cdot 10^{-5}-2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+0,27 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,87+1,71 \cdot \varepsilon-21,5 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,69-21,7 \cdot \varepsilon+45,4 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,17-0,31 \cdot \varepsilon-2,4 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.6 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф – 4 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф – 4 + парафін	10^5	$u=(1,1 \cdot 10^{-5}-5,3 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+0,12 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,32+5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-38,2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,23-61,2 \cdot \varepsilon+0,17 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{3 \cdot 10^{-2}+0,52 \cdot \varepsilon-85,2 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 4 + стеарин	10^5	$u=(1,2 \cdot 10^{-5}-9,6 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+3 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,35+4,3 \cdot \varepsilon-3,14 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,29+1,41 \cdot \varepsilon-3,54 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5 \cdot 10^{-2}+4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-9,3 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 4 + нафталін	10^5	$u=(1,45 \cdot 10^{-5}+3 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon-7,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,35+2,94 \cdot \varepsilon-11,2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,31-47,3 \cdot \varepsilon+68,1 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5 \cdot 10^{-2}+0,19 \cdot \varepsilon-1,12 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 4 + антрацен	10^5	$u=(1,5 \cdot 10^{-5}-5,1 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+0,23 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,37+0,75 \cdot \varepsilon-47,2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,23-58,3 \cdot \varepsilon+21,7 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{6 \cdot 10^{-2}-0,85 \cdot \varepsilon+1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.7 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф – 3 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф – 3 + парафін	293	$u=(0,39-0,51 \cdot \varepsilon^{0,31}) \cdot P^{0,18-0,30 \cdot \varepsilon+3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,45-4,51 \cdot \varepsilon^{0,34}) \cdot P^{6 \cdot 10^{-2}+0,32 \cdot \varepsilon+9,4 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 3 + стеарин	293	$u=(0,43-1,82 \cdot \varepsilon^{0,31}) \cdot P^{0,15+0,6 \cdot \varepsilon-32,0 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,41-6,58 \cdot \varepsilon^{6 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{5 \cdot 10^{-2}+1,21 \cdot \varepsilon-41,4 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 3 + нафталін	293	$u=(0,42-2,35 \cdot \varepsilon^{0,71}) \cdot P^{0,17-1,12 \cdot \varepsilon+1,5 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,45-6,12 \cdot \varepsilon^{1,3}) \cdot P^{7 \cdot 10^{-2}-1,5 \cdot \varepsilon+4,3 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 3 + антрацен	293	$u=(0,42-1,43 \cdot \varepsilon^{0,41}) \cdot P^{0,15-3,2 \cdot \varepsilon+1,45 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,41-4,95 \cdot \varepsilon^{0,40}) \cdot P^{5 \cdot 10^{-2}+0,41 \cdot \varepsilon-12,5 \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.8 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф – 4 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф – 4 + парафін	293	$u=(0,18-1,25 \cdot \varepsilon^{1,12}) \cdot P^{5 \cdot 10^{-2}-0,90 \cdot \varepsilon+1,4 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,62-1,10 \cdot \varepsilon^{1,13}) \cdot P^{3 \cdot 10^{-2}+0,12 \cdot \varepsilon-5,40 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 4 + стеарин	293	$u=(0,19-3,75 \cdot \varepsilon^{0,70}) \cdot P^{6 \cdot 10^{-2}+0,2 \cdot \varepsilon-74,5 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,60-14,3 \cdot \varepsilon^{0,51}) \cdot P^{2 \cdot 10^{-2}+0,57 \cdot \varepsilon-85,6 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 4 + нафталін	293	$u=(0,17-5,46 \cdot \varepsilon^{4,38}) \cdot P^{7 \cdot 10^{-2}-2,3 \cdot \varepsilon+8,7 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,68-13,05 \cdot \varepsilon^{5 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{3 \cdot 10^{-2}-3,72 \cdot \varepsilon+2,53 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф – 4 + антрацен	293	$u=(0,19-3,43 \cdot \varepsilon^{0,93}) \cdot P^{8 \cdot 10^{-2}-8,10 \cdot \varepsilon+0,17 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,63-6,82 \cdot \varepsilon^{0,83}) \cdot P^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,18 \cdot \varepsilon-26,81 \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.9 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф – 3 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Al + Ф – 3 + парафін	10^5	$u=(5,2 \cdot 10^{-5}-7,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+4,5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{10,83+0,31 \cdot \varepsilon-54,6 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,11-1,42 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+7,2 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,1 \cdot 10^{-2}+0,31 \cdot \varepsilon-31,2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 3 + стеарин	10^5	$u=(2,3 \cdot 10^{-2}-22,3 \cdot \varepsilon+2,1 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+2,07 \cdot \varepsilon-20,4 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,12+0,53 \cdot \varepsilon-7,89 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,29 \cdot \varepsilon-20,7 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 3 + нафталін	10^5	$u=(5,4 \cdot 10^{-6}+1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon-0,21 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+0,31 \cdot \varepsilon-3,19 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,14-1,43 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+6,9 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,21 \cdot \varepsilon-15,4 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 3 + антрацен	10^5	$u=(5,7 \cdot 10^{-6}-1,57 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+4,5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+0,29 \cdot \varepsilon-1,29 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,16-1,32 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+7,57 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,8 \cdot 10^{-2}-1,86 \cdot \varepsilon+4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.10 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф – 4 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Al + Ф – 4 + парафін	10^5	$u=(1,7 \cdot 10^{-6}-3,71 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+1,7 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{4,5 \cdot 10^{-2}+7,1 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon-2,67 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(3,3 \cdot 10^{-2}-4,5 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+2,4 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{4,3 \cdot 10^{-3}+7,4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-5,95 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 4 + стеарин	10^5	$u=(1,7 \cdot 10^{-6}-6,72 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+4,29 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5 \cdot 10^{-2}+0,61 \cdot \varepsilon-21,9 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(4,1 \cdot 10^{-2}+0,21 \cdot \varepsilon-2,48 \cdot 10^3 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{7,1 \cdot 10^{-3}+5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon-65,2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 4 + нафталін	10^5	$u=(2,1 \cdot 10^{-6}+4,3 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon-0,53 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{6 \cdot 10^{-2}+0,42 \cdot \varepsilon+1,7 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(4,4 \cdot 10^{-2}-33,1 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+9,7 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{7,1 \cdot 10^{-3}+2,7 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-7,8 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 4 + антрацен	10^5	$u=(2,1 \cdot 10^{-5}-3,6 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+3,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5,3 \cdot 10^{-2}+0,11 \cdot \varepsilon-3,3 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(3,2 \cdot 10^{-2}-4,1 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+3,1 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{8,6 \cdot 10^{-3}-5,9 \cdot \varepsilon+1,7 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.11 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф – 3 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
Al + Ф – 3 + парафін	293	$u=(6,5 \cdot 10^{-2}-30,6 \cdot \varepsilon^{1,86}) \cdot P^{3 \cdot 10^{-2}-1,8 \cdot \varepsilon+5,8 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,24-27,1 \cdot \varepsilon^{2,1}) \cdot P^{10^{-2}+5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-56,4 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 3 + стеарин	293	$u=(7,1 \cdot 10^{-2}-10,9 \cdot \varepsilon^{1,91}) \cdot P^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,12 \cdot \varepsilon-1,92 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,24-39,5 \cdot \varepsilon^{3,6 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{8,3 \cdot 10^{-3}+0,21 \cdot \varepsilon-2,48 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 3 + нафталін	293	$u=(7 \cdot 10^{-2}-14,1 \cdot \varepsilon^{4,26}) \cdot P^{2,8 \cdot 10^{-2}-6,72 \cdot \varepsilon+6,25 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,24-36,72 \cdot \varepsilon^{7,81}) \cdot P^{1,2 \cdot 10^{-2}-9,2 \cdot \varepsilon+0,72 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 3 + антрацен	293	$u=(7 \cdot 10^{-2}-8,58 \cdot \varepsilon^{2,46}) \cdot P^{2,5 \cdot 10^{-2}-19,2 \cdot \varepsilon+0,24 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,25-29,7 \cdot \varepsilon^{2,43}) \cdot P^{8,3 \cdot 10^{-3}+6,8 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-7,52 \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4.12 – Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф – 4 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
Al + Ф – 4 + парафін	293	$u=(2,6 \cdot 10^{-2}-8,75 \cdot \varepsilon^{7,84}) \cdot P^{7,1 \cdot 10^{-3}-6,3 \cdot \varepsilon+2,1 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(8,9 \cdot 10^{-2}-7,7 \cdot \varepsilon^{7,91}) \cdot P^{4,3 \cdot 10^{-3}+1,7 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-3,8 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 4 + стеарин	293	$u=(2,7 \cdot 10^{-2}-26,3 \cdot \varepsilon^{4,93}) \cdot P^{8,6 \cdot 10^{-3}+2,9 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-52,3 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(8,6 \cdot 10^{-2}-10^2 \cdot \varepsilon^{3,52}) \cdot P^{2,9 \cdot 10^{-3}+8,1 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-2,8 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 4 + нафталін	293	$u=(2,4 \cdot 10^{-2}-38,2 \cdot \varepsilon^{30,71}) \cdot P^{10^{-2}-16,1 \cdot \varepsilon+1,2 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(9,7 \cdot 10^{-2}-91,4 \cdot \varepsilon^{5,9 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{4,3 \cdot 10^{-3}-27,4 \cdot \varepsilon+0,36 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф – 4 + антрацен	293	$u=(2,7 \cdot 10^{-2}-24,1 \cdot \varepsilon^{6,54}) \cdot P^{1,2 \cdot 10^{-3}-56,7 \cdot \varepsilon+2,4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(9,2 \cdot 10^{-2}-47,7 \cdot \varepsilon^{5,83}) \cdot P^{3,6 \cdot 10^{-3}+2,6 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+1,87 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$

Суміші Mg + Ф – 3, Ф – 4 + органічна добавка. Аналіз даних експериментальних досліджень (табл. 4.5 – 4.8) демонструє, що збільшення T_0 від 293 К до 873 К для стехіометричних сумішей ($\alpha = 1,0$) призводить до зростання швидкості горіння у 1,8...1,9 разу (для сумішей на основі Mg + Ф – 3) та у 1,9...2 рази (для сумішей на основі Mg + Ф – 4).

При цьому із зростанням T_0 залежність $u(T_0)$ у обох випадках підсилюється у 1,3...1,5 разу. Збільшення зовнішнього тиску призводить до значного зростання швидкості горіння та підсилення залежності $u(T_0)$: зміна P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 2,8...3,2 разу (для сумішей на основі Mg + Ф – 3) та у 2,9...3,3 разу (для сумішей на основі Mg + Ф – 4) та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,5...1,6 разу. Введення у суміш добавок органічних речовин у кількості до $\varepsilon = 0,20$ (для парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) призводить до значного зменшення швидкості горіння та послаблення залежності $u(T_0)$: у 3,2...3,3 разу для добавок антрацену, у 2,1...2,2 разу для добавок стеарину, у 1,4...1,5

разу для добавок нафталіну та у 1,2...1,3 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,3...1,4 разу для усіх розглядуваних добавок та окиснювачів.

Суміші Al + Ф – 3, Ф – 4 + органічна добавка. Аналіз результатів експериментальних досліджень (Табл. 4.9 – 4.12) свідчить, що при збільшенні температури нагріву T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння стехіометричних сумішей зростає з виразною інтенсивністю: для сумішей на основі Al + Ф – 3 – у 1,6–2,8 разу, а для сумішей на основі Al + Ф – 4 – у 1,7–2,9 разу. Зростання T_0 призводить до підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,4 разу. Збільшення зовнішнього тиску призводить до меншого зростання швидкості горіння та підсилення залежності $u(T_0)$: зростання P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 1,6...1,8 разу (для сумішей на основі Al + Ф – 3) та у 1,7...1,9 разу (для сумішей на основі Al + Ф – 4) та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,3 разу. Введення у суміш добавок органічних речовин у кількості $\varepsilon = 0,02...0,2$ призводить до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності $u(T_0)$: у 2,8...2,9 разу для добавок антрацену, у 1,6...1,7 разу для добавок стеарину, у 1,2...1,3 разу для добавок нафталіну та у 1,1...1,2 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,3 разу.

Отже, за ступенем зменшення швидкості та підвищення стабільності процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) добавки органічних речовин класифікуються у такий ряд: антрацен > стеарин > нафталін > парафін.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання як основи для загальної бази даних щодо пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів на основі сумішей, які містять порошки металевих пальних, фторопласти та добавки органічних речовин. За допомогою цієї бази даних з'являється можливість оперативно, в режимі діалогу та реального часу на ПК, регулюючи співвідношення та природу компонентів у суміші, зменшувати їхню чутливість до потенційних

зовнішніх термічних впливів під час зберігання, транспортування та застосування виробів.

Висновки до розділу 4

На підставі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту добавки органічних речовин ε , коефіцієнта ущільнення K_y , середнього розміру частинок металевого пального d_m та окиснювача $d_{ок}$, діаметра зразка суміші D та матеріалу його оболонки — паперова, сталева, мідна) та зовнішніх умов (підвищених температур нагріву T_0 та зовнішніх тисків P) на характеристики процесу горіння дво- та трикомпонентних сумішей (Mg, Al + Φ – 3 + Φ – 4 + добавка органічної та неорганічної речовини (температура займання та час горіння частинок металу в продуктах розкладання сумішей, швидкість їх горіння) отримано наступні нові результати.

1. Щодо впливу на зниження швидкості горіння суміші Mg + Φ – 3 органічні добавки можуть бути розташовані у наступний ряд за ефективністю: стеаринова кислота, себацінова кислота, сечовина, уротропін, фталева кислота, нітрогуанидин, парафін. Для парафіну спостерігається суттєва залежність від вмісту добавки ε : при $\varepsilon \leq 0,085$ він є найменш ефективним у вказаному ряду; однак, при $\varepsilon > 0,085$ його ефективність різко зростає, що різко послаблює залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску та робить процес горіння більш стійким до зовнішніх дій.
2. За результатами введення добавок різних оксидів у суміш Al + Φ – 3 (у випадку сферичного порошку Al), ефективність підвищення швидкості горіння знижується у наступній послідовності: MnO_2 , Ni_2O_3 , $KMnO_4$, V_2O_5 . При цьому встановлено, що добавка Cr_2O_3 не чинить помітного впливу на швидкість горіння, тоді як введення CuO призводить до її незначного зниження. У цілому, збільшення швидкості горіння розглядуваних сумішей

шляхом введення добавок неорганічних речовин до їхнього складу спричиняє зниження стійкості процесу розвитку горіння, що є особливо критичним в умовах зовнішніх термічних дій.

