

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Марич Володимир Михайлович

УДК 614.841.12:539.377

ДИСЕРТАЦІЯ

**Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його
сплавів**

Спеціальність 21.06.02 – «Пожежна безпека»

Галузь знань – 261 «Пожежна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 В. М. Марич

Науковий керівник **Ковалишин Василь Васильович,**
доктор технічних наук, професор

Львів – 2019

АНОТАЦІЯ

Марич В. М. Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека». – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2019.

Зміст анотації

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів шляхом розроблення рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення та розроблення насадки-заспокоювача для подачі вогнегасного порошку шляхом математичного моделювання та проведення полігонних випробувань для визначення оптимальної конструкції.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та важливість вдосконалення технології гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів, сформульовано ідею, мету і визначено завдання досліджень, відображено наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію та публікації основних результатів дослідження.

У **першому розділі** проведено аналіз наукової літератури щодо дослідження гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів і встановлено, що експериментальним і теоретичним дослідженням гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів присвячені роботи багатьох науковців. Ґрунтовану роботу в галузі гасіння пожеж класу D, провели вчені в Західній Європі, США, Канаді. Дослідження з гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів в Україні проводились недостатньо. В даний час порошки спеціального призначення в Україні не виготовляються. В літературі також відсутні наукові публікації щодо рецептур вогнегасного порошку та насадки-заспокоювача для його подачі під час гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів. Також під час огляду

проаналізовано найбільш резонансні пожежі в Україні та світі, спричинені наявністю сплавів магнію. Охарактеризовано запалювальну зброю на основі сплавів магнію та небезпека її для складів з боєприпасами. Наведено галузі застосування сплаву магнію та стрімке зростання їх використання у промисловості. Описано фізико-хімічні властивості магнію, відомі способи гасіння пожеж класу D та їх недоліки.

У другому розділі досліджено вогнегасні порошки та розроблено рецептуру для гасіння пожеж класу D. Проведені лабораторні дослідження вогнегасних сумішей, які складаються з хлориду натрію, меленого шлаку і аеросилу та визначено параметри гасіння. Встановлено оптимальне співвідношення складників вогнегасного порошку, які забезпечують оптимальну величину інтенсивності подавання. Оптимальним є такий склад вогнегасного порошку: хлорид натрію – 73,5 %, мелений шлак – 25 % та аеросил – 1,5 %. Покращено властивості вогнегасного порошку додаванням меленого шлаку та аеросилу, які надають вогнегасному порошку термостійкості, ізолювальної і антизлежувальної здатності, текучості та вогнегасної ефективності. Результати експериментального дослідження впливу основних параметрів процесу гасіння вогнегасним порошком магнію та його сплавів адекватно відображає дослідно-емпірична залежність, виведена на основі теорії планування багатофакторного експерименту.

У третьому розділі проведено математичне моделювання подачі вогнегасного порошку з заспокоювачів різної конструкції.

Під час дослідження вибрано найбільш оптимальну конструкцію та розроблено математичні моделі. З хромограм видно, що швидкість газу в об'ємі корпусу заспокоювача із одностороннім відбивачем є нерівномірною, а його розповсюдження має турбулентний характер. Як показало моделювання насадки-заспокоювача з еліптичним дном, його використання є ефективнішим від сферичного. Не дивлячись на вищі значення швидкості руху газу, максимальне значення швидкості руху частинок твердої фази суміші є на 27 % меншим, ніж у попередньому випадку.

Тиск в корпусі вогнегасного пристрою повинен бути високий для аерації

порошку та транспортування його на далекі відстані, а на виході порошок повинен рухатись направлено і плавно, інтенсивно покриваючи поверхню.

Змодельовано подавання порошку з насадок-заспокоювачів різної конструкції. Встановлено, що траєкторії руху середовища формуються із багатьох зіткнень з поверхнями, що туться об закручений потік газу та поверхню вогнегасника. Як наслідок – значення швидкості частинок на виході із корпусу насадки-заспокоювача лежить в діапазоні 0,3 – 20 м/с, що є в п'ять разів менший ніж у випадку сфери, та в чотири рази менший, ніж у випадку одного еліпса. Запропоновано насадку-заспокоювач для подавання вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D з двома робочими поверхнями – еліптичним верхом та параболічним відбивачем.

Відповідність математичної моделі експериментально перевірена на фізичній моделі, у вигляді заспокоювача для подавання вогнегасного порошку для гасіння пожеж магнію з двома робочими поверхнями – еліптичним верхом та параболічним відбивачем. Потрапляє на об'єкт гасіння більше 0,920 кг порошку при використаних 0,978 кг, що становить понад 90 % вогнегасної речовини, витраченої на гасіння. Заспокоювач з двома робочими поверхнями ефективніший від попереднього заспокоювача з одностороннім відбивачем з однією робочою поверхнею на 30 % за кількістю порошку, який потрапив в зону горіння. Це покращує ефективність гасіння, дозволяє більшим шаром порошку покривати поверхню горіння, не роздмухуючи стружку з поверхні горючого металу. Час гасіння макетного вогнища з 20 с зменшився до 7 с та збільшилась кількість порошку на поверхні гасіння.

Математична модель будується на основі геометричного проектування реального інженерного об'єкта в середовищі SolidWorks з подальшим автоматичним обміном необхідною інформацією і дозволяє проектувати різні насадки-заспокоювачі для гасіння пожеж класу D.

У четвертому розділі запропоновано проект методики для визначення ефективності гасіння пожеж класу D. В Україні відсутня методика з випробування ефективності вогнегасних порошоків спеціального призначення

для гасіння пожеж класу D. Проаналізовані нормативні документи в яких зазначені методики вогнегасних порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D. А саме: методики, викладені в міжнародному стандарті ISO 7165:2017 «Fire fighting – Portable fire extinguishers – Performance and construction» (Пожежогасіння – Переносні вогнегасники – Виконання та будова) та ГОСТ 53280.5-2009 Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества.

Обидві методики мають ряд недоліків, які потрібно усунути при створенні проекту Української методики випробувань вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D, а саме: розміри металевого каркаса з листової сталі зі стороною (500 ± 10) мм, висотою (150 ± 5) мм і товщиною стінок від 2,5 мм до 3,0 мм. для проведення випробувань з використанням магнієвої стружки є малими; не вказана кількість бензину, яка необхідна для займання магнію; газовий чи кисневий факел, який використовується для займання магнію не забезпечує повноцінного горіння по всій площі, а тільки створює окремі осередки займання.

Розроблено проект методики, яка визначає вогнегасну ефективність порошків цільового призначення, які використовуються в Україні. Визначена необхідна кількість палива для загорання магнію та його сплавів. Встановлено, що для загорання магнієвої стружки необхідно використовувати не менше 127 грам бензину марки А 92.

Ключові слова: *гасіння пожежі класу D магнію та його сплавів, насадка-заспокоювач, пожежі легких металів, рецептура вогнегасних порошків спеціального призначення, методика випробування.*

SUMMARY

Marych V. M. Improvement of the efficiency of magnesium and its alloys powder extinguishing. Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 21.06.02 "Fire safety". - Lviv State University of Life Safety of State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2019.

Annotation content

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem - to increase the efficiency of magnesium and its alloys powder extinguishing by developing a formulation of a special purpose extinguishing powder and developing a fixing nozzle for the supply of extinguishing powder by mathematical modeling and field testing to determine the optimal design.

The **introduction** substantiates the relevance of the topic of dissertation work and the importance of improving the technology of extinguishing fires of class D of magnesium and its alloys, formulating the idea, purpose and defined research tasks, reflecting the scientific novelty of the work and the practical significance of the results. Information about testing and publication of the main research results is provided.

In the **first** section, the analysis of scientific literature on the study of class D fire extinguishing of magnesium and its alloys has been carried out and it has been established that the work of many scientists is devoted to experimental and theoretical research of class D fire extinguishing with the presence of magnesium compounds. The groundbreaking work in the field of class D fire extinguishing was conducted by scientists in Western Europe, the USA, Canada. Studies on the class D fire extinguishing of magnesium and its alloys in Ukraine were not enough. Currently, special purpose powders are not manufactured in Ukraine. The literature also does not contain scientific publications on formulations of a fire-extinguishing powder and an auxiliary attachment for its filing during Class D fire extinguishing of magnesium and its alloys. Also, during the survey, the most resonant fires in Ukraine and in the world are analyzed, due to the presence of magnesium alloys. Characterized by the magnesium alloys firing firearm and its danger for ammunition warehouses. Areas of application of magnesium alloy and the rapid growth of their

use in industry are presented. Physical and chemical properties of magnesium are described, known methods of class D fire extinguishing and their disadvantages.

The **second section** explores extinguish powders and develops a formulation for extinguishing class D fires. Laboratory investigations of extinguishing mixtures consisting of sodium chloride, ground slag and aerosol have been carried out and extinguishing parameters have been determined. The optimum ratio of components of an extinguisher powder, which provide the optimal value of the feeding intensity, is established. The composition of the fire-extinguishing powder is as follows: sodium chloride - 73.5%, ground slag - 25% and aerosol - 1.5%. The properties of the fire-extinguishing powder have been improved by the addition of ground slag and aerosol, which give the extinguishing powder a heat-resistant, antistatic and anti-freeze ability, fluidity and extinguishing efficiency. The results of an experimental study of the main parameters influence of the extinguishing process with magnesium and its alloys extinguish powder adequately reflects experimental empirical dependence, derived on the basis of the theory of planning a multifactorial experiment.

In the **third section**, a mathematical modeling of extinguish powder supply with a softener of different design was carried out.

During the study, the most optimal design was chosen and mathematical models were developed. It is evident from the chromograms that the gas velocity in the volume of the housing of a softener with a one-way reflector is uneven, and its propagation has a turbulent character. As the simulator of an attachment-suppressor with an elliptical bottom showed, its use is more efficient than spherical. Despite the higher values of the velocity of the gas, the maximum value of the velocity of the particles of the solid phase of the mixture is 27% less than in the previous case.

The pressure in the shell of the extinguishing device should be high for the aeration of the powder and transport it to long distances, and at the outlet the powder should move direction and smoothly, intensively covering the surface.

The delivery of powder from the attachments-heaters of different design is simulated. It has been established that the trajectories of the motion of the medium are formed from many collisions with the surfaces, rubbing about the twisted flow of

gas and the surface of the extinguisher. As a result, the value of the particle velocity at the outlet of the body of the attachment-heater is in the range of 0.3 - 20 m / s, which is five times less than in the case of the sphere and four times less than in the case of one ellipse. A suppressor-attachment for the extinguishing of class D fire with two working surfaces - an elliptical top and a parabolic reflector.

The correspondence of the mathematical model has been experimentally verified on the physical model, in the form of a softener for the delivery of a fire extinguishing powder to extinguish fires of magnesium with two working surfaces-elliptical top and a parabolic reflector. The powder penetration to the quenching object is more than 0.920 kg when used 0.978 kg, which is more than 90% of the extinguishing agent spent on quenching. A softener with two working surfaces is more efficient than a pre-cooler with a one-way reflector with a single working surface of 30% by the amount of powder that has fallen into the combustion zone. This improves the efficiency of quenching, allowing a larger layer of powder to cover the combustion surface without blowing the shaving from the surface of the combustible metal. The firing time of the model hearth dropped to 7 s from 20 s and increased the amount of powder on the extinction surface.

The mathematical model is based on the geometric design of a real engineering object in the SolidWorks environment, followed by the automatic exchange of the necessary information and allows designing various coolant nozzles to extinguish the class D.

The **fourth section** proposes a methodology for determining the effectiveness of fire suppression of class D. In Ukraine there is no method for testing the effectiveness of fire extinguishers special purpose for class D fires extinguishing. Analyzed regulatory documents which specify the techniques of fire extinguishing powders of special purpose for the suppression of class D fire. Namely: The techniques are described in the international standard ISO 7165: 2017 "Fire fighting - Portable fire extinguishers - Performance and construction" (Fire fighting - Portable fire extinguishers - Execution and construction) and GOST 53280.5-2009 Fire extinguishing systems are automatic. Extinguishing agents.

Both methods have a number of shortcomings that need to be addressed when creating a Ukrainian fire test method for extinguishing fire extinguishing class D, namely:

the dimensions of the metal frame of sheet steel with the side (500 ± 10) mm, height (150 ± 5) mm and the thickness of the walls from 2.5 mm to 3.0 mm. for tests using magnesium chips are small; Not specified quantity of gasoline necessary for the rise of magnesium; A gas or oxygen torch used to dissolve magnesium does not provide complete combustion throughout the area, but only creates separate cells of ignition.

A draft methodology has been developed that determines the fire-extinguishing efficiency of powders used in Ukraine. The required amount of fuel for burning magnesium and its alloys is determined. It is established that for firing magnesium chips it is necessary to use at least 127 grams of gasoline of the mark A 92.

Keywords: *extinguishing a class D fire in the presence of magnesium compounds, attachment-suppressor, light metal fires, formulation of special purpose extinguishing powder, test method.*

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові статті у фахових виданнях

1. Проблеми гасіння магнію та його сплавів / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин та ін. Пожежна безпека. 2016. №28. С. 58–63.
2. Дослідження хімічних речовин, як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Я. Б. Кирилів та ін. Пожежна безпека. 2016. № 29. С. 46–56.
3. Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D1 / В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів та ін. Пожежна безпека. 2018. №32. С. 45–54. doi: 10.32447/20786662.32.2018.07
4. Вплив насадок–заспокоювачів на ефективність гасіння пожеж класів D1 / В. М. Марич, В. В. Ковалишин, О. Л. Мірус та ін. // Вісник. 2018. № 17.

C. 93–101. doi: 10.32447/20784643.17.2018.13

5. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chernetskiy, O. L. Mirus. *Efirst-ern-European Journal of Enterprise Technogies*. 2018. Vol. 5, Issue 5 (95). P. 68–76. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144874

6. Обґрунтування методики випробувань вогнегасних порошків спеціального призначення / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Б. М. Гусар та ін. *Пожежна безпека*. 2018. № 33. С. 53–59. doi: 10.32447/20786662.33.2018.07

Матеріали та тези конференцій

7. Ковалишин В. В., Марич В. М. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 20-21 жовтня 2016 р. Львів, 2016. С. 304–305.

8. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 20-21 жовтня 2016 р. Львів, 2016. С. 316–318.

9. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів. / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Я. Б. Кирилів та ін. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Черкаси, 18-19 травня 2017 р. Черкаси, 2017. С. 59–61.

10. Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію / В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів та ін. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Черкаси, 18-19 травня 2018 р. Черкаси, 2018. С. 54–56.

11. Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, Б. М. Гусар. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і*

перспективи : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 14 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 42–43.

12. Ковалишин В. В., Марич В. М., Бортник М. Я. Вдосконалення конструкції насадки-заспокоювача для підвищення ефективності гасіння пожеж класу D1. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 9-10 жовтня 2018 р. Київ, 2018. С. 213–215.

13. Ковалишин В. В., Марич В. М. Дослідження насадок-заспокоювачів для гасіння пожеж класу D. *Безпека життя і діяльність людини – освіта, наука, практика*: зб. тез доп. міжнар. наук.-метод. конф., м. Рівне, 18-19 квітня 2019 р. Рівне, 2019. С. 115–116.

Патенти

14. Вогнегасний порошок спеціального призначення «КМ-1» / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Б. М. Гусар, Вол. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів: пат. Україна: МКВ А62D 1/00. № а 2018 01936; заявл. 26.02.2018.

15. Заспокоювач для подавання вогнегасного порошку при гасінні пожеж класу D1 / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин, О. Л. Мірус, Б. М. Гусар: пат. Україна: МКВ А62D 1/01. № а 20180 03705; заявл. 06.04.2018.

PUBLICATIONS LIST OF THE POSTGRADUATE

Scientific articles in professional editions

1. The problems of magnesium and its alloys extinguishing / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Vol. V. Kovalyshyn and other. *Fire Safety*. 2016. No 28. P. 58–63.

2. Research of the chemicals usable in fire extinguishing powder for light metal fires extinguish / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Ya. B. Kyryliv and other. *Fire Safety*. 2016. No 29. P. 46–56.

3. Optimization of the dry chemical powders' composition for class D1 fires extinguishing / V. M. Marych, V. V. Kovalyshyn, Ya. B. Kyryliv and other. *Fire Safety*. 2018. No 32. P. 45–54. doi: 10.32447/20786662.32.2018.07

4. Efficiency of using spraying nozzle with stabilizer during extinguishing class D1 fires/ V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, O. L. Mirus and other. Bulletin. 2018. No 17. P. 93–101. doi: 10.32447/20784643.17.2018.13

5. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chernetskiy, O. L. Mirus. Efst-ern-European Journal of Enterprise Technogies. 2018. Vol. 5, Issue 5 (95). P. 68–76. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144874

6. Justification of the test method for fire extinguishers of special purpose / V. M. Marych, V. V. Kovalyshyn, B. M. Gusar and other. Fire Safety. 2018. No 33. P. 53–59. doi: 10.32447/20786662.33.2018.07

Materials and theses of conferences

7. Kovalyshyn V. V., Marych V. M. Problems of quenching of magnesium and its alloys. Fire and technogenic safety. Theory, practice, innovations: Sb. thesis add international sci. pract. Conf., Lviv, October 20-21, 2016 Lviv, 2016. P. 304-305.