3. Для сумішей $Mg + \Phi - 3$:

- визначено концентраційні межі горіння та встановлено верхню концентраційну межу горіння $\alpha_{BMT} = 0,15$ та нижню концентраційну межу горіння $\alpha_{HMT} = 5,0$, в межах яких ($\alpha_{BMT} < \alpha < \alpha_{HMT}$) відбувається стійке, невибухонебезпечне протікання процесу горіння сумішей;
- встановлено, що при збільшенні K_Y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 2,0...2,5 разу. При цьому із зростанням α від 0,6 до 3,0 швидкість горіння сумішей зменшується у 3,2...4,3 разу, а залежність $u(K_Y)$ послаблюється у 1,4...1,5 разу;
- виявлено вплив технологічних та геометричних параметрів на $u(\alpha)$ і встановлено, що криві $u(\alpha)$ має максимум u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення якого суттєво залежить від технологічних параметрів (d_m , D та теплопровідності матеріалу оболонки): при збільшенні d_m від 74,5 мкм до 135 мкм значення α_{max} зростають від 0,21 до 0,32 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,3...2,5 разу; зменшення D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м сприяє зміщенню α_{max} від 0,32 до 0,18 (у бік надлишку металевого пального) та зростанню швидкості горіння суміші у 1,7...1,9 разу; встановлено критичні значення $D = D^* = (1,8...2,0) \cdot 10^{-2}$ м (для картонних оболонок), нижче яких суміші вже не горять; перехід від менш теплопровідної оболонки до більш теплопровідної призводить до збільшення α_{max} та u_{max} від 0,32 та $7,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (для паперової оболонки), 0,45 та $8,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (для сталевий оболонки), 0,51 та $10,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (для мідної оболонки), 0,63 та $12,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки);
- встановлено, що підвищення T_0 від 293 К до 873 К призводить до зростання швидкості горіння сумішей зростає у 1,8...2,7 разу; при цьому зі збільшенням α від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,6...2 рази, а залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,3...1,5 разу;

– отримано, що із зростанням P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей збільшується у 2,5...3 рази; при цьому збільшення α від 0,6 до 2,5 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 2,1...3 рази та підсилення залежності $u(P)$ у 1,4...1,6 разу.

4. Для сумішей $Al + \Phi - 3$:

– отримано концентраційні межі горіння сумішей $\alpha_{BMG} = 0,26$ та $\alpha_{HMG} = 1,4$, в межах яких ($\alpha_{BMG} < \alpha < \alpha_{HMG}$) процес їх горіння протікає стабільно та стійко до зовнішніх впливів;

– встановлено, що зі збільшенням K_Y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,6...1,9 разу, а зростання d_m від 56 мкм до 179 мкм призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 2,5...3,2 разу та послаблення залежності $u(K_Y)$ у 1,2...1,3 разу;

– отримано, що залежності $u(\alpha)$ також мають екстремальний характер з максимумами u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення яких залежить від технологічних параметрів (d_m , D та теплопровідності матеріалу оболонки): зростання d_m від 56 мкм до 179 мкм призводить до збільшення α_{max} від 0,28 до 0,35 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,1...2,4 разу; зі зменшенням D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м α_{max} знижується від 0,35 до 0,23 (у бік надлишку металевого пального), а швидкість горіння збільшується у 1,5... 1,7 разу; при цьому встановлено критичні значення $D = D^* = (1,5...1,7) \cdot 10^{-2}$ м (оболонка паперова), при менших значеннях D суміші не горять; заміна менш теплопровідної оболонки на більш теплопровідну призводить до збільшення α_{max} та u_{max} : від 0,35 та $1,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (для паперової оболонки), 0,49 та $2,1 \cdot 10^{-3}$ м/с (для сталевий оболонки), 0,57 та $2,4 \cdot 10^{-3}$ м/с (для мідної оболонки), 0,69 та $2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки) та зростання швидкості горіння сумішей у 1,3...1,5 разу;

– отримано, що зі зростанням T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей збільшується у 1,7...2,3 разу; при цьому збільшення α від 0,6 до 1,4 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 1,4...1,8 разу та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,3...1,4 разу;

– встановлено, що з підвищенням P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей збільшується у 1,9...2,5 разу; зі збільшенням α від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,5...1,9 разу, а залежність $u(P)$ підсилюється у 1,5...1,6 разу.

5. Для сумішей $Mg + \Phi - 3$ + добавка органічної речовини встановлено:

– зі збільшенням відносного вмісту ε добавок СКН – 10 – 1, ЕД – 5, стеарину, уротропіну, тіоколу та парафіну від 0,02 до 0,13 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,4...3,6 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^5$ Па), у 1,3...3,5 разу (при $T_0 = 873$ К та $P = 10^5$ Па) та у 2,3...5,7 разу: у 5,3...5,7 разу (для добавок СКН – 10 – 1); у 4,2...4,5 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^7$ Па); при цьому при підвищенні T_0 (до 873 К) залежність $u(\varepsilon)$ послаблюється у 1,3...1,4 разу, а при підвищенні (до 10^7 Па) залежність $u(\varepsilon)$ вже підсилюється у 1,5...1,8 разу;

– як при нормальних зовнішніх умовах ($T_0 = 293$ К, $P = 10^5$ Па), так й при підвищених T_0 та P органічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей $Mg + \Phi - 3$ розташовуються у вигляді послідовності: СКН – 10 – 1 > ЕД – 5 > стеарин > уротропін > тіокол > парафін.

6. Для сумішей $Al + \Phi - 3$ + добавка неорганічної речовини отримано:

– зі збільшенням відносного вмісту ε добавки CuO та Cr_2O_3 від 0,02 до 0,10 швидкість горіння сумішей зменшується у 1,2...1,4 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^5$ Па), у 1,3...1,5 разу (при $T_0 = 873$ К та $P = 10^5$ Па) та у 1,15...1,2 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^7$ Па);

– зі зростанням відносного вмісту ε від 0,02 до 0,10 для добавок MnO_2 , Ni_2O_3 , $KMnO_4$ та V_2O_5 швидкість горіння збільшується у 1,2...1,7 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^5$ Па), у 1,3...1,8 разу (при $T_0 = 873$ К та $P = 10^5$ Па) та у 1,1...1,6 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^7$ Па); при підвищенні T_0 (до 873 К) залежність $u(\varepsilon)$ підсилюється у 1,2...1,3 разу, а при підвищених P (до $P = 10^7$ Па) – послаблюється у 1,1...1,2 разу);

– незалежно від T_0 та P неорганічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей $Al + \Phi - 3$ розташовуються у вигляді

послідовностей: $\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{CuO}$ (зменшення швидкості горіння);
 $\text{MnO}_2 > \text{Ni}_2\text{O}_3 > \text{KMnO}_4 > \text{V}_2\text{O}_5$ (зростання швидкості горіння).

7. Для трикомпонентних сумішей $\text{Mg} + \Phi - 3$, $\Phi - 4$ + органічна добавка:

– збільшення T_0 від 293 К до 873 К для стехіометричних сумішей ($\alpha = 0$) з $d_m = 135$ мкм, $d_{ок} = 50 \dots 110$ мкм (для порошоків $\Phi - 3$) та $20 \dots 90$ мкм (для порошоків $\Phi - 4$), а також $K_y = 0,95 \dots 0,96$ призводить до збільшення швидкості горіння у $1,8 \dots 1,9$ разу (для сумішей на основі $\text{Mg} + \Phi - 3$) та у $1,0 \dots 2$ рази (для сумішей на основі $\text{Mg} + \Phi - 4$); залежність $u(T_0)$ підсилюється у $1,3 \dots 1,5$ разу;

– зростання P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у $2,8 \dots 3,2$ разу (для сумішей на основі $\text{Mg} + \Phi - 3$) та у $2,9 \dots 3,3$ разу (для сумішей на основі $\text{Mg} + \Phi - 4$) та підсилення залежності $u(T_0)$ у $1,5 \dots 1,6$ разу;

– збільшення ε від 0,02 до 0,2 призводить до зменшення швидкості горіння у $3,2 \dots 3,3$ разу для добавок антрацену, у $2,1 \dots 2,2$ разу для добавок стеарину, у $1,4 \dots 1,5$ разу для добавок нафталіну та у $1,2 \dots 1,3$ разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у $1,3 \dots 1,4$ разу.

8. Для трикомпонентних сумішей $\text{Al} + \Phi - 3$, $\Phi - 4$ + органічна добавка:

– зростання T_0 від 293 К до 873 К для стехіометричних сумішей ($\alpha = 0$) з $d_m = 179$ мкм, $d_{ок} = 50 \dots 110$ мкм (для порошоків $\Phi - 3$) та $20 \dots 90$ мкм (для порошоків $\Phi - 4$), а також $K_y = 0,95 \dots 0,96$ призводить до зростання швидкості горіння у $1,6 \dots 1,8$ разу (для сумішей на основі $\text{Al} + \Phi - 3$) та у $1,7 \dots 2,9$ разу (для сумішей на основі $\text{Al} + \Phi - 4$); при цьому залежність $u(T_0)$ підсилюється у $1,2 \dots 1,4$ разу;

– збільшення P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до зростання швидкості горіння у $1,6 \dots 1,8$ разу (для сумішей на основі $\text{Al} + \Phi - 3$) та у $1,7 \dots 1,9$ разу (для сумішей на основі $\text{Al} + \Phi - 4$) та підсилення залежності $u(T_0)$ у $1,2 \dots 1,3$ разу;

– зростання ε до 0,2 призводить до зменшення швидкості горіння у $2,8 \dots 2,9$ разу для добавок антрацену, у $1,6 \dots 1,7$ разу для добавок стеарину,

у 1,2...1,3 разу для добавок нафталіну та у 1,1...1,2 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,3...1,4 разу.

9. Вперше встановлено наступні закономірності комплексного впливу на температуру займання частинок металів наступних параметрів: збільшення розміру частинок від $d_m = 54$ мкм до $d_m = 310$ мкм та зменшення коефіцієнта надлишку окиснювача від $\alpha = 1,5$ до $\alpha = 0,5$ призводить до зменшення T_z у 1,3...1,8 разу; зростання зовнішнього тиску від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па призводить до збільшення T_z у 1,5...1,7 разу. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для формування бази розрахункових даних (відносна похибка 5... 7 %) по впливу основних параметрів (d_m , α , P) на температуру займання частинок металевих пальних (магнію, алюмінію, цирконію) в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів в умовах зовнішніх термічних дій.

10. Отримано нові закономірності комплексного впливу на час згоряння частинок металів у продуктах розкладання сумішей наступних параметрів: збільшення розміру частинок металевого пального від $d_m = 54$ мкм до $d_m = 310$ мкм незалежно від коефіцієнта надлишку окиснювача, швидкості потоку продуктів розкладання та зовнішнього тиску час згоряння частинок суттєво зростає (у 9...11 разів); зростання коефіцієнта надлишку окиснювача від $\alpha = 0,5$ до $\alpha = 1,5$, його швидкості від $V = 2$ м/с до $V = 9$ м/с та зовнішнього тиску від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па незалежно від розміру частинок металу призводить до помітного зменшення часу їх згоряння (у 1,6...3,2 разу). Вперше розроблено експериментально-статистичні моделі для формування бази розрахункових даних (відносна похибка 5...7 %) по впливу основних керованих параметрів (d_m , α , P та V) на час згоряння частинок металевих пальних (магнію, алюмінію, цирконію) в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів в умовах зовнішніх термічних дій на поверхню виробів на їх основі.

11. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для формування бази розрахункових даних (відносна похибка 4...7 %) по впливу керованих технологічних параметрів (α , ε , d_m , $d_{ок}$, K_y) на основні характеристики процесу горіння сумішей (температуру займання та час горіння частинок металевого пального в продуктах розкладання сумішей, швидкість розвитку їх горіння) в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски), що дозволяють на стадії виготовлення піротехнічних виробів шляхом регулювання технологічних параметрів підвищувати їх пожежну безпеку в умовах зберігання, транспортування та застосування.

12. Вперше показано, що шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей (співвідношення та природи компонентів, дисперсності металевих пальних, коефіцієнта ущільнення, діаметра зразків сумішей та коефіцієнта теплопровідності оболонок) на стадії їх виготовлення, не змінюючи тактико-технічні показники піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластвмісних сумішей, за допомогою керованої зміни основних характеристик горіння сумішей (або часу дії виробів в умовах їх бойового застосування) можна запобігати нестійким, вибухонебезпечним режимам його розвитку в умовах зовнішніх термічних впливів, що призводять до передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

У цьому розділі на основі розроблених математичних та експериментально-статистичних моделей (див. розділ 3), бази експериментальних даних для перевірки їх адекватності, а також спеціалізованого програмного забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм [6, 74] сформовано новий науково обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термічних дій та керованих технологічних параметрів зарядів піротехнічних сумішей з порошків металевих пальних і фторопластів. Перевищення цих параметрів призводить до передчасного займання, вибухонебезпечного розвитку горіння за умов підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків і, як наслідок, – до пожежонебезпечного руйнування виробів.

Крім того, представлено практичне застосування розробленого методу на підприємствах України у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій, що інтегруються в існуючі нормативні документи (галузеві стандарти, технічні умови, акти стендових випробувань тощо) щодо проектування, виготовлення, зберігання та транспортування серійних піротехнічних виробів на основі розглянутих сумішей. Представлено застосування певних результатів роботи у вищій навчальній закладах України, зокрема для організації навчального процесу за профільними спеціальностями, що дозволяє інтегрувати наукові досягнення у підготовку фахівців з питань пожежної безпеки.

5.1. Розробка науково обґрунтованого методу визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій та технологічних параметрів сумішей, перевищення яких призводить до їх передчасного займання, вибухонебезпечного розвитку горіння та пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів

Розроблений метод базується на математичних моделях, детально викладених у розділах 3 та 4, на отриманій експериментальній базі даних, а також на спеціалізованому програмному забезпеченні у вигляді трьох пакетів прикладних програм (ППП1–ППП3), що реалізують сучасні чисельні методи [8]. Це дозволяє у режимах діалогу та реального часу формувати комплекс даних щодо: критичних параметрів зовнішніх термічних дій (величин теплових потоків і часу їх дії) на піротехнічні вироби на основі досліджуваних сумішей; основних параметрів і характеристик процесу горіння зарядів сумішей (температур продуктів згоряння, відносного вмісту високотемпературного конденсату, швидкості горіння); технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнти ущільнення, геометричні розміри зарядів тощо). Перевищення зазначених параметрів призводить до передчасного займання і спрацьовування та розвитку вибухового горіння, що спричиняє пожежонебезпечне руйнування виробів.

На рис. 5.1 наведено схему комплексу моделей та бази експериментальних даних. Саме поєднання математичних моделей та експериментальних даних дозволяє формувати повний масив інформації щодо критичних параметрів, на основі якого і реалізовано описаний метод.

З метою підвищення ефективності розрахунків за наведеними моделями застосовувався Спеціалізований програмний комплекс (СПК), що включає стандартні Пакети прикладних програм (ППП1–ППП3), які реалізують основні методи розв’язання обчислювальних задач (рис. 5.2).

Структурно СПК складається з трьох спеціалізованих ППП, що включають 60 програмних модулів, реалізуючих сучасні чисельні методи [6, 8]. Ефективність цих пакетів підтверджена широкими чисельними експериментами: у діалоговому режимі було вирішено 200 інженерно-технологічних задач, характерних для процесів горіння піротехнічних сумішей.