8. Marych V. M., Revutsky A. V, Guk R. I. Providing security in industries where magnesium and its alloys are used. Fire and technogenic safety. Theory, practice, innovations: Sb. thesis add international sci. pract. Conf., Lviv, October 20-21, 2016 Lviv, 2016. P. 316–318.

9. Investigation of chemicals as components of extinguishing powders for extinguishing magnesium and its alloys. / V. M. Kovalyshyn, V. M. Marych, Ya. B. Kirilov and others. Theory and practice of extinguishing fires and eliminating emergencies: Sb. thesis add international sci. pract. Conf., Cherkasy, May 18-19, 2017 Cherkasy, 2017. P. 59–61.

10. Optimization of the composition of extinguishing powders for extinguishing magnesium / V. M. Marych, V. V. Kovalyshyn, Ya. B. Kirilov and others. Theory and practice of extinguishing fires and eliminating emergencies: Sb. thesis add international sci. pract. Conf., Cherkasy, May 18-19, 2018 Cherkasy, 2018. P. 54–56.

11. Use of environmentally acceptable extinguishing agents / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, T. M. Voitovich, B. M. Gusar. Ecological security as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives: Sb. thesis add international sci. pract. Conf., Lviv, September 14, 2018 Lviv, 2018. S. 42–43.

12. Kovalyshyn V. V., Marych V. M., Bortnik M. Ya. Improvement of the design of the attachment-suppressor to improve the efficiency of fire suppression of class D1. Modern state of civil defense of Ukraine and prospects of development: theses of additional. allukr sci. pract. Conf., Kyiv, October 9-10, 2018 Kyiv, 2018. p. 213–215.

13. Kovalyshyn V. V., Marych V. M. Investigation of coolant nozzles for extinguishing fires of class D. Safety of life and human activity - education, science, practice: Sb. thesis add international sci. method. Conf., Rivne, April 18-19, 2019 Rivne, 2019. P. 115–116.

Patents

14. Fire-extinguishing powder of special purpose "KM-1" / V. V. Kovalishin, V. M. Marych, B. M. Gusar, Vol. V. Kovalyshyn, Ya. B. Kirilov: Pat. Ukraine: MKV A62D 1/00. No. a 2018 01936; stated. Feb 26, 2018

15. A vehicle for extinguishing extinguishing powder when extinguishing a class D1 / V class fire. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Vol. V. Kovalyshyn, O. L. Mirus, B. M. Gusar: Pat. Ukraine: MKV A62D 1/01. No. 20180 03705; stated. April 6, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ D ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	23
1.1. Аналіз пожеж магнію та його сплавів	27
1.1.1. Характеристика запалювальної зброї на основі сплавів магнію.....	32
1.2. Галузь застосування магнію.....	35
1.3. Фізико-хімічні властивості магнію.....	39
1.4. Основні напрямки захисту від пожеж і вибухів при роботі з магнієвими сплавами.....	42
1.5. Ідея роботи, мета і задачі досліджень.....	45
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РЕЦЕПТУРИ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ D.....	47
2.1. Гасіння пожежі магнію та його сплавів в лабораторних умовах.....	47
2.2. Вибір методів і факторів математичного планування експериментів.....	51
2.3. Обґрунтування проведених досліджень.....	54
2.4. Планування та оброблення результатів факторного експерименту.....	58
2.5. Дослідно-емпіричні залежності для визначення інтенсивності гасіння пожеж класу D.....	60
2.6. Характеристика вогнегасного порошку спеціального призначення КМ-1..	62
2.7. Висновки за розділом.....	66
РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ НАСАДКИ-ЗАСПОКОЮВАЧА ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ D.....	67
3.1. Методика проведення експериментів при розробці насадки- заспокоювача.....	67
3.2. Планування експерименту для визначення оптимальної конструкції насадки-заспокоювача.....	77
3.3. Дослідження насадок-заспокоювачів для гасіння пожеж класу D.....	90
3.4. Моделювання процесів, які відбуваються у двосторонніх насадках-	

	15
заспокоювачах та визначення оптимальної конструкції.....	100
3.5. Експериментальна перевірка адекватності змодельованих процесів в насадках-заспокоювачах.....	103
3.6. Висновки за розділом.....	108
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ВОГНЕГАСНИМИ ПОРОШКАМИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБЛЕНИХ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ.....	110
4.1. Дослідження недоліків існуючих методик з визначенням ефективності гасіння пожеж класу D.....	110
4.2. Дослідження з визначення кількості пального для підпалу магнієвої стружки.....	111
4.3. Проект методики випробування вогнегасних порошків спеціального призначення.....	112
4.4. Економічна ефективність запропонованих вогнегасних порошків.....	121
4.5. Висновки за розділом.....	123
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТКИ.....	138
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	139
Додаток Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	142
Додаток В Технічні умови вогнегасного порошку спеціального призначення «КМ-1».....	149

ВСТУП

Актуальність теми.

Використання магнію та його сплавів є практичним та ефективним у промисловості як в Україні, так і за її межами. Магній застосовують у вигляді металевих пластин при захисті від корозії морських суден і трубопроводів. У металургії магній використовують як «розкислювач» – речовина, що зв'язує шкідливі домішки в розплаві заліза. Додаток 0,5% магнію до чавуну значно підвищує гнучкість чавуну і його опір на розрив. Магній та його сплави часто використовують в апаратах космічної та авіаційної техніки, автомобілебудуванні, різних агрегатах і відповідальних приладах [9, 99].

Магній та його сплави останнім часом часто використовують у військовій галузі при виготовленні запалювальних гранат. Їхнє застосування зросло за останні роки на сході нашої держави, де їх використовують для підпалу складів з боєприпасами, що ускладнює гасіння пожежі через те, що магній розбризкується на великі площі або по всьому приміщенні і, тим самим, збільшується площа загоряння, швидко займаються запалюються дерев'яні ящики з боєприпасами і ускладнюється процес гасіння. Тому виникає необхідність у застосуванні ефективних методів та способів гасіння такого класу пожеж [9].

Як правило, чистих пожеж класу D не буває. Можуть виникати спочатку пожежі ЛЗР або твердих горючих матеріалів, а потім пожежі легких металів, які потребують комбінованих способів гасіння, при цьому треба враховувати високу температуру горіння магнію. При подаванні вогнегасної речовини під високим тиском магній та його сплави розбризкуються та збільшують площу горіння.

Отже, необхідно розробити рецептуру вогнегасного порошку та вдосконалити насадки-заспокоювачі для його подавання, зважаючи на особливості горіння магнію.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась відповідно до плану науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, за напрямком

«Розроблення, дослідження, випробування та впровадження систем виявлення та гасіння пожеж, вогнегасних речовин, методів та пристроїв їх подачі» під час виконання науково-дослідної роботи за темою «Вдосконалення технології гасіння пожеж різних класів (D1 та A) за наявності сполук магнію» (номер державної реєстрації 0117U005254), у якій здобувач був відповідальним виконавцем.

Ідея роботи полягає у забезпеченні ефективного гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів шляхом створення нових рецептур вогнегасного порошку із застосуванням вітчизняної сировинної бази та технічних засобів його подавання.

Мета роботи. Метою роботи є розкриття особливостей впливу виду, співвідношення компонентів, а також засобів подавання вогнегасного порошку спеціального призначення на ефективність процесів припинення горіння магнію та його сплавів.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання досліджень:

– провести аналіз сучасного стану розроблення і застосування вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D і виявити шляхи підвищення ефективності пожежогасіння магнію та його сплавів;

– розробити методики та провести дослідження з виявлення впливу і співвідношень компонентів вогнегасного порошку спеціального призначення для гасіння пожеж класу D із вітчизняної сировини на показники його якості;

– удосконалити математичну модель SolidWorks та з її застосуванням змодельовати процеси формування струменів вогнегасного порошку насадкою-заспокоювачем порошкового вогнегасника спеціального призначення;

– обґрунтувати параметри, розробити схемні рішення, розробити та виготовити насадку-заспокоювач порошкового вогнегасника спеціального призначення, а також провести його випробування;

– розробити методику визначення ефективності вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D у разі гасіння модельних вогнищ з наявністю магнію та його сплавів;

– провести дослідження з визначення вогнегасної ефективності розробленого вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D та технічного засобу його застосування в полігонних умовах, а також розробити проекти технічних документів на їх виготовлення та використання для припинення горіння магнію та його сплавів на початковій стадії пожежі.

Об’єкт досліджень – процеси припинення горіння магнію та його сплавів.