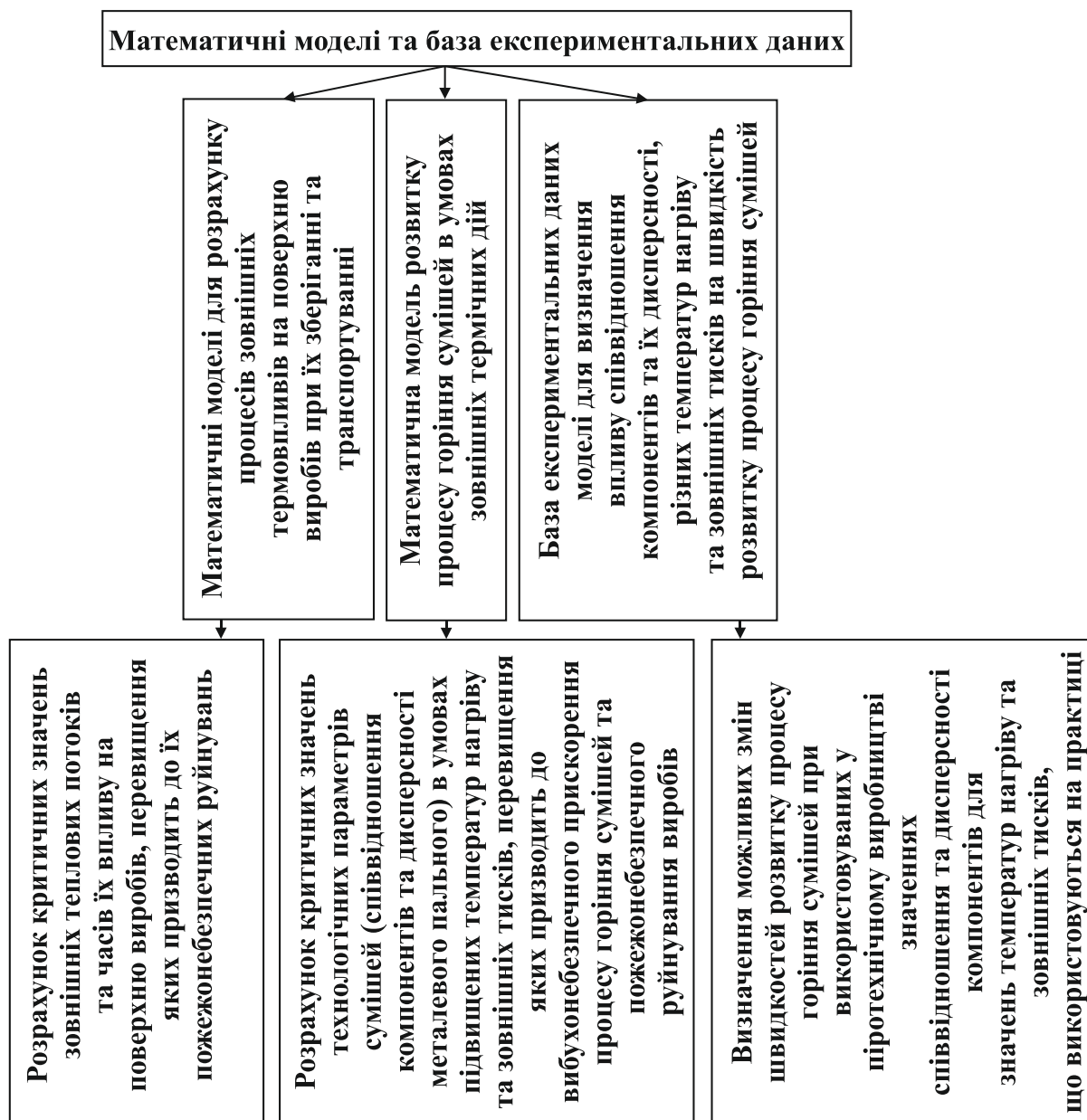


Рисунок 5.1 – Комплекс розроблених математичних моделей та отримана база експериментальних даних для формування в режимі діалогу на ПК розглядуваного масиву даних по критичним значенням вказаних параметрів.

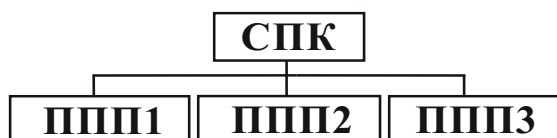


Рисунок 5.2 – Склад спеціалізованого програмного комплексу (СПК).

Пакети прикладних програм (ППП) були розроблені для забезпечення необхідного обчислювального функціоналу в рамках Спеціалізованого програмного комплексу (СПК) [6, 8, 74].

ППП1 орієнтований на методи регресії та інтерполяції, забезпечуючи апроксимацію експериментальних даних та встановлення функціональних залежностей між параметрами.

ППП2 реалізує методи чисельного інтегрування функцій, необхідні для розрахунку інтегральних характеристик процесів.

ППП3 включає методи чисельного рішення диференціальних рівнянь, що є основою для моделювання нестационарних теплових, кінетичних та гідродинамічних процесів горіння.

Вказані пакети (ППП1, ППП2 та ППП3) виконані у вигляді завантажувальних модулів, що забезпечує їхню автономність, модульність та оперативне інтегрування у загальну архітектуру СПК для ефективного проведення розрахунків у режимах діалогу та реального часу. (рис. 5.2) [6, 8, 74].

На початковому етапі відбувається формування вихідної бази даних, яка є інтегральною частиною Спеціалізованого програмного комплексу (СПК) і його Пакетів прикладних програм (ППП1 – ППП3) (рис. 5.3). База даних включає комплекс параметрів, необхідних для проведення розрахунків у режимах діалогу та реального часу на персональному комп'ютері (ПК). До цих параметрів належать: параметри зовнішніх термічних впливів (густина теплового потоку q_n , час його дії t , температура нагріву T_0 та тиск P , за яких ініціюється горіння зарядів сумішей);

технологічні параметри зарядів сумішей (природа окиснювача та металевого пального, коефіцієнт надлишку окиснювача α , середній розмір частинок металевого пального d_m та окиснювача $d_{ок}$); механічні та теплофізичні характеристики зарядів сумішей (геометрична форма та розміри, густина, теплоємність та коефіцієнт теплопровідності). Також до бази даних включено отриманий комплекс математичних моделей та база експериментальних даних.

На другому етапі здійснюється оцінка умов передчасного займання та руйнування виробів внаслідок термічних впливів. Для цього вводяться значення температури поверхні заряду суміші (T_n) та температури займання металевого пального у продуктах розкладання окиснювача (T_3). При перевищенні критичної умови ($T_n > T_3$), що відповідає критичним зовнішнім термічним впливам ($q_n > q_n^*$, $t > t^*$), відбувається прискорення саморозігрівання сумішей, передчасне їх займання та розвиток вибухового горіння, що призводить до руйнування піротехнічних виробів. Шляхом вибору моделі зовнішніх термічних дій, за допомогою ППП проводяться розрахунки параметра T_n , які зіставляються з його граничними значеннями, що дозволяє визначити критичні значення q_n^* та t^* , при яких вироби зазнають руйнувань. Для верифікації розрахунків проводяться вимірювання температури поверхні T_n та теплового потоку q_n , у окремих точках заряду, які зіставляються з результатами розрахунків для визначення похибки. У разі виявлення істотних розбіжностей між розрахунковими та експериментальними даними (понад 10–12 %) здійснюється корекція математичних моделей.

На третьому етапі вводяться параметри, що характеризують розвинене горіння – температура продуктів згоряння (T_2), відносний вміст високотемпературного конденсату g_k та швидкість горіння сумішей u – швидкість горіння сумішей, а також їхні граничні значення (t_2^* , T_2^* , g_k^* , $u_{(a)}^*$) (швидкість горіння суміші на верхній концентраційній межі,

перевищення якої призводить до нестійкого, вибухонебезпечного розвитку процесу горіння), $u_{(\alpha)_{НМГ}}^*$ (швидкість горіння суміші на нижній концентраційній межі, перевищення якої призводить до різкого затухання процесу горіння). Граничні значення визначають можливість спалаху та згасання сумішей, рівень пожежної небезпеки для оточуючих об'єктів при розвиненому горінні, а також області нестійкості горіння (що призводять або до швидкого згасання, або до вибухових режимів). Після вибору математичної моделі, за допомогою відповідних ППП проводиться розрахунок параметрів T_z , g_k та u при заданих значеннях керованих параметрів $(\alpha, d_m, d_{ок}, T_0, P)$.

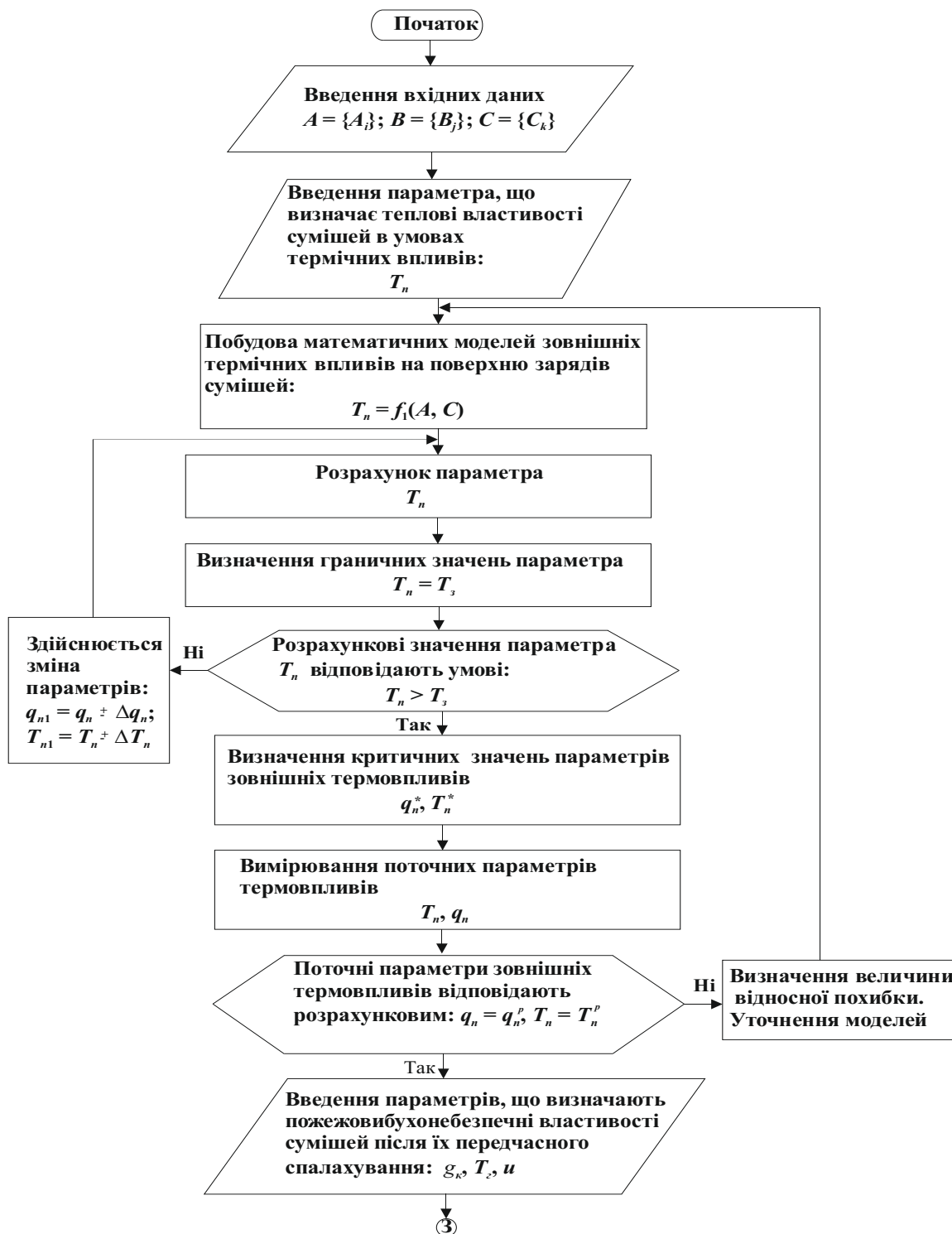
Розраховані величини зіставляються з їхніми граничними значеннями (перевіряється виконання умов: $T_z < T_z^*$, $g_k < g_k^*$, $u < u_{(\alpha)_{ВМГ}}^*$, $u > u_{(\alpha)_{НМГ}}^*$). При невиконанні вказаних умов здійснюється коректування значень керованих параметрів та визначаються критичні діапазони їх зміни (наприклад, $\alpha < (\alpha)_{ВМГ}$, $\alpha > (\alpha)_{НМГ}$, $d_m < d_m^*$ (або $d_m > d_m^*$), $d_{ок} < d_{ок}^*$ (або $d_{ок} > d_{ок}^*$), $T_0 > T_0^*$ (або $T_0 < T_0^*$), $P > P^*$ (або $P < P^*$). Для контролю проводиться вибіркове вимірювання T_z , g_k та u , які зіставляються з розрахунковими значеннями для визначення похибок. За наявності значних розбіжностей (понад 10–12 %) виконується корекція математичних моделей.

На завершення слід відзначити, що розроблений науково обґрунтований метод виконує критичну практичну функцію у контексті проектування та розробці піротехнічних виробів, які містять суміші на основі порошків металевих палих та фторопластів.

Метод дає змогу в автоматизованому режимі генерувати масив критичних значень, що охоплюють: критичні значення параметрів зовнішніх термічних дій та основні параметри розвитку горіння сумішей.

Ідентифікація цих критичних порогів має вирішальне значення для безпеки експлуатації, оскільки їхнє перевищення провокує передчасне займання зарядів сумішей та нестабільний, прискорений розвиток горіння.

Це безпосередньо призводить до вибухонебезпечного руйнування виробів та ініціювання пожежі через виникнення відповідних небезпечних чинників. Таким чином, метод є ефективним інструментом для прогнозування ризиків та оптимізації складу виробів з метою суттєвого підвищення їхньої пожежної безпеки.