Предмет досліджень – вплив виду та співвідношення компонентів вогнегасного порошку спеціального призначення, а також параметрів технічного засобу його подавання на ефективність процесів припинення горіння магнію та його сплавів.

Методи дослідження. В роботі було використано комплексний метод дослідження, який включає аналіз і узагальнення науково–технічних досягнень за напрямом гасіння пожеж класу D, метод вогневих лабораторних та полігонних випробувань, комп’ютерне моделювання для дослідження насадок-заспокоювачів із використанням програмного продукту COSMOSFloWorks, методи планування експерименту, методи математичної статистики.

Для проведення експериментальних досліджень використовували метрологічно атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Результати теоретичних досліджень порівнювались із результатами експериментів, які проводились в лабораторії та в полігонних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розкритті особливостей впливу та співвідношень компонентів вогнегасного порошку спеціального призначення, а також параметрів технічного засобу його подавання, на ефективність припинення горіння магнію та його сплавів. При цьому:

уперше:

– науково обґрунтовано і розроблено нову рецептуру та технічні вимоги вогнегасного порошку спеціального призначення з вмістом хлориду натрію (до

73,5%, мас.), шлаку металургійного виробництва (до 25%, мас.) та гідрофобного аеросилу (до 1,5%, мас.).

– із застосуванням програмного продукту COSMOSFloWorks змодельовано процес руху та траєкторії твердих частинок запропонованого вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D і науково обґрунтовано параметри насадки-заспокоювача порошкового вогнегасника, придатного для припинення горіння магнію та його сплавів на початковій стадії виникнення пожежі класу D;

набула подальшого розвитку методика з визначення ефективності гасіння пожеж класу D (гасіння магнію, алюмінію та їх сплавів) вогнегасними порошками спеціального призначення;

удосконалено технічний засіб пожежогасіння, застосування якого підвищує ефективність гасіння пожеж класу D, зокрема, магнію та його сплавів, завдяки оптимізації насадки-заспокоювача порошкового вогнегасника, спорядженого розробленим вогнегасним порошком для гасіння пожеж класу D на основі вітчизняної сировинної бази.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено конструкцію насадки-заспокоювача для подавання вогнегасного порошку та виготовлено її експериментальний взірець. Розроблено рецептуру вогнегасного порошку спеціального призначення, що дасть змогу виготовляти в Україні вогнегасні засоби для гасіння пожеж класу D.

Дослідний зразок вогнегасника, заповненого вогнегасним порошком спеціального призначення та оснащеного розробленою насадкою-заспокоювачем, застосовується пожежно-рятувальними підрозділами ОРС ЦЗ ДСНС України у Львівській області та отримав схвальні відгуки. Запропонований проект методики може доповнювати нормативні документи та дасть змогу в Україні випускати якісні вогнегасні порошки спеціального призначення. Результати досліджень використовуються у навчальному процесі ЛДУБЖД при викладанні дисциплін «Пожежна тактика», «Тактика пожежогасіння та рятувальних робіт», «Пожежна техніка» та «Охорона праці в галузі»; на ТзОВ НВП «Вогнеборець» при

розробці та виготовленні насадки-заспокоювача, вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D, для гасіння магнію та його сплавів; поданий на розгляд проект «Методики з визначення ефективності гасіння пожеж класу D (гасіння магнію, алюмінію та їх сплавів) вогнегасними порошками спеціального призначення» у Державному центрі сертифікації ДСНС України.

Подано 2 патенти України на винахід: «Вогнегасний порошок спеціального призначення «KM-1»; «Заспокоювач для подавання вогнегасного порошку при гасінні пожеж класу D1».

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному аналізі літературних джерел, формулюванні мети і завдань досліджень, обґрунтуванні методології та виборі методик, у плануванні і безпосередньому проведенні лабораторних випробувань з узагальненням одержаних результатів. Особистий внесок у наукових працях, опублікованих за співавторства, відображено в авторефераті та анотації дисертації, зокрема:

[1, 7, 8] визначив проблему дослідження, проаналізував існуючі методи і способи гасіння магнію та його сплавів, сформулював задачі для їх вдосконалення та запропонував основні заходи безпеки на виробництвах, де використовується магній та його сплави;

[2, 9] дослідив вогнегасні речовини та методи гасіння пожеж легких металів на прикладі магнію та його сплавів і розробив на їх основі вогнегасні речовини та методи їх подавання;

[3, 10, 14] дослідив складники вогнегасних порошоків на основі хлориду натрію з добавкою меленого шлаку та аеросилу і встановив оптимальний склад вогнегасної суміші у відсотковому відношенні для гасіння пожеж легких металів на прикладі магнію та його сплавів;

[4] дослідив засоби подачі вогнегасного порошку для гасіння сплавів магнію та розробив оптимальну конструкцію насадки-заспокоювача;

[5, 13, 15] вдосконалив конструкцію насадки-заспокоювача в такий спосіб, що дає змогу збільшити кількість потрапляння порошку на об'єкт гасіння;

[6, 12] розробив проект методики випробувань вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D в Україні.

[11] сформулював висновки з використання екологічно прийнятних вогнегасних порошоків

Співавтори вказаних робіт за даними дослідженнями дисертації не захищали. Всі основні результати дисертаційного дослідження отримані автором самостійно. Керівник роботи і здобувач спільно зробили постановки задач і загальні висновки.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 7 всеукраїнських та міжнародних науково–практичних та науково–технічних конференціях, зокрема:

– Міжнародній науково–практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» – (Львів, 2016 р.);

– VIII Міжнародній науково–практичній конференції. «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – (Черкаси, 2017 р.);

– III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» – (Львів, 2018 р.);

– IX Міжнародній науково–практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – (Черкаси, 2018 р.).

– 20 Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» – (Київ, 2018 р.).

– XVII Міжнародній науково–методичній конференції «Безпека життя і діяльність людини – освіта, наука, практика» – (Рівне, 2019 р.).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані у 13 наукових працях, із них 6 – у фахових наукових виданнях (з них одна входить в базу Scopus), 7 – у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з титульного аркуша, анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел із 117 найменувань на 12

сторінках, та 3 додатків на 22 сторінках. Основна частина дисертації займає 125 сторінок та містить 32 рисунки і 28 таблиць. Загальний обсяг роботи – 159 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ D ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для гасіння легких металів потрібно застосовувати відповідні вогнегасні речовини та засоби їх подачі. При гасінні легких металів необхідно подавати порошок при мінімальній швидкості руху його частинок на горючу поверхню так, щоб він покривав поверхню і не роздмухував вогонь. Багато науковців досліджували вогнегасні речовини для гасіння пожеж класу D. Результати досліджень з гасіння вогнегасними порошками спеціального призначення та відображені у [18, 31, 32, 59, 83, 90-92]. В усіх випадках дослідники прийшли до висновку, що до складу спеціальних порошоків повинні входити NaCl, KCl. Наповнювачами виступають мелений пісок, шлак, зола, сполуки меламіну, графіт, каолінова глина.

В роботі [15] пропонується гасити магній аргоном. Це себе виправдовує тільки в закритих об'ємах. Гасіння аргоном та аерозолями є об'ємним способом гасіння, що погано працює при поверхневому гасінні [15, 21]. Горіння сповільнюється, але не зупиняється повністю.

В [19, 33] використані насадки у вигляді сопла або прямої насадки, що не дозволяє додатково знизити швидкість руху порошку. Запропоновані вогнегасні речовини у практиці гасіння легких металів показали себе малоефективними, оскільки виникає ще проблема подавання вогнегасної речовини в певному напрямку.

Там, де використовувались насадки у вигляді сопла при гасінні методом ізоляції, не вдається накрити поверхню, а ще й розпорошується стружка, роздмухується вогонь. Тому потрібно порошок плавно посипати на поверхню горіння під тиском не більше 0,01 МПа. У відомій методиці [13, 17] подача порошку здійснюється за допомогою Г-подібної насадки, відбивання порошку відбувається від дна напівциліндра. У заспокоювачі використовується одна

параболічна поверхня, яка дає змогу знизити швидкість руху частинок порошку та забезпечує розсіювання його по поверхні. У варіанті [17, 34] присутній боковий трубопровід, на якому порошок частково осідає.

Канадські пожежники [35] використовують прямі насадки, які всередині мають подрібнювач струменя. Порошок виходить через багато сопел, збільшується опір чим понижується швидкість руху порошку на виході. Кількість порошку, яка потрапляє в зону горіння, становить 65–67 %, але цього недостатньо.

В роботі [13] використовують і описують відбивачі односторонні та еліптичні, які дають процент потрапляння порошку на поверхню до 60 % (рис. 1.1).