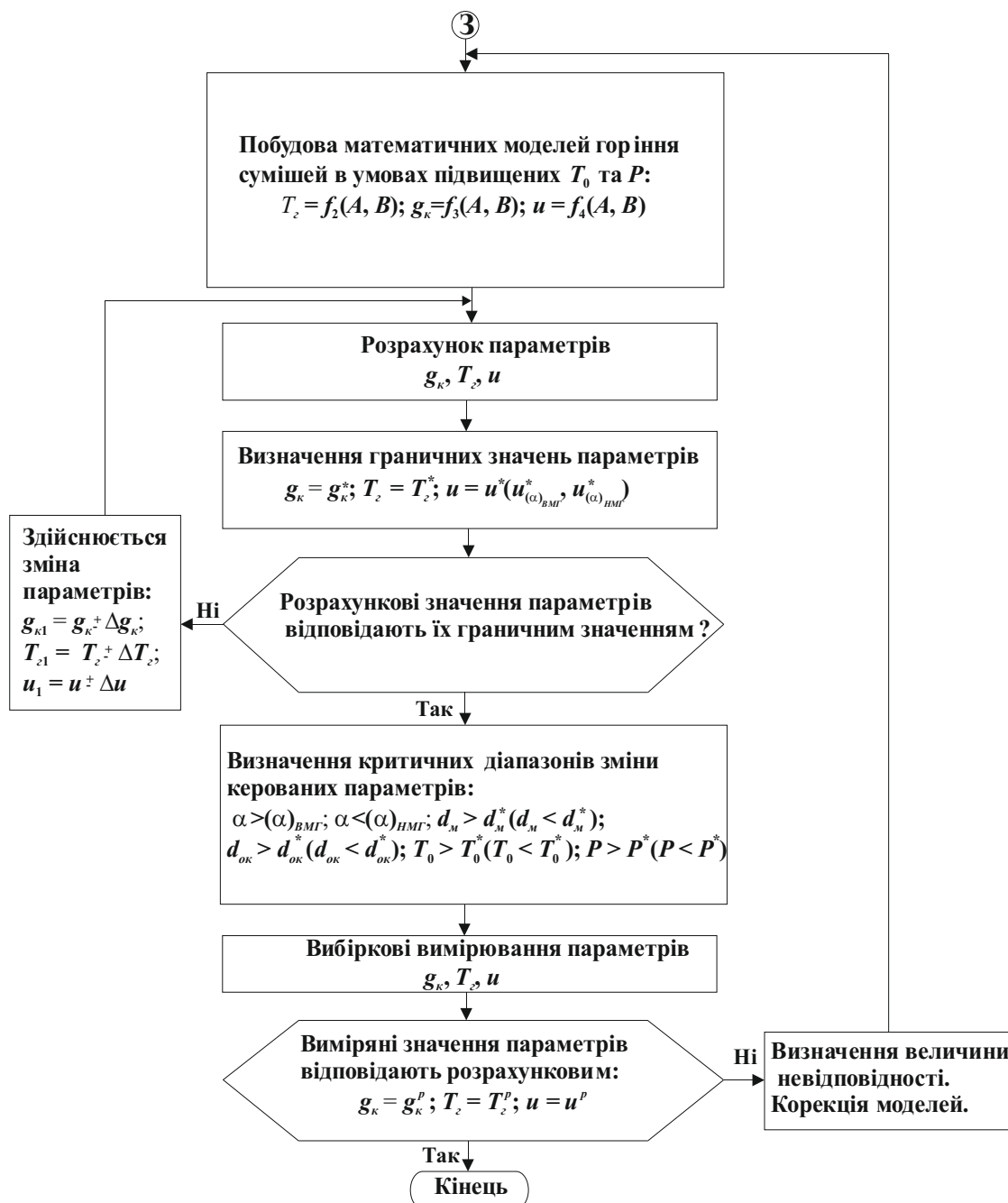


Рисунок 5.3 – Алгоритм визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій (теплових потоків та часів їх дії) на піротехнічні вироби та параметрів розвитку горіння сумішей (температури продуктів згорання, відносного вмісту високотемпературного конденсату та швидкості горіння), що дозволяє попереджати можливі передчасні їх спрацьовування та пожежовибухонебезпечні руйнування при зберіганні та транспортуванні:

A – параметри зовнішніх термічних дій; B – керовані технологічні параметри сумішей; C – механічні, теплофізичні та фізико-хімічні характеристики зарядів сумішей.

5.2. Застосування методу для зниження кількості пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні в умовах зовнішніх термічних дій

Запобігання займанню та подальшому пожежонебезпечному руйнуванню піротехнічних виробів із досліджуваними сумішами в умовах зовнішньої термічної дії (наприклад, у разі виникнення пожежі у складських приміщеннях або під час транспортування) вимагає запобігання утворенню в горючому середовищі осередків екзотермічного окиснення частинок металевого пального у продуктах розкладання фторопластів.

Ефективність такого запобігання забезпечується шляхом максимально можливого застосування порошків металу у зарядах сумішей із зниженою горючістю. Зниження горючості досягається через оптимізацію та варіювання технологічних параметрів, а саме:

- співвідношення компонентів;
- дисперсності (розміру частинок) компонентів;
- коефіцієнта ущільнення суміші;
- розмірів заряду (діаметра, висоти, геометричної форми тощо).

Ці висновки, детально обґрунтовані в розділі 4, підтверджують, що керування технологічними параметрами суміші є критичним механізмом підвищення її стійкості до зовнішніх термічних впливів.

Для кількісної оцінки рівня забезпечення пожежної безпеки піротехнічних виробів в умовах зовнішньої термічної дії використовується методика розрахунку ймовірності появи джерела запалювання. Цей підхід відповідає вимогам ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні вимоги» (п. 7. Вимоги до способів забезпечення пожежної безпеки комплексом протипожежного захисту) та базується на методі визначення ймовірності виникнення пожежі (Додаток Б, п. Б.3.4).

Для кількісної оцінки рівня забезпечення пожежної безпеки застосовується розрахунок ймовірності $Q(D3)$ появи джерела запалювання

в одному піротехнічному виробі, яке ініціює процес передчасного виникнення горіння заряду суміші.

При цьому враховується стохастична природа зовнішніх впливів в умовах зберігання або транспортування піротехнічних виробів. Оскільки заздалегідь неможливо передбачити конкретні умови виникнення зовнішніх термічних дій на поверхню виробів, які можуть призвести до появи в заряді суміші осередків екзотермічного окиснення частинок металів у продуктах розкладання інших компонентів, що спричиняють спалахування сумішей і, як наслідок, пожежонебезпечне руйнування виробів, використовується ймовірнісний підхід.

Згідно з ДСТУ 8828:2019 (п. Б.3.4, формула (Б.30)), для розрахунку ймовірності $Q(DЗ)$ використовується наступний вираз:

$$Q(DЗ) = 1 - e^{-\tau/\tau_{0.3}}, \quad (5.1)$$

де τ – час зберігання (транспортування) піротехнічного виробу на протязі аналізованого періоду часу, г.; $\tau_{0.3} = 3,03 \cdot 10^4 \cdot E_0^{1,2}$ – середній час зберігання (транспортування) до появи (ініціювання) джерела запалювання, г.; E_0 – мінімальна енергія запалювання ущільненої суміші розглядуваних компонентів (утворення осередків екзотермічного окиснення), Дж.

Величина E_0 визначається як мінімальна енергія, яка необхідна для нагріву об'єму реакційної зони к-фази заряду суміші від початкової температури (T_0 , К) до температури її займання (T_z , К) в умовах зовнішньої термодії:

$$E_0 = \rho_c \cdot c_c \cdot \Delta V_c (T_z - T_0), \quad (5.2)$$

де ρ_c , c_c – густина (кг/м³) та питома теплоємність (Дж/кг·К) заряду суміші; ΔV_c – об'єм реакційної зони к-фази суміші, в межах якої відбувається повне термічне розкладання окиснювача, а також екзотермічне окиснення частинок металів, що призводять, у кінцевому підсумку, до займання суміші, м³.

При розгляді цього процесу, враховуючи діаметр заряду D , та товщину реакційної зони конденсованої фази δ_1 , у першому наближенні можна вважати, що:

$$\Delta V_c = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \delta_1}{4}. \quad (5.3)$$

Підставляючи (5.3) у (5.2), отримуємо:

$$E_0 = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \delta_1 \cdot \rho_c \cdot c_c}{4} \cdot (T_3 - T_0). \quad (5.4)$$

Згідно встановленого механізму горіння розглядуваних піротехнічних сумішей величина δ_1 , в першому наближенні,

$$\delta_1 = \frac{2R \cdot T_n \cdot a_0^2}{E_1 \cdot u}, \quad (5.5)$$

де R – газова стала, Дж/моль·К; T_n – температура поверхні горіння суміші, К; a_0^2 – коефіцієнт температуропровідності суміші, м²/с; u – швидкість горіння суміші, м/с; E_1 – енергія активації процесу повного термічного розкладання $\Phi - 3$ при $T = T_n$, як основного джерела активних газоподібних продуктів ($E_1 \gg RT$), кДж/моль.

Згідно отриманим експериментальним даним (див. розділ 4) (для $\alpha = 0,5 \dots 0,6$ та $K_Y = 0,96 \dots 0,97$): $T_n = 1050 \dots 1200$ К; $E_1 = 127,5$ кДж/моль; $a_0^2 = 3,7 \cdot 10^{-6} \dots 11,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с, величина $\delta_1 = 60 \dots 340$ мкм, тобто по порядку величини відповідає середньому розміру частинок використовуваних порошків Mg ($d_m = 54 \dots 305$ мкм) та Al ($d_m = 56 \dots 310$ мкм).

З метою визначення температури займання (T_3) та часу індукції (затримки) (τ_i) були проведені експериментальні дослідження процесів займання зарядів сумішей Mg + $\Phi - 3$ та Al + $\Phi - 3$ в умовах зовнішніх термічних впливів. Дослідження охоплювали варіації ключових технологічних параметрів: коефіцієнта надлишку окиснювача α , середнього розміру частинок металевого пального d_m та окиснювача d_N , коефіцієнта ущільнення суміші K_Y та діаметра заряду D) (рис. 5.7, 5.8).

Аналіз експериментальних даних (рис. 5.4, 5.5) дозволив встановити суттєву залежність величин T_3 та τ_i від вмісту окиснювача у суміші та дисперсності металевго пального. Зокрема, зменшення α від $\alpha = 1,5$ до $\alpha = 0,5$; d_m від $d_m = 305$ мкм до $d_m = 56$ мкм (для частинок Mg) та від $d_m = 310$ мкм до $d_m = 54$ мкм (для частинок Al) призводить до наступних ефектів: значення температури займання T_3 зростають у 1,4...1,9 разу, а часу індукції τ_i – у 2,7...3,2 разу.

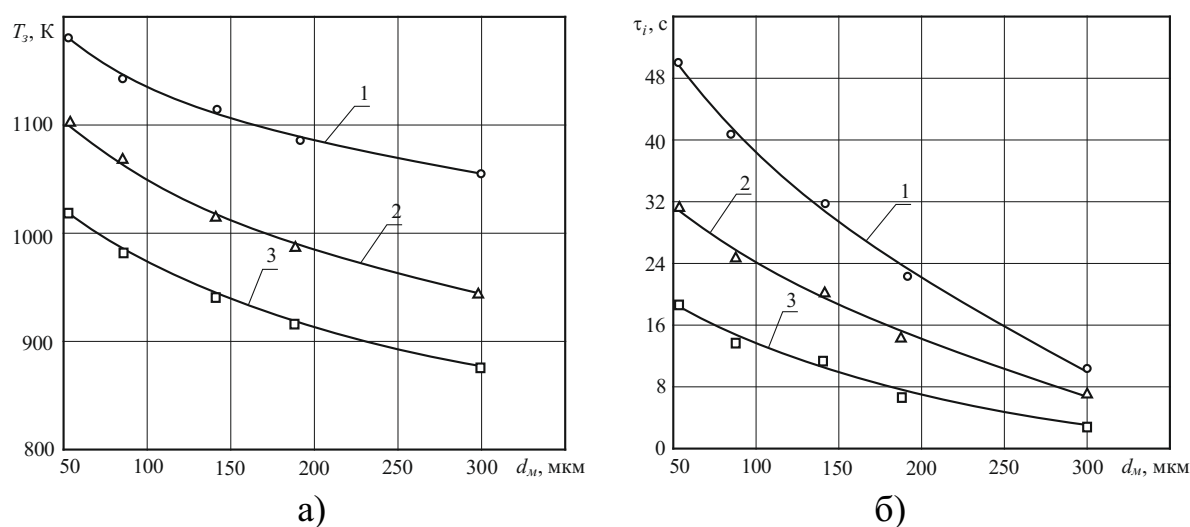


Рисунок 5.4 – Залежності температури займання (а) та часу індукції (б) циліндричних зарядів сумішей на основі Mg + Ф – 3 від середнього розміру частинок металевго пального для значень коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,5$ (1); 1,0 (2); 1,5 (3) ($d_{ок} = 100$ мкм; $K_y = 0,96...0,97$; $D = 2...3 \cdot 10^{-2}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): $\circ$, Δ , $\square$ – експериментальні дані.

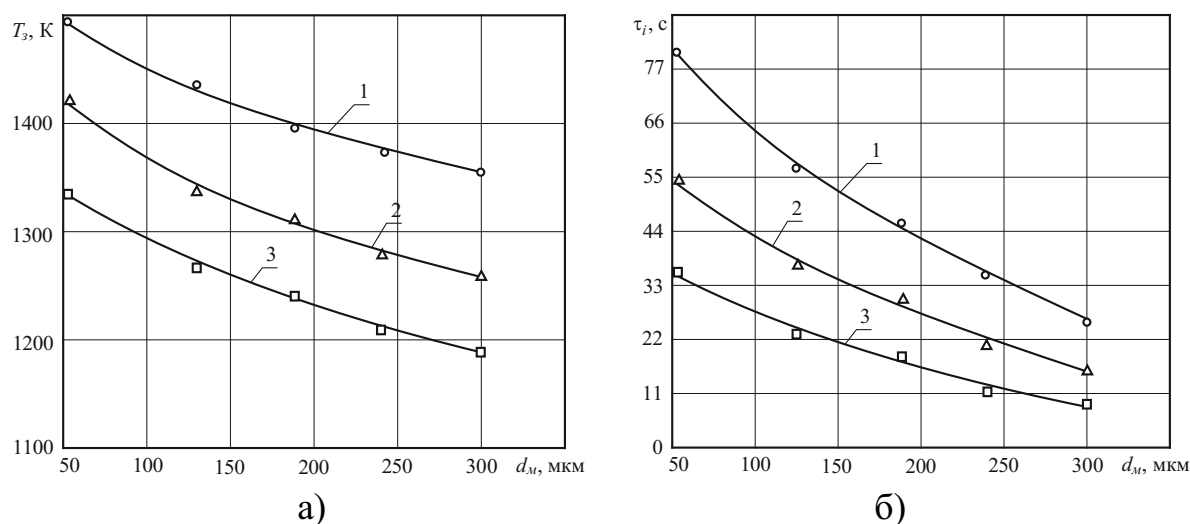


Рисунок 5.5 – Залежності температури займання (а) та часу індукції (б) циліндричних зарядів сумішей на основі $\text{Al} + \Phi - 3$ від середнього розміру частинок металевого пального для значень коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,5$ (1); 1,0 (2); 1,5 (3) ($d_{ок} = 100$ мкм; $K_Y = 0,96 \dots 0,97$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): $\circ$, Δ , $\square$ – експериментальні дані.