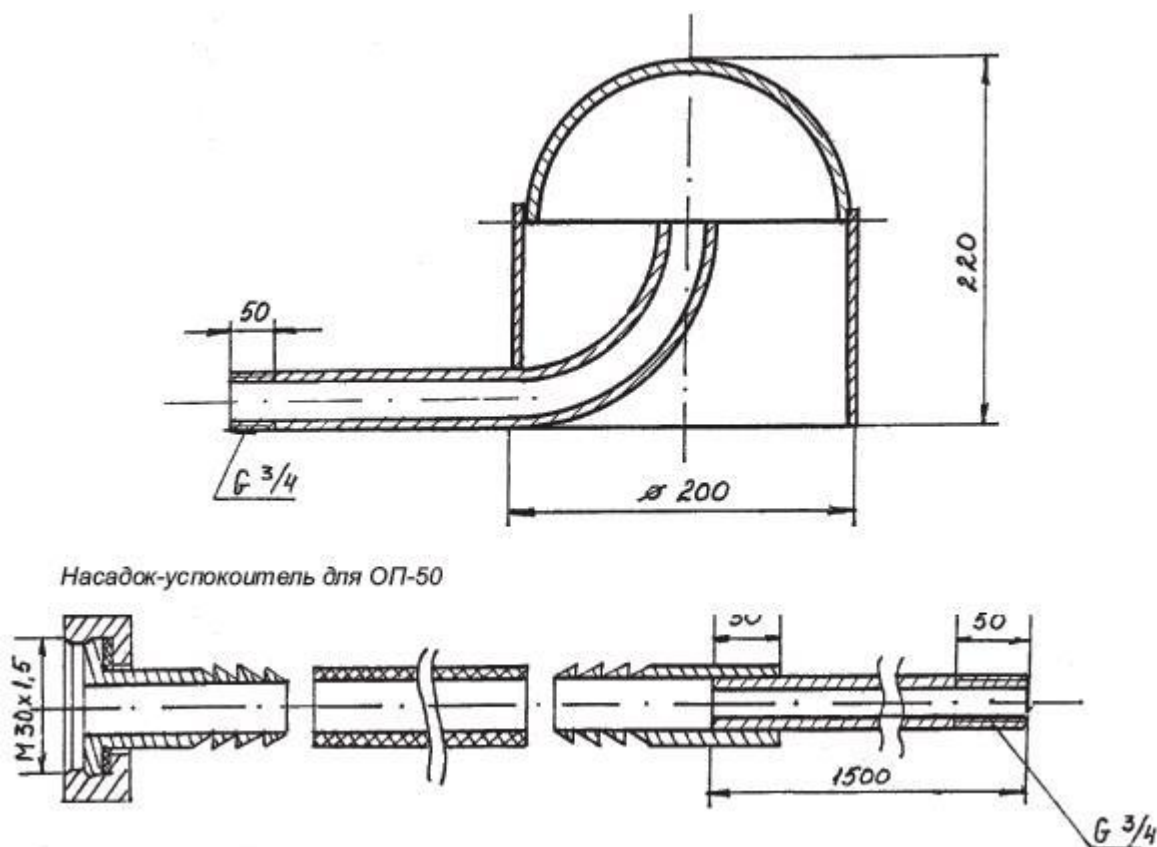


Рисунок 1.1 – Схема ствола і насадка-заспокоювача

В Німеччині використовують односторонні [36, 37] насадки з шлангами великих діаметрів від вогнегасника до насадки (рис. 1.2), які забезпечують інтенсивність гасіння при меншому тиску в корпусі вогнегасного пристрою завдяки збільшенню діаметра шлангу та корпусу вогнегасника, тим самим

зменшують тиск на виході порошку до 0,01–0,015 МПа. Як недолік, слід зазначити погану маневреність дій оператора, пов'язану саме з діаметром шлангів та малою їх довжиною, та великий залишок порошку в шлангах.



Рисунок 1.2 – Вогнегасник з односторонньою насадкою

Гасіння магнію [38] вогнегасним порошком на основі графіту та з використанням насадки-заспокоювача з одностороннім відбивачем та подовженим корпусом забезпечує потрапляння 50–70 % порошку на поверхню, що не задовольняє вимоги сучасного пожежогасіння – втрати вогнегасного порошку повинні бути не більше 15 % (10 % – допустимий залишок в корпусі [ДСТУ3675-98], до 5 % – залишок в трубопроводах, похибки в вимірюваннях, досвід оператора гасіння).

В роботі [35] збільшили довжину корпусу відбивача і при цьому ж тиску досягнули результату 65–70 % потрапляння порошку на об'єкт гасіння (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Вогнегасник для гасіння магнію канадського виробництва

Дослідженню процесів припинення горіння пожеж класу D та розробці відповідних вогнегасних речовин присвячені роботи Баратова А. М., Вайсмана М. Н., Габріеляна С. Г., Антонова А. В., Тропінова О. Г., Апановича В. М., Ковалишина В. В., Демиденка О. Г., Білошицького М. В., Мошковського М. С., Копильного М. І., Nelson, R., Kang et al H., Schmalfuß H., Schlüsslmayr Ch., Wilson C., Tapscott R., Zallen D., Plugge M., James E. в галузі гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів виконані в Західній Європі, США, Канаді. Дослідження з гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів в Україні проводились недостатньо, в даний час порошки спеціального призначення не випускаються. В літературі також відсутні наукові публікації щодо рецептур вогнегасного порошку та виготовлення насадки-заспокоювача для його подачі під час гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів.

Пожежі та вибухи, які виникли з причин загоряння магнію та його сплавів, є актуальною проблемою, яку потрібно вирішувати, розробляти ефективні способи та засоби гасіння пожеж таких класів з врахуванням їх особливостей. Аналіз наявних на сьогодні літературних даних показує, що не існує

ефективних способів та устаткування, які б дозволили гасити пожежі класу D швидко, з малими втратами.

Основний недолік наявного устаткування – мала кількість потрапляння порошку на поверхню горючого металу, без роздмухування вогню та металеві стружки. Причиною цього є висока швидкість руху порошку. Тиск в корпусі вогнегасного пристрою повинен бути високий для аерації порошку та транспортування його на далекі відстані, а на виході порошок повинен рухатись направлено і спрямовано, інтенсивно покриваючи поверхню.

У попередніх дослідженнях для зниження швидкості руху вогнегасного порошку не розглядались двосторонні заспокоювачі та рух складових двофазового середовища: газ-порошок. Не використовувався програмний продукт, який призначений для розв'язування прикладних задач в області аерогідродинаміки шляхом моделювання відповідних процесів – тертя частинки з твердою поверхнею; неідеальне відбивання частинок від твердої поверхні; зіткнення частинок між собою та тертя з турбулентними потоками газу.

1.1. Аналіз пожеж магнію та його сплавів

Проаналізуємо найбільш резонансні пожежі в Україні та світі, що спричинені наявністю сплавів магнію.

2 жовтня 2015 року понад 20 пожежників гасили 47 тонн палаючого магнію на заводі PolMag в Республіці Польща (рис. 1.4). На першому етапі розплавлений магнієвий сплав, намагалися загасити, але безуспішно. Використовували вогнегасний порошок, але вогонь настільки інтенсивний, що його неможливо було погасити. Не вистачало необхідних засобів подачі вогнегасних речовин [1].



Рисунок 1.4 – Приклад пожежі на заводі PolMag в Республіці Польща

Пожежа магнію завдала збитків на мільйони євро у місті Зоненберг (Німеччина) 2010 році [2]. Горіло 30 тонн магнію. До локалізації і ліквідації пожежі приступили не вчасно, не було ефективних засобів первинного пожежогасіння.

В жовтні 2006 року виникла пожежа магнієвої стружки в контейнері для збору металевих відходів на колишній території Львівського автобусного заводу. Причина пожежі — займання контейнера з магнієвою стружкою. Під час пожежі ніхто не постраждав, але небезпека для здоров'я львів'ян таки була, оскільки контейнер розташований неподалік від тролейбусної зупинки. Гасіння пожежі тривало кілька годин, оскільки магній не можна гасити водою, а ті засоби, що були, не дали змоги зробити це швидко. Працівники ДСНС змушені були гасити магнієву стружку повітряно-механічною піною та іншими, на їх погляд, безпечними засобами [3].

В Криму 17 жовтня 2009 року сталася пожежа на станції зі зберігання отрутохімікатів «Отрадное», Джанкойського р-ну. В результаті пожежі згоріло близько 160 тонн отрутохімікатів. Площа пожежі становила близько 600 квадратних метрів. З 60-70 років минулого століття на цій станції зберігалися

лежать пестициди, у складі яких був магній. За однією з версій, саме він став причиною самозагорання отрутохімікатів [4].