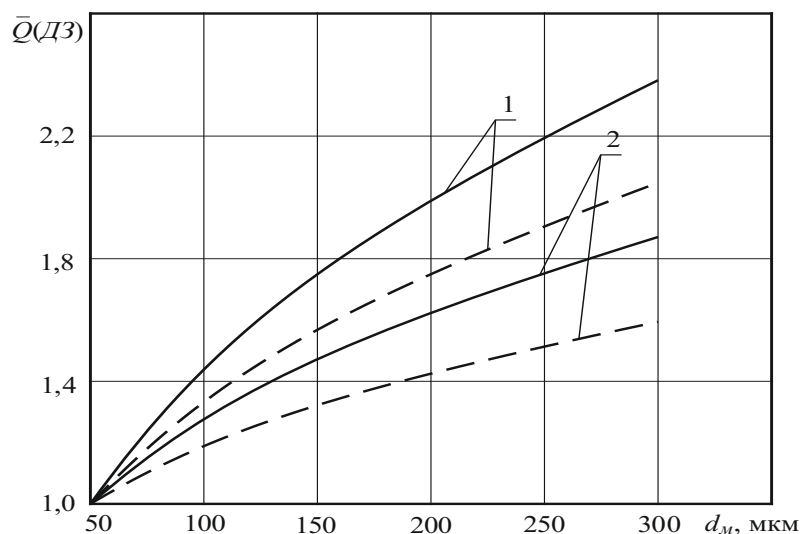


Рисунок 5.6 – Залежність відносної ймовірності $\bar{Q}(D3)$ ($\bar{Q}(D3) = \frac{Q(D3)}{Q^*(D3)}$),

де $Q^*(D3)$ – значення ймовірності для мінімального розміру частинок металевого пального з використовуваних на практиці діапазонів його зміни [6, 74]) пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів при зовнішній термічній дії від дисперсності порошків металевих пальних та їх вмісту у сумішах, що використовуються у зарядах піротехнічних сумішей: 1 – перший виріб з зарядом суміші на основі $\text{Mg} + \Phi - 3$; 2 – другий виріб з

зарядом суміші на основі $Al + \Phi - 3$ (див. табл. 5.1); ———— – суміші з $\alpha = 0,5$; ——— – суміші з $\alpha = 1,4$.

На підставі проведеного дослідження встановлено, що використання дрібнодисперсних металевих порошків на стадії виготовлення зарядів піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів із надлишком металевого пального сприяє збільшенню часу до їх передчасного спрацьовування в умовах зовнішньої термічної дії, і, відповідно, підвищенню пожежної безпеки піротехнічних виробів.

Для кількісної оцінки цього ефекту було розраховано ймовірність $Q(D3)$ ініціювання джерела запалювання при термічній дії, що корелює з ймовірністю пожежонебезпечного руйнування виробів у цих умовах. За допомогою формул (5.1)–(5.5), використовуючи отримані експериментальні дані (рис. 5.4, 5.5) та відомі фізико-хімічні характеристики, було проведено розрахунки для двох серійних піротехнічних виробів (Табл. 5.1).

Результати (рис. 5.6) демонструють, що ймовірність $Q(D3)$ суттєво зменшується зі зменшенням коефіцієнта надлишку окиснювача (α) та середнього розміру частинок металевого пального (dm):

- для виробу 1 – зменшення у 2,1–2,7 разу.
- для виробу 2 – зменшення у 1,5–1,9 разу.

Таким чином, шляхом модифікації вмісту порошкоподібних металевих пальних та їх дисперсності у піротехнічних сумішах виробів, можна підвищити їх пожежну безпеку в умовах зовнішньої термічної дії більше, ніж у 1,4–2,3 разу. Крім того, заміна одного металевого пального іншим (наприклад, магнієвого порошку алюмінієвим) також забезпечує суттєве підвищення пожежної безпеки виробу (до 1,7 разу).

Таблиця 5.1 – Перелік піротехнічних виробів загальнопромислового призначення, на прикладі яких апробувалась методика розрахунку ймовірності $Q(D3)$

№ п/п	Призначення	Склад заряду піротехнічної суміші	Рецептура основних компонентів заряду піротехнічної суміші	Відносний масовий вміст компонентів суміші, %
1	Тверді піротехнічні палива для ПВРД	Суміш на основі Mg + Ф – 3 + технологічні добавки	Ф – 3	65
			Mg	31
			Технологічні добавки	4
2	Піротехнічні запалювальні вироби	Суміш на основі Al + Ф – 3 + технологічні добавки	Ф – 3	69
			Al	28
			Технологічні добавки	3

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та впровадженні:

- науково обґрунтованого методу визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів та технологічних параметрів зарядів піротехнічних сумішей (металеві порошки + фторопласти), перевищення яких призводить до їх передчасного спрацювання та пожежонебезпечного руйнування виробів;
- засобів контролю та технологічних рекомендацій, які дозволяють знизити ймовірність виникнення пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні (з урахуванням зовнішніх термічних впливів) у 1,5–2,7 разу. Це досягається шляхом збільшення температури та часу займання зарядів сумішей у 1,2–1,7 разу.

Теоретичні положення, експериментальні дані та розроблений метод знайшли практичне використання та впровадження (що підтверджується відповідними актами впровадження) на низці промислових підприємств України, а також впроваджено в діяльність ДСНС України: Державний центр сертифікації ДСНС України (акт впровадження від 21.11.25); ГУ ДСНС України у Полтавській області (акт впровадження від 25.11.25); ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон» (акт впровадження від 10.11.25); ДП «Науково-дослідний інститут «Квант» (акт впровадження від 17.11.25). Практичне впровадження результатів дисертації на зазначених організаціях і підприємствах дозволяє підвищити протипожежний захист об'єктів, де має місце застосування виробів з зарядами сумішей.

Теоретичні та експериментальні дані, представлені у дисертації, використовуються в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України при здійсненні підготовки фахівців для ДСНС України за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» освітнього рівня «доктор філософії», «магістр» та за спеціальністю 263 «Цивільна безпека», освітнього рівня «бакалавр» (акт впровадження від 19.11.25): матеріали дисертації використовуються при викладанні таких професійно орієнтованих освітніх компонентів, як: «Організація наукових досліджень», «Техногенна безпека об'єктів». Таким чином, результати дослідження забезпечують подвійну значущість: прикладну (підвищення пожежної безпеки) та освітньо-методичну (поглиблення фахової підготовки).

Висновки до розділу 5

1. Для забезпечення розрахункових потреб дослідження та практичної імплементації розроблених моделей сформовано спеціалізований програмний комплекс. Цей комплекс інтегрує три стандартні пакети прикладних програм та включає 60 індивідуальних програмних модулів, які реалізують сучасні чисельні методи. Комплекс орієнтований на функціонування на персональних комп'ютерах (ПК) і забезпечує діалоговий

режим роботи та обробку даних у реальному часі. Спектр вирішуваних задач охоплює типові інженерно-технологічні задачі пожежної безпеки піротехнічних сумішей, включаючи: нелінійну теплопровідність та дифузію; термогазодинаміку; хімічну кінетику; математичну обробку експериментальних даних тощо.

2. Вперше розроблено науково обґрунтований метод, який є комплексним інтегральним рішенням. Його методологічна основа поєднує: отримані математичні моделі, сформовану базу експериментальних даних, спеціалізоване програмне забезпечення (представлене трьома стандартними пакетами прикладних програм). Зазначений метод дозволяє генерувати на ПК масив даних, необхідний для практичного використання, у режимах діалогу та реального часу. Цей масив містить інформацію щодо критичних діапазонів зміни параметрів: зовнішніх термічних дій, керованих технологічних параметрів зарядів сумішей. Визначення цих критичних діапазонів є ключовим для запобігання пожежонебезпечним руйнуванням піротехнічних виробів.

3. Результати дисертаційної роботи успішно впроваджено на низці промислових підприємств України. Впровадження реалізовано у формі розроблених засобів контролю та технологічних рекомендацій. Це забезпечило підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів (таких як тверді піротехнічні палива для прямоточних повітряно-реактивних двигунів (ПВРД), запалювальні засоби та ін.) в умовах зовнішніх термічних впливів у 1,5...2,7 разу. Крім того, окремі наукові результати застосовуються в навчальному процесі у закладі вищої освіти України, що сприяє підготовці висококваліфікованих фахівців у галузі пожежної безпеки.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання в галузі пожежної безпеки, яке полягає у розвитку наукового підґрунтя щодо запобігання передчасних пожежонебезпечних займань піротехнічних виробів із зарядами сумішей на основі порошків металевих палих та фторопластів. Це досягається шляхом встановлення критичних режимів процесів їхнього нагрівання, займання та розвитку горіння, що слугує основою для запобігання виникненню пожежі у випадку зовнішніх термічних дій.

Основні наукові та практичні результати роботи зводяться до наступного.

1. Проведено системний аналіз процесів термічної дії на піротехнічні вироби із зарядами сумішей у умовах їх зберігання та транспортування. На підставі цього аналізу визначено основні причини передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів та сформовано шляхи їх запобігання.
2. Розроблено математичні моделі, які описують вплив зовнішніх термічних дій на заряди сумішей різної геометричної конфігурації (пластини, бруски, прямокутні елементи). Наукова новизна цих моделей полягає у точному врахуванні температурної залежності теплофізичних властивостей матеріалу, зокрема об'ємної теплоємності $C_V(T)$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$. Застосування представлених моделей дозволило підвищити точність встановлення критичних значень зовнішніх теплових потоків та тривалості їх впливів і тим самим зменшити відносну похибку розрахунків з 10–15 % до 6–8 %. Це є критично важливим для забезпечення безпеки і запобігання передчасному займанню зарядів сумішей та вибухонебезпечному розвитку горіння, що, своєю чергою, унеможливорює пожежонебезпечне руйнування піротехнічних виробів

3. Розроблено математичну модель горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей типу «металеве пальне + фторопласт». Основою цієї моделі є експериментальні дані, що стосуються високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металу у продуктах розкладу окиснювача під дією зовнішніх термічних впливів. Валідація моделі, виконана шляхом порівняння розрахункових залежностей швидкостей горіння від температури нагріву та зовнішнього тиску з експериментальними даними для діапазонів зміни технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів), що використовуються у піротехнічному виробництві, підтвердила її придатність для інженерного використання (відносна похибка не перевищує 5 – 7 %). Ця модель надає можливість визначати швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, а також встановлювати критичні діапазони технологічних параметрів, перевищення яких спричиняє нестабільний та вибухонебезпечний розвиток процесу горіння.

4. Сформовано нову базу експериментальних даних, необхідну для встановлення закономірностей комплексного впливу на температуру займання T_z та час згоряння частинок металевого пального τ_z у продуктах розкладання суміші, а також швидкість її горіння u і технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , середнього розміру частинок металевого пального d_m) та зовнішніх умов (швидкості потоку продуктів розкладання V , температури нагріву T_0 та зовнішнього тиску P):

- збільшення d_m від 54 мкм до 310 мкм та зменшення α від 1,5 до 0,5 призводить до зменшення T_z у 1,3...1,8 разу; зростання P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення T_z у 1,5...1,7 разу;
- зменшення d_m від 310 мкм до 54 мкм незалежно від α , V та P призводить до суттєвого зменшення τ_z (більше, ніж у 9...10 разів); зростання α від 0,5 до 1,5, V від 2 м/с до 9 м/с та P від 10^5 Па до 10^7 Па незалежно від d_m призводить до зменшення τ_z (у 1,6...3,2 разу);

- зростання T_0 (до 873 K) та P (до 10^7 Па) приводить до збільшення u у 1,3...1,5 разу; при цьому зменшення α від 1,5 до 0,5 та d_m від 310 мкм до 54 мкм збільшують її значення у 1,6...1,7 разу;
- розроблено нові експериментально-статистичні моделі для формування на ПК в режимі діалогу та реального часу бази даних (відносно похибка 4...7 %) по впливу керованих технологічних параметрів на основні характеристики процесу горіння сумішей (T_z , τ_z та u) в умовах зовнішніх термічних впливів (T_0 та P), що дозволяють на стадії виготовлення виробів шляхом регулювання технологічних параметрів підвищувати їх пожежну безпеку в умовах зберігання, транспортування та застосування.

5. Розроблено науково обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термодій на заряди сумішей, характеристик розвитку їх горіння та керованих технологічних параметрів, перевищення яких може призвести до пожежонебезпечного руйнування виробів. Практичне застосування забезпечене на низці підприємств України шляхом впровадження засобів контролю та технологічних рекомендацій, що дозволило знизити ймовірність пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні у 1,5–2,7 рази шляхом збільшення температури та часу займання зарядів сумішей у 1,2–1,7 рази. Крім того, окремі наукові результати застосовуються в навчальному процесі у закладі вищої освіти України, що сприяє підготовці висококваліфікованих фахівців у галузі пожежної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонов А. В., Боровіков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. В. Вогнегасні речовини. Посібник. Київ, 2004. 171 с.
2. Баланюк В.М., Ковалишин В.В., Козяр Н.М. Запобігання займання газових сумішей н-гептану комбінованими системами ударних хвиль та об'ємних вогнегасних речовин. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2017. № 11(40)2017. С. 21-24.
3. Берещук Р. Б., Кириченко О. В., Кириченко Є. П, Гончар С. В. Аналіз пожежної небезпеки об'єктів зберігання вибухонебезпечних піротехнічних речовин. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів)*. Черкаси. 2021. С. 10–11.
4. Богуслаєв В. А., Качан А. Я., Калініна Н. Є. и др. Авіаційно-космічні матеріали та технології. *Довідник*. Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ». 2009. 351 с.
5. Ващенко В. А., Антонюк В. С., Бондаренко М. О. Біофізика і біомеханіка. *Навчальний посібник*. Київ: НТУУ «КПІ». 2012. 344 с.
6. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заїка П. І., Яценко І. В., Цібулін В. В. Процеси горіння металізованих конденсованих систем. *Монографія*. Київ: Наукова думка. 2008. 745 с.
7. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Цібулін В. В., Яценко І. В. Комплекс досліджуваних установок, що моделлюють реальні умови застосування піротехнічних нітратовмісних виробів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2009. № 1(19). С. 127–137.
8. Ващенко В. А., Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Яценко І. В., Бондаренко М. О., Кириченко О. В., Рудь М. П. Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування. *Навчальний посібник*. Київ: НТУУ «КПІ». 2012. 412 с.

9. Вибухи на складах боєприпасів в Україні. Історія катастроф. URL: <https://gordon.com/ukr/publications/vibuhi-na-skladah-bojepripasiv-v-ukrajini-istorija-katastrof-l79716.html>.
10. Гороновський І. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Є. Ф. Короткий довідник по хімії. Київ: Наукова думка. 1987. 829 с.
11. Діброва О. С. Дисертація. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-титанових сумішей: дис. Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2020. 246 с.
12. Діброва О. С., Кириченко О. В. Вплив технологічних параметрів на швидкість горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей. *Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси. 2018. С. 32–34.
13. Діброва О. С., Кириченко О. В. Методика досліджень процесів розвитку горіння піротехнічних нітратно-титанових сумішей. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2019. С. 176–177.
14. Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В. Пожежна небезпека піротехнічних виробів при відповідному впливі міцності зарядів піротехнічних сумішей. *Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси. 2019. С. 48–49.
15. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal «Intenauka»*. 2020. № 5/5799.
16. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal «Intenauka»*. 2020. № 5/5798.

17. ДБН В.2.5-56-2014. Системи протипожежного захисту. Затверджено наказом Мінрегіону України від 13.11.2014 р. № 312.
18. ДСТУ CEN/TR 15970:2022 Піротехнічні вироби. Піротехнічні вироби для транспортних засобів. Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Наказ від 28.12.2022 № 285 Про пакетне прийняття європейських нормативних документів CEN/CENELEC.
19. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний від 2020.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2019. 146 с.
20. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Чинний від 2020.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2019. 132 с.
21. ДСТУ EN 15947-2:2021. Піротехнічні вироби. Феєрверки класів F1, F2 та F3.
22. ДСТУ CEN/TR 15953:2022 Піротехнічні вироби. Інші піротехнічні вироби, категорії P1 і P2. Огляд гармонізованих стандартів, які будуть розроблені CEN/TC 212/WG 5 (CEN/TR 15953:2009, IDT). Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Наказ від 28.12.2022 № 285 Про пакетне прийняття європейських нормативних документів CEN/CENELEC.
23. ДСТУ EN 16263-4:2021 Піротехнічні вироби. Інші піротехнічні вироби. Частина 4. Методи контролювання (EN 16263-4:2015, IDT). Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). Наказ від 05.11.2021 № 406 Про прийняття національних стандартів.
24. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. <https://dsns.gov.ua/analitichna-dovidka-pro-pozezi.pdf>.

25. Кириченко Є., Берещук В., Кириченко О. Дослідження впливу зовнішніх термічних дій на пожежну безпеку піротехнічних виробів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси. 2021. С. 179–180.
26. Кириченко Є., Ковалишин В. Вплив добавок парафіну, стеарину на температуру та склад продуктів згоряння алюмінієво-магнієвих сумішей. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси, 2021. С. 181–182.
27. Кириченко Є. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2021. Том 5. № 2. С. 37–51.
28. Кириченко Є., Гвоздь В., Ващенко В., Кириченко О., Дядюшенко О., Мельник В. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2(12). С. 111–121.
29. 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.
30. Кириченко Є. П., Ковалишин В. В. Запобігання вибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів на основі сумішей з металевих пальних при зовнішніх термічних впливах. *Матеріали Міжнародної науково-*

практичної конференції “Проблеми пожежної безпеки 2022”. Харків. 2022. С.22–24.

31. Кириченко Є. П., Кириченко О. В. Аналіз пожежної небезпеки об’єктів з наявністю піротехнічних виробів. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад’юнктів (аспірантів)*. Черкаси. 2022. С. 34–35.

32. Кириченко Є. П., Кириченко О. В. Дослідження впливу дисперсності компонентів піротехнічних сумішей на швидкість горіння. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад’юнктів (аспірантів)*. Черкаси. 2022. С. 35–36.

33. Кириченко Є. П., Гвоздь В. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Ващенко В. А., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Підвищення стійкості процесу горіння піротехнічних сумішей шляхом введення добавок органічних речовин. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. № 3/2022. С. 73–83.

34. Кириченко Є. П. Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. № 2. С. 53–63.

35. Кириченко Є., Ковалишин В. Дослідження процесу нагрівання частин металевих корпусів піротехнічних виробів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси. 2022. С.134–135.

36. Кириченко Є., Ковалишин В., Кириченко О., Дядюшенко О., Діброва О. Дослідження впливу теплового потоку на поверхню оболонки корпусів піротехнічних виробів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси. 2022. С.136–137.

37. Кириченко Є., Ковалишин В. Математичні та експериментально-статистичні моделі формування бази даних піротехнічних металооксидних виробів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2022. С. 172–174.
38. Кириченко Є. Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Том 6. № 1. С. 29–42.
39. Кириченко Є. П. Дисертація. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків металевих палих та оксидів металів: дис. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. 2024. 292 с.
40. Кириченко О. В., Цибулін В. В., Яценко І. В., Ващенко В. А. Моделювання пожежонебезпечних режимів горіння нітратних систем при застосуванні піротехнічних виробів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 4. С. 35–41.
41. Кириченко О. В. Моделювання нестійких режимів горіння піротехнічних нітратних систем з врахуванням агломерації металевого пального. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2008. № 1(17). С. 78–86.
42. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І., Цибулін В. В. Реакції, що протікають у конденсованій фазі та полум'ї при горінні піротехнічних нітратно-алюмінієвих систем. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. № 4. С. 75–80.
43. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І., Цибулін В. В. Аналіз реакцій, що протікають у конденсованій фазі та полум'ї при горінні піротехнічних нітратно-магнієвих систем. *Пожезна безпека: теорія і*

практика. *Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля*. 2009. № 2. С. 60–66.

44. Кириченко О. В. Дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на залежності швидкості горіння ПНС від співвідношення компонентів та концентраційні межі горіння. *Зб. «Праці Одеського національного політехнічного університету»*. 2010. Вип. 2(6). С. 191–196.

45. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І., Омельченко А. М., Тупицький В. М. Вплив органічних домішок на вибухонебезпечні режими горіння ПНМС в умовах підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2010. № 3. С. 118–125.

46. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І., Тупицький В. М. Термодинамічні розрахунки температури та складу продуктів згорання нітратно-цирконієвих сумішей. *Пожарна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля*. 2010. № 6. С. 62–65.

47. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І., Цибулін В. В., Владінова Т. І., Тупицький В. М. Вплив підвищених зовнішніх тисків на температуру і склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-алюмінієвих сумішей при різних співвідношеннях компонентів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2010. № 2(22). С. 87–94.

48. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І., Цибулін В. В. Термодинамічні розрахунки температури та складу конденсату в продуктах згорання піротехнічних нітратно-титанових сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2010. № 4. С. 173–177.

49. Кириченко О. В. Термодинамічні методи прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей. *Пожарна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля*. 2011. № 7. С. 59–67.

50. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Тупицький В. М. Залежність температури та складу продуктів згорання піротехнічних сумішей магнію з нітратовмісними окислювачами від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Техногенна безпека: теорія, практика, інновації»*. Львів. 2011. С. 99–101.
51. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Високотемпературне окислення алюмінію в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 1(24). С. 47–53.
52. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Термодинамічний аналіз та прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних втратно-металічних сумішей. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека життєдіяльності в XXI столітті»*. Дніпропетровськ: 2011. С. 200–205.
53. Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Керування базою даних по термодинамічним характеристикам піротехнічних нітратно-металевих сумішей, що визначають їх пожежонебезпечні властивості в умовах зовнішніх впливів. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека – 2011»*. Харків: Національний університет цивільного захисту. 2011. С. 242–243.
54. Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Ващенко В. А., Рудешко І. В. Вплив добавок органічних речовин на максимальну температуру згорання піротехнічних сумішей алюмінію з нітратовмісними окислювачами. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми технічних та природничих наук у забезпеченні діяльності служби цивільного захисту»*. Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2011. С. 54–56.
55. Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Тупицький В. М., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Спалахування частинок металічних палих в продуктах

розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнік сумішей при зовнішніх термовпливах. *Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Пожезна безпека: теорія і практика»*. Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2011. С. 30–33.

56. Кириченко О. В. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по температурі спалахування частинок металевого пального в газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окислювачів. *Пожезна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля*. Черкаси. 2011. № 1. С. 119–124.

57. Кириченко О. В. Залежність вмісту неокисленого алюмінію в продуктах згорання піротехнічних нітратно-алюмінієвих сумішей від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 1(23). С. 60–68.

58. Кириченко О. В. Залежність вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних сумішей алюмінію з нітратовмісними окислювачами від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску. *Вісник ЧДТУ*. 2011. № 1. С. 119–124.

59. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Акіньшин В. Д., Цибулін В. В. Спалахування частинок алюмінію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву. *Пожезна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля*. 2011. № 9. С. 17–25.

60. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тищенко Є. О. Високотемпературне окислення магнію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. № 3. С. 115–120.

61. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх

термовпливів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. № 4. С. 116–120.

62. Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Термодинамічні методи прогнозування пожежонебезпечних властивостей високометалізованих піротехнічних нітратно-металічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків: НУЦЗ. 2011. № 30. С. 104–106.

63. Кириченко О. В. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2012. № 1(25). С. 126–136.

64. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення цирконію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішнього нагріві. *Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля*. 2012. № 10. С. 59–65.

65. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Спалахування частинок цирконію в продуктах термічного розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 1. С. 124–128.

66. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тищенко О. М. Методи розрахунку швидкості горіння частинок металевих палих в газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 2. С. 95–101.

67. Кириченко О. В. Створення бази даних по швидкостям та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Вісник ЧДТУ*. 2012. № 3. С. 88–90.

68. Кириченко О. В. Вплив підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків на швидкість і межі горіння піротехнічних нітратно-цирконієвих сумішей. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2012. № 2(26). С. 104–110.
69. Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Ващенко В. А., Тупицький В. М. Горіння частинок металів в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішньому нагріві. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми технічних та природничих наук у забезпеченні діяльності служби цивільного захисту»*. Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2012. С. 17–19.
70. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкості та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту»*. Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2012. С. 122–126.
71. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Керована база даних по часам згорання частинок металевих палих в продуктах розкладання піротехнічних сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 4. С. 78–83.
72. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту. *Проблеми пожеженої безпеки*. Харків: НУЦЗУ. 2012. № 32. С. 98–112.
73. Кириченко О. В., Налева Г. В. Вплив температури нагріву на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Зб. «Праці Одеського національного політехнічного університету»*. 2012. Вип. 2(39). С. 143–147.

74. Кириченко О. В., Пашковський П. С., Ващенко В. А., Лега Ю. Г. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. *Монографія*. Київ: Наукова думка. 2012. 318 с.
75. Кириченко О. В., Козяр Н. М., Ващенко В. А. та ін. Термодинамічні основи пожежної безпеки піротехнічних виробів в умовах надзвичайних ситуацій та військових дій. *Монографія*. / Під редакцією д. т. н., професора Кириченко О. В. Черкаси: Пономаренко Р. В. 2023. 436 с.
76. Козяр Н. М. Запобігання передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних сумішей в умовах пострілу та польоту. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Том 7. № 2. С. 133–151.
77. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Тупицький В. М. Керована база даних по часам згорання частинок металевих палих в продуктах термічного розкладання піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Матеріали 14 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*. Київ: Інститут державного управління у сфері цивільного захисту МНС України, 2012. С. 213–216.
78. Кириченко О. В. Математичне моделювання процесу нагріву металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту. *Науковий вісник УкрНДІЦЗ*. 2013. № 1(27). С. 173–186.
79. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків: НУЦЗУ. 2013. № 34. С. 73–95.
80. Кириченко О. В., Барановський О. С., Кириченко Є. П. Аналіз пожежовибухонебезпеки піротехнічних виробів у процесі їх зберігання, транспортування та застосування. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України “Пожежна безпека: теорія і практика”*. 2015. № 20, С. 42–46.

81. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко Є. О., Цибулін В. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 2. С. 5–11.
82. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Барановський О. С., Цибулін В. В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках. *Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць*. 2018. Вип. 19. С. 323–332.
83. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Науковий вісник "Цивільний захист та пожежна безпека"*. 2019. № 2 (8). С. 81–85.
84. 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*. 2019. № 3. С. 56–67.
85. Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Діброва О. С., Мельник В. П., Ващенко В. А., Бутенко Т. І. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального у продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах. *Збірник наукових праць «Проблеми пожежної безпеки»*. 2020. № 47. С. 50–59.
86. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 2. С. 123–133.

87. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б. Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси. 2020. С. 260–262.
88. Кириченко О., Козяр Н. Ідентифікування небезпек (властивості речовин та матеріалів, горіння, займистість, процес вибуху). *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2022. С. 27–29.
89. Кириченко О. В., Козяр Н. М., Школяр Є. В. Встановлення критичних параметрів зовнішніх термоударних впливів на поверхню циліндричних металевих оболонок зарядів, що складаються з піротехнічних нітратно-металевих сумішей, у контексті їх практичного використання. *Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference*. Dnipro, Ukraine: FOP Marenichenko V. V. 2023. С. 181–184.
90. Ковалишин В. В., Марич В. М., Лозинський Р. Я. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна безпека*. 2016. № 28. С. 58–63.
91. Ковбаса В., Кириченко Є., Школяр Є., Хижняк А. Аналіз швидкостей горіння піротехнічних сумішей з урахуванням компонентів, таких, як металеві пальні, фторопласта та органічні добавки, за допомогою розробки експериментальних статистичних моделей і створення бази даних. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2023. С. 120–122.
92. Ковбаса В. О., Кириченко О. В. Закономірності впливу широкого класу добавок речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей. *Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022). Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків. 2022. С. 25–26.

93. Ковбаса В. О., Кириченко О. В. Визначення закономірностей впливу теплового потоку на поверхні піротехнічних виробів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2022. С. 33–35.
94. В. О. Ковбаса, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, Є. В. Школяр, М. Г. Томенко, А. А. Хижняк, С. О. Колінько. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкостям розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі металевих пальних, фторопластів та добавок органічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Том 7 № 2. С. 119–132.
95. Ковбаса В. О. Вплив технологічних параметрів та зовнішніх умов на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. С. 119–134.
96. Ковбаса В. О., Кириченко О. В., Куценко М. А., Ващенко В. А., Березовський А. І., Школяр Є. В., Мотрічук Р. Б. Дослідження механізму та розробка моделей розвитку процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей металевих пальних з фторопластами в умовах зовнішніх термічних впливів. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*. Дрогобич: ДВНЗ «ДНТУ». 2025. № 1(56). С. 31–47.
97. В. Ковбаса, О. Кириченко, М. Куценко, В. Ващенко, А. Березовський, Є. Школяр, М. Томенко. Керована база даних по часам згоряння частинок металевих пальних в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. *Збірник наукових праць Національного університету Цивільного захисту України “Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація”*. 2025. Том 9. № 1. С. 76–85
98. Козяр Н., Кириченко О., Ващенко В., Кириченко Є., Ковбаса В., Колінько С., Томенко М. Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних

речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Том 6. № 2. С. 15–26.

99. Козяр Н., Ковбаса В., Кириченко Є., Дядюшенко О., Георгієвський Д. Критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах транспортування. Надзвичайні ситуації: безпека та захист. *Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2023. С. 126–127.

100. Козяр Н. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Кириченко Є. П., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Закономірності впливу чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих палив. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 1. С. 72–81.

101. Козяр Н. М. , Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Дядюшенко О. О., Ващенко В. А., Колінько С. О. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування. *Науковий вісник «Цивільний захист та пожежна безпека»*. 2023. № 2(16). С. 42–56.

102. Козяр Н., Ковбаса В., Кириченко Є., Дядюшенко О., Георгієвський Д. Критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах транспортування. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2023. С. 126–127.

103. Козяр Н., Кириченко О., Ковбаса В., Ващенко В., Куценко М., Школяр Є., Ножко І. Визначення процесів займання частинок металевих палив у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та*

ліквідація», Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8. № 2. С. 44–56.

104. Козяр Н. М. Дисертація. Розвиток наукових основ попередження пожежовибухонебезпечного займання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. дис. Черкаси: Національний університет цивільного захисту України, 2025. 438 с.

105. Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Кириченко Є. П., Цибулін В. В. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 4. С. 131–142.

106. Мотрічук Р. Б., Кириченко Є. П., Кириченко О. В. Результати досліджень температури на поверхнях зарядів піротехнічних спалахувачів різної геометричної форми (плоский та циліндричний шари), які піддаються зовнішнім термічним впливам. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2020. С. 69–70.

107. Мотрічук Р. Б., Кириченко Є. П. Техногенна безпека Черкаської області. Аналіз. Дії. Результати. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2020. С. 67–68.

108. Мотрічук Р. Б. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних спалахувачів на основі сумішей з порошків алюмінієво-магнієвих сплавів та нітратовмісних окиснювачів. *Дисертація доктора філософії*. Черкаси. 2021. 258 с.