В квітні 2010 року на заводі "Київприлад", що на вулиці Гарматній, 2, в Солом'янському районі столиці, стався потужний вибух магнію. Причина вибуху – іскра від газозварювального апарата, яка потрапила в ємність з магнієм і спричинила вибух, унаслідок якого двоє чоловіків загинули на місці. Від високої температури поплавилися металеві конструкції підіймача, а від ударної хвилі повилітали шибки в цеху з першого по четвертий поверх [5, 8].

2 квітня 2009 року, близько 17 години на ВАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» за добу сталося дві пожежі. Після прибуття першого підрозділу виявлено, що відбувається горіння гранульованого магнію на відкритому майданчику, площа горіння – 20 м². Близько 17:44 пожежники локалізували загоряння, а о 18:05 ліквідували відкрите горіння. Всього для гасіння пожежі залучалося 60 чоловік, 18 одиниць техніки, від ДСНС 47 чоловік, 11 одиниць техніки. Через кілька годин, близько 2:58 3 квітня на «ММК» знову сталася пожежа. Горіння відбувалося на відкритому майданчику для зберігання гранульованого магнію киснево-конверторного цеху. В результаті пожежі знищено шість тонн гранульованого магнію. Від ДСНС задіяні 11 одиниць техніки і 47 чоловік [7].

30 березня 1988 року в Чикаго вибухнув причіп, який змусив 200 людей евакуювати з двох різних заводів. Причіп був на 91% наповнений чистим магнієм. Температура горіння сягала 2030 °С, алюмінієво-сталевий причіп повністю розплавився. Пожежники на місці події не могли погасити вогонь адже не мали спеціальних вогнегасних порошків, тому чекали коли вигорить весь магній. Але для того щоб пожежа не розповсюджувалася на будівлі та споруди поблизу горіння пожежники охолоджували їх [84].

У 2011 році до пожежного відділення на узбережжі Північної Кароліни надійшло повідомлення, що горить автомобіль (рис. 1.5). Після прибуття пожежників на місце пожежі було встановлено, що горить двигун автомобіля. Коли пожежники подали воду, то автомобіль вибухнув. Причиною вибуху

стало те, що деякі деталі двигуна та кузова передньої частини автомобіля виготовлені з сплаву магнію, тому після реакції палаючого магнію з водою відбувся вибух. Один пожежник був доправлений до лікарні з опіками від горіння магнію.



Рисунок 1.5 – Вибух під час горіння автомобіля на узбережжі Північної Кароліни

Подібні інциденти, пов'язані з горінням магнію траплялися по всій країні. Департаменти повинні були змінити тактику роботи з подібними випадками, щоб зберегти своїх пожежників. Магній, як правило, використовується лише в старих двигунах Volkswagen і Ford F150. Протягом наступних 10 років компанії з виробництва автомобілів таких марок, як BMW, Ford, Mercedes, GMC, Ауді, Ягуар та інші будуть додавати магній до інших деталей автомобіля. В сучасному суспільстві магній можна знайти у всіх транспортних засобах, побутовій та сільськогосподарській техніці [84].

10 червня 2018 року в німецькому місті Ландсхут в Баварії горів завод автоконцерну BMW. Згідно з повідомленням, горіли продукти з вмістом магнію. За версією поліції, через високий тиск перегрілася ливарна машина. Двоє працівників, та один пожежник були госпіталізовані. Товсті хмари диму

можна було побачити здалеку над заводом BMW опівдні. Через сильний дим населенню рекомендували закрити вікна та двері. Пожежа також вплинула на залізничний рух. Ділянка між Вьор-ан-дер-Ізаром і Ландсхутом була закрита близько години. За оцінками експертів BMW, збиток оцінюється приблизно в два мільйони євро [114, 115].

2 вересня 2017 року в Іспанії десятки тисяч жителів автономного співтовариства Мадрид отримали попередження не залишати свої будинки через поширення хмари токсичного диму. Причиною цього стало загоряння на виробничому складі, де горіло 40 тонн магнію і алюмінію (рис. 1.6), в муніципалітеті Фуенлабрада. В результаті цієї пожежі постраждала одна людина [116].



Рисунок 1.6 – Горіння магнію і алюмінію на виробничому складі в Іспанії

Небезпечними є також пожежі та вибухи на футбольних стадіонах. Один із випадків стався під час Європейського чемпіонату 2016 році гри Італії та Хорватії (рис. 1.7). У ході гри між уболівальниками розпочалися сутички, з використанням запальних пристроїв в яких наявна стружка магнію. Як наслідок цього сталася пожежа з великою кількістю потерпілих. Гра була зупинена.



Рисунок 1.7 – Запалювальні пристрої на футбольному стадіоні [40]

Подібні пожежі, спричинені горінням та вибухом магнію і його сплавів частіше трапляються у процесі їх обробки та утилізації відходів [41-45].

Магній та його сплави останнім часом часто використовують у військовій галузі при виготовленні запалювальних гранат. Їх застосування зросло за останні роки на сході нашої держави, де їх використовують для підпалу складів з боеприпасами, що ускладнює гасіння пожежі через те, що магній розбризкується на великі площі або по всьому приміщенні і, тим самим, збільшується площа загоряння, швидко займаються дерев'яні ящики з боеприпасами і ускладнюється процес гасіння.

1.1.1. Характеристика запалювальної зброї на основі сплавів магнію

Найбільш поширеними запалювальними речовинами на основі нафтопродуктів є напалми. Їх одержують шляхом добавки до рідкого пального, частіше всього бензину, спеціальних загусників. Напалми мають здатність легко займатись і розвивати температуру до 1200°C. Вони прилипають до

поверхонь різних об'єктів, горять при доступі кисню і важко піддаються гасінню. Час горіння окремих згустків досягає 5 хв. У разі змішування напалму з лужними та лужно-земельними металами (наприклад, натрієм, магнієм) або фосфором утворюється "супернапалм", який особливо активно самозаймається на вологій поверхні й на снігу (тобто особливо ефективний в умовах підвищеної вологості та опадів). Пірогелі одержують шляхом додавання до напалму у вигляді порошку або стружки натрію, магнію, фосфору, а також алюмінію, вугілля, асфальту, селітри та інших речовин. Температура горіння пірогелів досягає 1600°C. За своїми бойовим властивостями переважають напалми. На відміну від звичайних напалмів пірогелі важчі за воду, горіння їх триває лише до 5 хв. Термітні суміші представляють собою порошкоподібну спресовану суміш, частіше всього алюмінію і окислів заліза. Коли терміт горить, температура піднімається до 3500 °С. Характерно, що він горить без доступу кисню та не утворює відкритого полум'я. Термітні брикети за кольором та структурою схожі на сірий чавун. Вони можуть пропалювати металеві частини озброєння та військової техніки і виводити їх із ладу. Вказані термітні суміші використовуються в авіаційних запалювальних бомбах.

Білий фосфор представляє собою напівпрозору тверду речовину, яка схожа на віск. Він здатний самозайматися, з'єднуючись з киснем повітря. Горить яскравим полум'ям з густим виділенням білого диму. Температура спалаху порошкоподібного фосфору – 34°C, температура полум'я – 900-1200°C. Білий фосфор використовують як запал напалму і пірогелю в запалювальних боєприпасах [98].

Пластифікований фосфор (з добавками каучуку) набуває здатності прилипати до вертикальних поверхонь і пропалювати їх. Це дає змогу використовувати його для спорядження бомб, мін, снарядів.

Електрон – сплав магнію (до 90%), алюмінію (до 9%) та інших елементів (1%). Займається при температурі 600°C і горить сліпучим білим або голубуватим полум'ям, розвиваючи температуру до 2800°C. Використовується для виготовлення корпусів авіаційних запалювальних бомб.

Самозаймиста запалювальна суміш складається з поліізобутилену і триетиленалюмінію (рідке пальне). Термобаричні рецептури створені на підставі металізованих вогнесумішей з підвищеними властивостями ураження. Їх особливість полягає в тому, що спочатку їх розпилюють у певному об'ємі, а потім підпалюють. Уражувальна дія полягає у миттєвому підвищенні температури та тиску у місці застосування [111-113].

За своєю дією термобаричні боєприпаси схожі на боєприпаси об'ємного вибуху та вакуумні заряди, а відрізняються тим, що розпилена суміш не миттєво детонує, а миттєво згорає. До засобів бойового застосування речовин відносять: авіаційні напалмові і запалювальні бомби, запалювальні касети і касетні установки; артилерійські запалювальні боєприпаси; вогнемети, реактивні запалювальні гранатомети; пристрілювально-запалювальні і бронебійно-запалювальні кулі; гвинтівкові запалювальні гранати; термітні шашки, кулі і пакети; запалювально-димові патрони; вогневі (запалювальні) фугаси.



Рисунок 1.8 – Запалювальні пристрої для підпалювання складів з боєприпасами

Масштабні пожежі з вибухами на складах боєприпасів, де наявні магнієві сплави, лише підтверджують актуальність проблеми: Артемівськ Донецька область 2003 рік; Новобогданівка Запорізька область 2004, 2005, 2006 та 2007

роки; Лозова Харківська область 2008 рік; Сватове Луганська область 2015 рік; Балаклія Харківська та Калинівка Вінницька області 2017 рік. І остання пожежа на складах боєприпасів на Чернігівщині. 9 жовтня 2018 року о 03:40 у ДСНС надійшла інформація про те, що на території військового 6-го арсеналу Міноборони біля Дружби і Августовки Ічнянського району на Чернігівщині виникла пожежа з подальшою детонацією боєприпасів. З 16-кілометрової зони можливого ураження (Ічня та 30 прилеглих сіл) евакуювали понад 12,5 тисячі осіб. У медичних установах в Ічні перебувала 91 особа, зокрема 1 дитина [47].

17 лютого 2016 близько 20:20 почалися вибухи на території складів у Запорізькій області. Невідомі особи за допомогою безпілотних літальних апаратів скинули запалювальні предмети на територію об'єкта. В результаті їх вибуху виникли осередки загоряння, які складно було загасити в зв'язку з наявністю сплавів магнію, окремі частинки яких потрапляли під дерев'яні ящики, де зберігались боєприпаси. Для гасіння використовували пожежний танк, ґрунт. Було зафіксовано близько 50 точок загоряння [6].

Як правило, ці пожежі завершувались вигоранням магнію, загибеллю людей та великою кількістю постраждалих. Проводячи аналіз пожеж та вибухів, які виникли з причин загоряння магнію та його сплавів, можна сказати, що це актуальна проблема, яку потрібно вирішувати, розробляти ефективні способи та засоби гасіння пожеж таких класів з врахуванням їх особливостей.

1.2. Галузь застосування магнію

Магній застосовують у вигляді металевих пластин при захисті від корозії морських судей і трубопроводів. Захисна дія магнієвого «протектора» пов'язана з тим, що зі сталевих конструкцій і магнієвого протектора (магній стоїть в електрохімічному ряду напружень лівіше, ніж залізо) створюється електричний ланцюг. Відбувається руйнування магнієвого протектора; основна ж сталеві частина конструкції при цьому зберігається. У металургії магній використовують як «розкислювач» – речовина, що зв'язує шкідливі домішки в

розплаві заліза. Додаток 0,5% магнію в чавун сильно підвищує гнучкість чавуну і його опір на розрив. Використовують магній і при виготовленні деяких гальванічних елементів [101].

Сплави магнію відіграють у техніці дуже важливу роль. Існує ціле сімейство магнієвих сплавів із загальною назвою «електрон». Основу їх становить магній у поєднанні з алюмінієм (10%), цинком (до 5%), марганцем (1-2%). Малі добавки інших металів надають «електрону» різні цінні властивості. Але головною властивістю всіх видів «електронів» є їх легкість (1,8 г / см³) і прекрасні механічні властивості. Їх використовують в тих галузях техніки, де особливо високо цінується легкість: в літако- та ракетобудуванні. За останні роки створені нові стійкі на повітрі магнієво-літійові сплави із зовсім малою щільністю (1,35 г / см³). Їх використання в техніці є дуже перспективним. Магнієві сплави цінні не лише завдяки своїй легкості. Їх теплоємність в 2-2,5 рази вища ніж у сталі. Апаратура з магнієвих сплавів нагрівається менше від сталеві. Використовують і сплав алюмінію з великим вмістом магнію (5-30%). Цей сплав «магналій» твердіший і міцніший за алюміній, легше обробляється і полірується. Число металів, з якими магній утворює сплави, велике. З діаграми, що ілюструє правило Юм-Розера, бачимо дивовижну особливість магнію – не змішуватися в розплаві зі своїм близьким за положенням у таблиці Менделєєва сусідом – берилієм. Через значні відмінності міжатомних відстаней не утворює магній сплавів і з залізом.

Серед кисневих сполук магнію потрібно відзначити оксид магнію MgO, званий також як «палена магнезія». Він застосовується у виготовленні вогнетривких цеглин, тому що температура його плавлення – 2800 °C. Палена магнезія використовується і в медичній практиці.

Цікаві силікати магнію – тальк $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ і азбест $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2$, яким притаманна висока вогнестійкість. Азбест має волокнисту будову, тому його можна прядати і виготовляти з нього спецодяг для роботи у високотемпературних середовищах. Карбонати і силікати магнію у воді нерозчинні.

Інтерес до магнію і сплавів на його основі обумовлений, з одного боку, поєднанням важливих для практичного використання властивостей, а з іншого – великими сировинними ресурсами магнію. Широкою є сфера використання магнію та магнієвих сплавів зі спеціальними хімічними властивостями, наприклад, в джерелах струму і для протекторів при захисті сталевих споруд від корозії. У СНД, як і за кордоном, є великі запаси мінеральної сировини магнію, зручні для його видобування. Це родовища твердих солей, які містять магній, а також розсоли ряду соляних озер. Крім того, магній може вилучатись з морської води. Таким чином, для магнію не стоїть проблема виснаження сировинних ресурсів, яка набуває все більшого значення для багатьох інших, промислово важливих металів. Хоча магній є одним з основних промислових металів, але обсяг його виробництва продовжує помітно поступатися обсягам виробництва алюмінію і сталі. Певну оцінку потреб промисловості в магнії дає огляд його виробництва та споживання в розвинених капіталістичних країнах. Після Другої світової війни і аж до початку 70-х років ХХ століття у них спостерігалось безперервне зростання виробництва і споживання магнію, потім рівень споживання стабілізувався. Найбільшим виробником магнію є США, частка їх у загальному виробництві дещо більше 50%. Конструкційні магнієві сплави це лише одна, причому не найбільша за обсягом галузь застосування магнію. Магній широко використовується як хімічний реагент в багатьох металургійних процесах. Зокрема, він застосовується в чорній металургії для обробки чавуну з метою десульфурації. Загалом в останні роки є тенденція до розширення застосування магнію в якості хімічного реагенту. Значна кількість магнію використовується для отримання титану, і треба шукати шляхи підвищення ефективності застосування його в цих цілях. Виявляється також значний інтерес до магнію і сплавів на його основі як акумуляторів водню [102, 107].

Є певна упередженість до магнієвих сплавів з боку споживачів стосовно їх пожежонебезпеки, низької корозійної стійкості, підвищеної чутливості до концентраторів напружень. Цю упередженість слід долати. У той же час слід

продовжити роботи, спрямовані на поліпшення службових характеристик магнієвих сплавів, зокрема на підвищення їх корозійної стійкості.

Основні тенденції в розвитку споживання магнію в світі.

В останні роки за кордоном положення магнію як одного з масштабних промислових металів утвердилося: у 1980 році вперше в мирний час був перевершений максимальний рівень (1943 року) виробництва магнію військового. Незважаючи на окремі спади, обумовлені загальною несприятливою кон'юктурою, споживання магнію залишалось стабільним, хоча ціни на нього і виросли в 1,9 рази.

Друге місце за обсягом споживання магнію займає Західна Європа (30%). Споживання магнію в Японії оцінюється на рівні 20-25 тис. тонн на рік, з яких 69% витрачається у виробництві алюмінієвих сплавів і високоміцного чавуну, на виливки з магнієвих сплавів – 4,9%.

Магній за кордоном використовується в багатьох галузях промисловості. Все розмаїття напрямів використання можна умовно розділити на 3 групи [99, 100, 109, 110]:

1. Застосування магнію у виробництві алюмінієвих сплавів, за яких додають від 0,5% до 10% магнію. Алюмінієві сплави, що містять магній, відрізняються високою питомою міцністю, корозійною стійкістю і добре обробляються різанням.

2. Приготування сплавів конструкційного призначення на основі магнію. Вміст магнію в таких сплавах 90-98%. Магнієві сплави які піддаються деформації, і литі заготовки з них застосовуються у ряді галузей промисловості, перш за все в аерокосмічній військовій та автомобільній.

3. Використання магнію як хімічного реагента в чорній та кольоровій металургії для відновлення Be, Ti, U, Zr, Hf і інші металів, в хімії (в основному в реакції Гриньяра), також як виготовлення анодів для катодного захисту від корозії сталевих конструкцій, підземних трубопроводів і резервуарів. Магній у цих процесах повністю витрачається. Лом і відходи не утворюються, на відміну

від перших двох груп, де він може повторно використовуватися у вигляді вторинних сплавів.