109. Наказ МВС України від 30.12.2014. № 1417. Правила пожежної безпеки в Україні.

110. Наказ МВС України від 06.06.2017. № 470. Правила пожежної безпеки на ринках України.
111. Технічний регламент піротехнічних виробів, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 05.01.2021. № 8.
112. Фатєєв В. М., Таборов Л. І., Ємець О. Ю. Піротехніка. Нормативні акти України щодо діяльності в сфері піротехнічних виробів. *Довідник*. Київ: Аграр Медіа Груп, 2012.
113. Фатєєв В. М., Приходько Ю. П., Таборов Л. І. Піротехніка. Київ. 2017. 456 с.
114. Arbeitskreis V. Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden: Ständige Konferenz der Innenminister und Senatoren der Länder. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Heyrothsberge, 2017.
115. Arkhipov V., Korotkikh A., Kuznetsov V. Ignition of energetic materials containing nanopowder of metals. *Self-propagating High-temperature Synthesis. Book of Proceedings of the IX International Symposium*. Dijon, France, 2007. P. 43–44.
116. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Nonstationary burning rate of solid propellants. *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere*. Moscow: TORUS PRESS, 2009. P. 257–263.
117. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. I. Research methods. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. Vol. 46. No. 5. P. 564–569.
118. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. II. Research results. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. Vol. 46. No. 5. P. 570–577.
119. Balanyuk V. M., Kozyar N. M., Garasymuyk O. I. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. No. 3/10. P. 71.

120. Balanyuk V. M., Kozyar N. M., Garasymuyk O. I. The usage of gas and aerosol powder extinguishing mixtures for protection of incendiary mixtures. *Science Rise*. 2016. Vol. 5. No. 2(22). P. 10–14.
121. Balanyuk V. M., Kovalyshyn V. V., Kozyar N. M. Effect of ecologically safe gas- aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. No. 4/10. P. 88.
122. Barzykin V. V. and Merzhanov A. G. Unstable combustion in heteroreaction product – a review. *Intern. J. of SHS*. 1997. Vol. 6. No. 4. P. 377–398.
123. Brewster M. Q., Mullen J. C. Flame structure in aluminized wide-distribution AP composite propellants. *Combustion and Flame*. 2010. Vol. 157. P. 2340–2347.
124. Czerwona Księga Pożarów: wybrane problemy pożarów oraz ich skutków: 2 t. Ed. by P. Guzewski, D. Wróblewski, D. Matozięc Krakow: CNBOP-PIB Józefów, 2014. Vol. 1. 624 s.
125. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M., Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES*. 2020. No. 1/1(51). P. 44–49.
126. EN 15947-3:2022. Pyrotechnic articles. Fireworks, Categories F1, F2 and F3. Part 3: Minimum labelling requirements.
127. Evaluation of a New Liquid Fire-Extinguishing Agent for Combustible Metal Fires: federal aviation administration Report DOT/FAA/AR/TN06-26. Virginia: National Technical Information Service (NTIS), 2006. 12 p.
128. Filzen M. Feuerwehr löscht Magnesium-Brand im Essener Hafen mit Sand. Feuerwehr Essen. Pressemitteilung. 2015.
129. Filzen M. Feuer in Essener Hafenmühle, brennt gelagertes Aluminiumgranulat. Feuerwehr Essen. Pressemitteilung. 2016.
130. Glotov O. G. & Surodin G. S. 2019. Combustion of Aluminum and Boron Agglomerates Free Falling in Air. *Experimental Approach, Combustion, Explosion, and Shock Waves*. Vol. 55. P. 335–344.

131. Guo Z., Ju J., Guan H., Shi C., and Li Z. Study of combustion characteristics of magnesium/sodium nitrate pyrotechnics under sub-atmospheric pressure. *Combustion Science and Technology*. 2022. P. 1–15.
132. Guo Z., Ju J., Guan H., Shi C., and Li Z. Study of Combustion Characteristics of Magnesium. Strontium Nitrate and Magnesium. Sodium Nitrate Pyrotechnics Under Low Pressure Environment. *Combustion Science and Technology*. 2023. P. 1–17.
133. Kovalyshyn V. V. Marych V. M., Novitskyi Y. M., Gusar B. M., Chemetskiy V. V., Mirus O. L. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5. No. 5(95). P. 68–76.
134. Kozyar N., Kyrychenko O., Kovbasa V., Vaschenko V., Kolinko S., Butenko T., Tsybulin V. Combustion model for burning multicomponent pyrotechnic nitrate- metallized mixtures. *Bulletin of Cherkasy State Technological*. 2023. No. 3. P. 69–84.
135. Kozyar N., Kyrychenko O., Kovbasa V., Diadiushenko O. Regulations of the Influence of External Thermal Influences on Speed and Explosive Safe Combustion Modes of Pyrotechnic Nitrate Metallized Mixtures with Metal Fluoride. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2023. Vol. 952. P. 155–165.
136. Kyrychenko I., Kyrychenko O., Hvozď V., 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. *Науковий вісник “Цивільний захист та пожежна безпека”*. 2022. No. 2(14). 35–43.
137. Kyrychenko I., Diadiushenko O., Kyrychenko O., Dibrova O. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. Solid State Phenomena. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2022. Vol. 334. P. 115–123.

138. Kyrychenko O., Zemlianskyi O., Motrichuk R., Shkoliar Y., Kovbaca V. Thermodynamic calculations for determine the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. *Emergency situations: prevention and elimination*. 2023. Vol. 7. No. 1. P. 191–201.
139. Kyrychenko O., Kovbasa V., Kutsenko M., Shkoliar I. Experimental-Statistical Models for Obtaining a Database on the Ignition Temperatures of Metal Fuel Particles in Gaseous Products of Thermal Decomposition of Fluoroplasts-Based Pyrotechnic Mixtures. *Steel, Alloys, Corrosion Protection and Materials Technologies. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland*. 2025. ISSN: 1662-9752, Vol. 1164, pp 145-153.
140. Lomba R., Bernard S., Gillard P., Mounaim-Rousselle C., Halter F., Chauveau C., Tahtouh T. & Guezet O. Comparison of Combustion Characteristics of Magnesium and Aluminum Powders. *Combustion Science and Technology*. 2016. No. 188, P. 1857–1877.
141. Mader C L. Numerical Modeling of Explosives and Propellants. CRC Press, 2019.
142. Magnesium-Brand richtet bei Sonneberg Millionenschaden an = Магнієвий вогонь спричиняє мільйони збитків у Зоннеберзі. URL: <https://www.thueringer-allgemeine.de/web/zgt/leben/blaulicht/detail/-/specific/Magnesium-Brand-richtet-bei-Sonneberg-Millionenschaden-an-1529078490>.
143. Makoto Kohga, Kayoko Okamoto Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of ammonium nitrate (polytetrahydrofuran) glycerin composite propellant. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. P. 573–582.
144. Martin C., Comet M., Schnell F., Berthe J.-E., Spitzer D. Aluminum nanopowder: A substance to be handled with care. *Journal of Hazardous Materials*. 2018. P. 347–352.

145. Mocella C., & Conkling J. A. Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory, Third Edition. CRC Press, 2018. 316 p.
<https://doi.org/10.1201/9780429262135>.
146. Mocella C., and Conkling J. A. Chemistry of pyrotechnics: basic principles and theory. CRC Press, 2019.
147. Monk I., Schoenitz M., Jacob R. J., Dreizin E. L. & Zachanah M. R. Combustion Characteristics of Stoichiometric Al-CuO Nanocomposite Thermites Prepared by Different Methods. *Combustion Science and Technology*. 2017. No. 189. P. 555–574.
148. NFPA 484. Standard for Combustible Metals. National Fire Protection Association. 2006. 158 p.
149. Nolan D. (Eds.). Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. 4th edition. Elsevier, 2018.
150. Pouretedal H. R., and Ravanbod M. Kinetic study of ignition of Mg/NaNO₃ pyrotechnic using non-isothermal TG/DSC technique. *J. Therm. Analyt. Calorim.* 2015. P. 119.
151. Pouretedal H. R., and Mousavi S. L. Study of the ratio of fuel to oxidant on the kinetic of ignition reaction of Mg/Ba(NO₃)₂ and Mg/Sr(NO₃)₂ pyrotechnics by non-isothermal TG/DSC technique. *J. Therm. Analyt. Calorim.* 2018. P. 132.
152. Rourke, D. J. Magnesium – current status and future prospects. *Conference in conjunction with METER 2000. Magnesium New Business Opportunies*. Brescia: Proc. Intern., 2000. P. 14–23.
153. Schlüsslmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand. *Blaulicht*. 2016. No. 3. S. 4–8.
154. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw. *Feuerwehr-Magazin*. 2016. No. 5. S. 8.
155. SIST EN 15947-2:2022 – Pyrotechnic articles – Fireworks, Categories FI, F2 and F3. – Part 2: Categories and types of firework.

156. Sivapirakasam S. P., Harisivasri Phanindra K., Rohin J. & Aravind S. L. Impact Sensitivity of Pyrotechnics: A Model Based on Activation Energy. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2020. Vol. 56, P. 592–600.
157. Tepper F., and Kaledin L. Combustion characteristics of kerosene containing Alex nano- aluminum. *Unsteady Combustion and Interior Ballistics: Lectures of the 3rd International Workshop*. Saint Petersburg, 2000. P. 320–325.
158. Trung T. N.. and Thi Cam N. N. Effects of Mg Al alloy powder on the combustion and infrared emission characteristics of the Mg Al PTFE composition. *Defense science journal*. 2020. P. 90-95.
159. Tsapko Y., Guzii S., Remenets M., Kravchenko A., Tsapko O. Evaluation of effectiveness of wood fire protection upon exposure to flame of magnesium. *Eastern-european journal enterprise technologies*. 2016. Vol. 4. No. 10(82). P. 31–33.
160. Tuukkanen I., Brown S. D., Charsley E. L., Goodall S. J., and Lemmetyinen H. Studies on the ageing of a magnesium-strontium nitrate pyrotechnic composition using isothermal microcalorimetry and thermal analysis techniques. *Thermochim. Acta*. 2004. P. 23–29.
161. Woodley C., Claridge R., Johnson N., and Jones A. Ignition and combustion of pyrotechnics at low pressures and at temperature extremes. *Defense Technology*. 2017. No. 3, P. 119-126.
162. Yagodnikov A., Ignatov A. V. & Gusachenko E. I. Ignition and combustion of pyrotechnic compositions based on microsized and ultrananosized aluminum particles in a moist medium in a two-zone gas generator. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2017. Vol. 53. P. 15-23.
163. Yuma Ohkura, Pratap M. Rao, Xiaolln Zheng. Flash ignition of Al nanoparticles: mechanism and applications. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. P. 2544–2548.
164. Zhang K., Han Y., Ren D., and Zhu. C. Experimental and numerical investigations on the condensed combustion products of Mg-based solid fuels. *Fuel*. 2022. P. 329.

165. Zhartovskyi S., Titenko O., Kyrychenko O., Tyshchenko I., Motrichuk R., Melnyk V. Procedure for constructing a mathematical model to determine the time of the initial stage of lire evolution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. No. 1/10. P. 45–52.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах
даних Web of Science Core Collection та/або Scopus**

1. Koziar N., Kyrychenko O., **Kovbasa V.**, Diadiushenko O. Regulations of the Influence of External Thermal Influences on Speed and Explosive Safe Combustion Modes of Pyrotechnic NitrateMetallized Mixtures with Metal Fluoride. *Key Engineering Materials. Fire Safety and Applied Materials*. 2023. Vol. 952. P.155-165. (DOI:10.4028/p-o3twMa).

Особистий внесок - встановлено механізм горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, згідно з яким процес горіння протікає у трьох просторово розділених зонах: у к-фазі, на поверхні горіння та у зоні полум'я).

2. Kyrychenko O., **Kovbasa V.**, Kutsenko M., Shkoliar I. Experimental-Statistical Models for Obtaining a Database on the Ignition Temperatures of Metal Fuel Particles in Gaseous Products of Thermal Decomposition of Fluoroplasts-Based Pyrotechnic Mixtures. *Steel, Alloys, Corrosion Protection and Materials Technologies. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland*. 2025. ISSN: 1662-9752, Vol. 1164. P.145-153. (DOI:10.4028/p-Fmct9Z)

Особистий внесок – проведено експериментальні дослідження по впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на температуру займання частинок металевих горючих в продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів.

**Статті у наукових виданнях, включених до переліку
наукових фахових видань України**

3. **В. О. Ковбаса.** Вплив технологічних параметрів та зовнішніх умов на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2/2023. С. 119–134. (DOI:10.24025/2306-4412.2.2023.278992).

4. **Ковбаса В.О.,** Кириченко О. В., Куценко М.А., Ващенко В. А., Березовський А.І., Школяр Є. В., Мотрічук Р.Б. Дослідження механізму та

розробка моделей розвитку процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей металевих пальних з фторопластами в умовах зовнішніх термічних впливів. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*. Дрогобич: ДВНЗ «ДНТУ». 2025. № 1(56)/2025 С. 31-47.

(DOI: 10.31474/1999-981X-2025-1-31-46).

Особистий внесок - встановлено механізм горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів, а також розроблено математичну модель їх горіння в умовах зовнішніх термодій, що дозволяє визначати закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на стійкі вибухобезпечні режими розвитку горіння сумішей.

5. Козяр Н., Кириченко О., **Ковбаса В.**, Ващенко В., Куценко М., Школяр Є., Ножко І. Визначення процесів займання частинок металевих пальних у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ. 2024. Том 8 № 2. С. 44-56.

(DOI:10.31731/2524.2636.2024.8.2.44.56)

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження температури займання та часу індукції частинок металевих пальних у продуктах розкладання сумішей.

6. Н. М. Козяр, О. В. Кириченко, **В. О. Ковбаса**, Є. П. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, В. В. Цибулін. Закономірності впливу чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих пальних. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 1/2023. С. 72–81. (DOI: 10.24025/2306-4412.1.2023.271133).

Особистий внесок - проаналізовано наявні дані по впливу розглянутих чинників на швидкість розвитку процесу горіння інших металізованих піротехнічних сумішей для співставлення з отриманими даними.

7. **В. О. Ковбаса**, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, Є. В. Школяр, М. Г. Томенко, А. А. Хижняк, С. О. Колінько. Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкостям розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі металевих паливних, фторопластів та добавок органічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Том 7 № 2. С. 119–132. (DOI: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.119.132).

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів та зовнішніх умов (температури нагріву, складу, тиску та ін.).

8. N. Kozyar, O. Kyrychenko, **V. Kovbasa**, V. Vaschenko, S. Kolinko, T. Butenko, V. Tsybulin. Combustion model for burning multicomponent pyrotechnic nitrate-metallized mixtures. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2023. № 3/2023. С. 69–84. (DOI: 10.24025/2306-4412.3.2023.284319).

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння сумішей.

9. Н. М. Козяр, О.В. Кириченко, **В.О. Ковбаса**, О.О. Дядюшенко, В.А. Ващенко, С.О. Колінько. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2(16). С. 42–56. (DOI:10.33269/nvcz.2023.2.42-57).

Особистий внесок - визначено критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів (теплового потоку, часу його дії) для різних технологічних параметрів.

10. O. Kyrychenko, O. Zemlianskyi, R. Motrichuk, Y. Shkoliar, **V. Kovbasa**. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Том 7 № 1. С. 191–201, 2023. (DOI:10.31731/2524.2636.2023.7.1.191.200).

Особистий внесок - проведено термодинамічні розрахунки температури продуктів згорання суміші, вмісту в них високотемпературного конденсату для різних значень технологічних параметрів та зовнішніх умов, що дозволяє шляхом контролю за їх рівнем підвищувати пожежовибухобезпечні властивості сумішей при застосуванні виробів.

11. Н. Козяр, О. Кириченко, В. Ващенко, Є. Кириченко, **В. Ковбаса**, С. Колінько, М. Томенко. Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Том 6 № 2. С. 15–26. (DOI:10.31731/2524.2636.2022.6.2.15-26).

Особистий внесок - проаналізовано методи експериментально-статистичного моделювання з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм для проведення розрахунків.

12. Є. П. Кириченко, В. М. Гвоздь, О. В. Кириченко, **В. О. Ковбаса**, В. А. Ващенко, Т. І. Бутенко. Підвищення стійкості процесу горіння піротехнічних сумішей шляхом введення добавок органічних речовин. *Вісник Черкаського державного технологічного університету* 2022. № 3/2022. С. 73–83. (DOI:10.24025/2306-4412.2.2022.263233).

Особистий внесок - проведено аналіз добавок органічних речовин, що використовуються в технічному виробництві для проведення досліджень, обрано добавки, що здійснюють найбільш значний вплив на швидкість і режими розвитку процесу горіння сумішей.

Статті в інших виданнях, що додатково відображають результати дисертації

13. **В. Ковбаса**, О. Кириченко, М. Куценко, В. Ващенко, А. Березовський, Є. Школяр, М. Томенко. Керована база даних по часам згоряння частинок металевих пальних в продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. *Збірник наукових праць Національного університету Цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2025. Том 9 № 1. С. 76-85. (DOI:10.52363/2524-2636.2025.9.1.7).

Особистий внесок - проведено експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів та зовнішніх умов на час згоряння частинок металевих пального в продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

14. **В. Ковбаса**, Є. Кириченко, Є. Школяр, А. Хижняк. Аналіз швидкостей горіння піротехнічних сумішей з урахуванням компонентів, таких як металеві пальні, фторопласти та органічні добавки, за допомогою розробки експериментальних статистичних моделей і створення бази даних. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси. 2023. С. 120 – 122.

Особистий внесок - розроблено та експериментально-статистичні моделі для визначення діапазонів зміни критичних значень швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

15. **Ковбаса В. О.**, Кириченко О. В. Закономірності впливу широкого класу добавок речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей. *Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022). Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків. 2022. С. 25 – 26.

Особистий внесок - експериментально визначено ступінь впливу широкого класу добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, ідитолу, уротропіну та ін.) на залежності швидкості горіння сумішей на основі фторопластів від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

16. Н. Козяр, **В. Ковбаса**, Є. Кириченко, О. Дядюшенко, Д. Георгієвський. Критичні значення параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах транспортування. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси. 2023. С. 126 – 127.*

Особистий внесок - розроблено методи визначення критичних значень технологічних параметрів в умовах зовнішніх термовпливів на заряди ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів різної геометричної форми та розмірів.

17. **Ковбаса В. О.**, Кириченко О. В. Визначення закономірностей впливу теплового потоку на поверхні піротехнічних виробів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси. 2022. С. 33 – 35.*

Особистий внесок - розроблено математичні моделі теплового впливу на поверхню металевих оболонок піротехнічних виробів на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів в умовах їх зберігання або транспортування з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Державного
центру сертифікації ДСНС України
полковник служби цивільного захисту



Андрій БОБІР
2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертації
КОВБАСИ Вікторії Олегівни
«Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів»,
представленої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі:

голова комісії — доктор технічних наук, доцент, заступник начальника центру — начальник відділу інспектування у сфері пожежної і техногенної безпеки ДЦС ДСНС України полковник служби цивільного захисту Козяр Назарій Михайлович;

члени комісії: начальник відділу сертифікації операторів протимінної діяльності ДЦС ДСНС України підполковник служби цивільного захисту Яківчук Костянтин Васильович;

начальник випробувальної лабораторії ДЦС ДСНС України майор служби цивільного захисту Ромащенко Сергій Олександрович.

склала цей акт, яким підтверджується використання результатів дисертації Ковбаси Вікторії Олегівни «Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів» у вигляді технологічних рекомендацій та засобів контролю, в основу яких покладено розроблений науково обґрунтований метод з визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термовпливів та керованих технологічних параметрів зарядів сумішей на стадії їх виготовлення, перевищення яких призводить до передчасного вибухонебезпечного їх спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування виробів.

На сьогодні в Україні відсутні методи з визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій та технологічних параметрів зарядів піротехнічних сумішей на основі порошків металевих палих та

фторопластів в умовах зберігання, транспортування та застосування виробів на їх основі загальнопромислового та спеціального військового призначення. Відповідно до цього розроблений автором науково обґрунтований метод може бути обраний за основу при розробці відповідної нормативної бази, а також рекомендацій та методик в Україні у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій, які доповнюють нормативні документи на проектування, виготовлення, зберігання, транспортування, застосування піротехнічних виробів на основі порошків металевих палих та фторопластів.

Результати дисертаційних досліджень Ковбаси Вікторії Олегівни дозволяють загалом підвищити протипожежний захист об'єктів з наявністю піротехнічних виробів на основі порошків металевих палих та фторопластів.

Голова комісії

Козяр Н.М.

Члени комісії:

Яківчук К.В.

Ромашенко С.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Головного управління
ДСНС України у Полтавській області
полковник служби цивільного захисту
Андрій ХИЖНЯК

«25» _____ 20____ р.



АКТ

про практичне використання та впровадження результатів дисертації
КОВБАСИ Вікторії Олегівни

«Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних
металізованих сумішей на основі фторопластів»
представленої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі: начальника управління реагування на надзвичайні ситуації Головного управління ДСНС України у Полтавській області підполковника служби цивільного захисту Литвишка Ігора Ігоровича, начальника управління запобігання надзвичайним ситуаціям Головного управління ДСНС України у Полтавській області полковника служби цивільного захисту Ісаєнка Руслана Олександровича, заступника начальника управління - начальника відділу превентивної діяльності та ринкового нагляду управління цивільного захисту та превентивної діяльності Головного управління ДСНС України у Полтавській області полковника служби цивільного захисту Сердюка Олександра Валерійовича, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи КОВБАСИ Вікторії Олегівни та запропонований нею новий науково обґрунтований метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термовпливів та керованих технологічних параметрів зарядів сумішей на стадії їх виготовлення, перевищення яких призводить до передчасного вибухонебезпечного їх спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування виробів пройшли апробацію у пожежно-рятувальних підрозділах Полтавської області та мають позитивний результат.

При організації наглядово-профілактичної роботи по запобіганню та попередженню виникнення пожежі на території області використано розроблений в дисертаційній роботі Ковбаси В. О. метод у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій. Це є актуальним та може буде використовуватися в діяльності ДСНС України Полтавської області при здійсненні ринкового нагляду та контролю за піротехнічними виробами.



ЛИТВИШКО Ігор Ігорович

ІСАЄНКО Руслан Олександрович

СЕРДЮК Олександр Валерійович

АКТ

**про практичне використання та впровадження
на ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон»
результатів дисертаційної роботи КОВБАСИ Вікторії Олегівни
«Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання
піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів»
поданої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»**

За специфікою виробничої діяльності підприємство ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон» спеціалізується на розробці озброєння та військової техніки, зокрема систем захисту літальних апаратів, систем прицілювання, наведення авіаційних засобів ураження, розробляє та випробовує хибні теплові цілі, термобаричні боеприпаси та вибухові і піротехнічні суміші для них.

У виробках спеціального призначення, зокрема в шашках хибних теплових цілей (flares) і спорядженні термобаричних боеприпасів, та само, як і в запалювальних засобах до них, у твердому ракетному паливі, використовуються піротехнічні металізовані суміші на основі фторопластів. Зазначені компоненти таких речовин мають підвищену безпеку та потребують відповідних умов зберігання та застосування.

Отримані в дисертаційній роботі КОВБАСИ Вікторії Олегівни «Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів» результати досліджень вирішують актуальну науково-прикладну задачу, що полягає у розвитку наукових основ запобігання передчасних пожежонебезпечних займань піротехнічних виробів із зарядами сумішей на основі порошків металевих палих та фторопластів шляхом визначення та встановлення критичних режимів процесів їх нагріву, займання та розвитку горіння. Це складає певну основу для попередження виникнення пожеж у випадку зовнішніх термічних дій, що особливо важливо в період воєнного стану в країні.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи КОВБАСИ Вікторії Олегівни для нашого підприємства полягає у можливості визначення та впровадження в регламенти технологічних процесів ще на етапах розробки особливих вимог до виготовлення металізованих вибухових сумішей та піротехнічних виробів, поводження з ними та при опрацюванні технічної документації щодо їх застосування.

Розроблений у дисертації метод у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій має практичне використання на підприємстві ТОВ «Науково-виробнича фірма «Адрон» і дозволив на стадії виготовлення піротехнічних виробів (зокрема, запалювальних засобів, твердого ракетного палива, термобаричних сумішей, тощо) за рахунок керування технологічними параметрами зарядів сумішей (співвідношення компонентів, дисперсності металевого пального, фторопластів та добавок органічних речовин) збільшити температуру та час затримки їх займання і таким чином знизити ймовірність виникнення пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів у більше ніж 2 рази.

Генеральний директор
ТОВ НВФ «Адрон»
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки



Микола АРХІПОВ

Технічний директор –
Головний конструктор
ТОВ НВФ «Адрон»
кандидат технічних наук, доцент
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки

Сергій ТУРЕНКО

10.11.2025

ЗАТВЕРДЖУЮ:

В.о. директора

ДП «Науково-дослідний інститут» «Квант»


 Тетяна МІЗЕРНА

про практичне використання та впровадження
результатів дисертаційної роботи КОВБАСИ Вікторії Олегівни
«Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних
металізованих сумішей на основі фторопластів»
поданої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Дисертаційна робота Ковбаси В. О. вирішує актуальне науково-практичне завдання, яке полягає у розвитку наукових основ запобігання передчасних пожежонебезпечних займань піротехнічних виробів із зарядами сумішей на основі порошків металевих палих та фторопластів. Таке практичне завдання вирішується за рахунок встановлення критичних режимів процесів нагрівання та займання сумішей, розвитку їх горіння. Це є основою для запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів та запобігання виникнення пожеж у випадку зовнішніх термічних дій.

В результаті проведених досліджень Ковбасою В. О. розроблено метод визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термовпливів та керованих технологічних параметрів зарядів сумішей на стадії їх виготовлення, перевищення яких призводить до передчасного вибухонебезпечного їх спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування виробів.

Також автором роботи розроблено та отримано на експериментально-випробувальному обладнанні нашого підприємства базу даних по впливу різноманітних технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення компонентів, дисперсності металевого пального, фторопластів та добавок органічних речовин) на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски тощо).

Використання результатів дисертації та проведених досліджень дозволило знизити вірогідність пожежонебезпечного руйнування виробів на основі металізованих сумішей на основі фторопластів, (зокрема запалювальних засобів, твердих ракетних палив, боеприпасів), що розробляються нашим підприємством при їх зберіганні та транспортуванні з врахуванням зовнішніх термічних впливів, а також зменшити кількість відмов при випробуваннях певних видів озброєння та боеприпасів.

Використані та впроваджені результати дисертації КОВБАСИ Вікторії Олегівни «Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів» дозволило створити засади щодо подальших перспективних розробок на підприємстві ДП «Науково-дослідний інститут» «Квант».

Головний інженер

Максим ГЛАДКОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор з навчальної роботи
Національного університету цивільного
захисту України

полковник служби цивільного захисту
кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЖУЛАЙ

АКТ

про впровадження в навчальний процес
Національного університету цивільного захисту України
результатів дисертації

КОВБАСИ Вікторії Олегівни

«Запобігання передчасного пожежонебезпечного займання піротехнічних
металізованих сумішей на основі фторопластів»
представленої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 261 «Пожежна безпека»

Комісія у складі: начальника навчально-методичного центру, к. т. н.,
доцента Дядюшенка О.О., начальника навчально-наукового інституту
пожежної та техногенної безпеки, к. т. н., доцента Мельника В.П.,
начальника кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій
навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, к. т. н.,
доцента Березовського А.І.

склала даний акт про те, що результати дисертації Ковбаси В. О.
впроваджено в навчальний процес при здійсненні підготовки фахівців для
ДСНС України за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» на третьому рівні
вищої освіти («доктор філософії») під час вивчення дисципліни «Організація
наукових досліджень» та на другому рівні вищої освіти («магістр») під час
вивчення дисципліни «Техногенна безпека об'єктів»; також при здійсненні
підготовки фахівців для ДСНС України за спеціальністю 263 «Цивільна
безпека» на першому рівні вищої освіти («бакалавр») під час вивчення
дисципліни «Техногенна безпека об'єктів» (Протокол кафедри № 17 від
19.11.2025р.).

У дисертації представлено вирішення актуальної наукової задачі, яка
полягає у розвитку наукових основ запобігання передчасних
пожежонебезпечних займань піротехнічних виробів з зарядами сумішей на
основі порошків металевих палих та фторопластів шляхом встановлення
критичних режимів процесів їх нагріву, займання та розвитку горіння, як

основи для попередження виникнення пожеж у випадку зовнішніх термічних дій.

Результати дисертаційного дослідження Ковбаси В.О. впроваджено у навчальний процес підготовки фахівців цивільного захисту, що сприяло вдосконаленню науково-методичного забезпечення освітніх компонент і практичної підготовки здобувачів вищої освіти. Застосування результатів дисертації забезпечило формування у здобувачів вищої освіти практичних умінь з проведення теоретичних та експериментальних досліджень, розрахунку основних характеристик розвитку і припинення горіння, визначення параметрів систем протипожежного захисту, а також здійснення математичної обробки результатів досліджень. Отримані наукові положення, методики та аналітичні моделі, що використано під час викладання дисциплін, сприяє підвищенню ефективності підготовки персоналу оперативно-рятувальної служби цивільного захисту України, зокрема у контексті дій під час надзвичайних ситуацій та в умовах воєнного стану. Це, у свою чергу, забезпечує науково обґрунтоване удосконалення змісту освіти й практичної підготовки фахівців з пожежної та техногенної безпеки.

Начальник
навчально-методичного центру
кандидат технічних наук, доцент



Олександр ДЯДЮШЕНКО

Начальник навчально-наукового
інституту пожежної та техногенної
безпеки
кандидат технічних наук, доцент



Валентин МЕЛЬНИК

Начальник кафедри
пожежної і техногенної безпеки
об'єктів та технологій
навчально-наукового інституту пожежної
та техногенної безпеки
кандидат технічних наук, доцент



Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