В умовах дефіциту магнію також актуальним є завдання більш раціонального використання наявних ресурсів металу, скорочення втрат його на всіх етапах переробки та використання. Наприклад, більш ефективно може бути використаний вторинний магнієвий сплав типу МА9С6 для легування алюмінієвих сплавів замість первинного металу. Краще виглядає і пряме використання відходів з магнієвих сплавів у вигляді брикетів стружки замість чушкового металу, наприклад, для десульфурації або модифікування чавуну, у виробництві модифікаторів типу залізо-кремній-магній.

Використання магнію в апаратах космічної та авіаційної техніки, автомобілебудуванні, різних агрегатах і відповідальних приладах висуває особливі вимоги до технології виробництва литва з магнієвих сплавів. Потреба народного господарства в магнії і магнієвих сплавах значно перевищує обсяги їх виробництва. Це ставить перед металургами, технологами та розробниками нові завдання підвищення якості лиття, використання брухту та стружки, створення безвідходних і маловідходних технологій виробництва. Загострюються питання екології.

1.3. Фізико-хімічні властивості магнію

Магній – сріблясто-білий блискучий метал, порівняно м'який і пластичний, добре проводить тепло і електричний струм. Майже в 5 разів легший за мідь, в 4,5 раза легший ніж залізо; навіть алюміній в 1,5 раза важчий за магній. Плавиться магній при температурі 651 °С, але у звичайних умовах розплавити його досить важко. За температури 550 °С він займається і миттєво згоряє з виділенням великої кількості тепла і світла. Смужку магнієвої фольги легко підпалити навіть джерелом запалюванням низької потужності (звичайним сірником), а в атмосфері хлору магній самозагоряється навіть при кімнатній температурі. При горінні магнію виділяється велика кількість ультрафіолетових

променів і тепла, наприклад, щоб нагріти 250 мл води від 0 до 100 °С, потрібно спалити всього 4 г магнію. Магній розташований у головній підгрупі другої групи періодичної системи елементів Д.І.Менделєєва. Порядковий номер його – 12, атомна маса – 24,305. Електронна конфігурація атома магнію в збудженому стані $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ тому в сполуках він проявляє ступінь окиснення +2. Реакційна здатність магнію багато в чому визначається його електронною будовою. На повітрі магній окиснюється з утворенням але утворюється при цьому окисної плівки, яка запалює його подальшому окисненню. У флуоридній кислоті магній не розчиняється у зв'язку з утворенням плівки з важкорозчинного у воді магній флуориду Mg_2F , в концентрованій сульфатній кислоті майже нерозчинний. Магній легко розчиняється при дії розчинів солей амонію. Розчини лугів на нього не діють. Магній надходить в лабораторії у вигляді порошку або стрічок. Якщо підпалити магнієву стрічку, то вона швидко згоряє з появою сліпучо білого світла та велика кількість тепла. Магнієві спалахи застосовували у фотографії, у виготовленні освітлювальних ракет. Температура кипіння магнію 1107 °С, густина = 1,74 г / см³ [104].

Хімічні властивості магнію досить своєрідні. Він легко забирає кисень і хлор у більшості елементів, на нього не діють їдкі луги, сода, гас, бензин і мінеральні масла. З холодною водою магній майже не взаємодіє, але киплячу воду розкладає з виділенням водню. У цьому відношенні він займає проміжне положення між берилієм, який взагалі з водою не реагує, і кальцієм, який легко з нею взаємодіє.

Оскільки продуктом цієї реакції є водень став очевидним, що гасіння палаючого магнію водою неприпустиме: може відбутися утворення гримучої суміші водню з киснем і вибух. Не можна загасити палаючий магній і вуглекислим газом: магній відновлює його [57, 96, 108, 117].

Припинити до палаючого магнію доступ кисню можна засипавши його піском, хоча і з силіцій оксидом магній взаємодіє, але зі значно меншим виділенням теплоти:



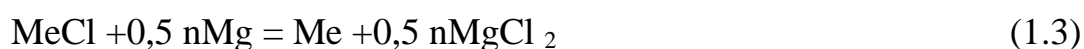
цим і визначається можливість використання піску для гасіння магнію. Небезпека займання магнію при інтенсивному нагріванні є однією з причин, що обмежує його використання як технічного матеріалу.

У електрохімічному ряді напруг металів магній розташований значно лівіше водню і активно реагує з розведеними кислотами з утворенням солей. У цих реакціях у магнію є особливості. Він не розчиняється у флуоридній, концентрованої сульфатній і кислотах. Суміш сульфатної та нітратної кислоти розчиняє магній так само ефективно як «королівська вода» (суміш HCl і HNO₃) інші метали. Стійкість магнію до розчинення у флуоридній кислоті пояснюється просто: поверхня магнію покривається нерозчинною у флуоридній кислоті плівкою магній флуориду магнію MgF₂. Стійкість магнію до досить концентрованої сульфатної кислоти та суміші її з нітратною азотною кислотою пояснити складніше, хоча і в цьому випадку причина полягає у криється в пасивації поверхні магнію. З розчинами лугів і алюміній гідроксиду магній практично не взаємодіє. А ось з розчинами амонійних солей реакція хоча і повільно, та все ж відбувається:



При нагріванні магнію в атмосфері галогенів відбувається займання галогенідів металів. Причиною займання – значне тепловиділення, як і у випадку реакції магнію з киснем. Так, при утворенні 1 моль магній хлориду з магнію і хлору виділяється 642 кДж. При нагріванні магній сполучається з сіркою (MgS), і з азотом (Mg₃N₂). При підвищеному тиску і нагріванні з воднем магній утворює магній гідрид.

Велика спорідненість магнію до хлору дозволила створити нове металургійне виробництво - "магнійтермію" - отримання металів в результаті реакції



Цим методом одержують метали, які відіграють дуже важливу роль у сучасній техніці - цирконій, хром, торій, берилій. Легкий і міцний "метал космічної ери" - титан практично весь отримують таким способом [57].

Суть виробництва така: при отриманні металевого магнію електролізом розплаву магній хлориду в якості побічного продукту утворюється хлор. Цей хлор використовують для отримання титан (IV) хлориду $TiCl_4$, який магнієм відновлюється до металевого титану. Магній хлорид магнію, знову використовується для виробництва магнію і т.д. На основі цих реакцій працюють титаномagneвi комбiнати. Попутно з титаном і магнієм отримують при цьому і інші продукти, такі, як бертолетова сіль $KClO_3$, хлор, бром і вироби – фібролітові і ксилітові плити, про які буде сказано нижче. У такому комплексному виробництві ступінь використання сировини, рентабельність виробництва висока, а маса відходів невелика, що особливо важливо для охорони навколишнього середовища від забруднень [57, 96, 103, 105, 106, 108].

1.4. Основні напрямки захисту від пожеж і вибухів при роботі з магнієвими сплавами

Основні властивості магнію. Тверда речовина. Метал. Сріблясто-білого кольору. Нелеткий. Температура плавлення $+651\text{ }^{\circ}C$. Температура кипіння $+1107\text{ }^{\circ}C$. Бурхливо реагує з водою – виділяє горючі гази і велику кількість тепла. На повітрі здатний займатися, у вологому середовищі згоряє з вибухом. Температура горіння $+2800\text{ }^{\circ}C$ [75, 80]. Вибухо- та пожежонебезпечний. Горючий. Можливе самозаймання на повітрі. Температура самозаймання: компактного металу $+650\text{ }^{\circ}C$, стружки $+510\text{ }^{\circ}C$, пилу $+420\dots440\text{ }^{\circ}C$. Нижня концентраційна межа поширення $10\dots20\text{ г/м}^3$. Займається від іскор та полум'я. Горить в атмосфері діоксиду вуглецю. В атмосфері чистого сухого азоту магній займається. При температурі більше $400\text{ }^{\circ}C$ пил магнію енергійно взаємодіє з азотом, виділяючи тепло. Тому атмосфера азоту не може вважатися інертною [75].

Основними напрямками захисту від пожеж і вибухів при роботі з магнієвим пилом є такі [53, 58, 60, 68, 69, 78, 97]:

1. Механічна обробка магнієвих сплавів повинна проводитися гострим і правильно загостреним інструментом, забезпечуючи при цьому мінімальну величину тертя.

2. Для гасіння пожежі, де горить магній, використовувати воду не можна, оскільки від зіткнення з водою розпечений магній вибухає.

3. Застосовувати CO_2 для гасіння речовин, що містять у своєму складі магній, неефективно.

4. При обробці виробів на токарних, фрезерних, стругальних і інших верстатах охолодження повинно проводитися маслом або струменем повітря. Охолодження водою оброблюваних виробів із магнію та його сплавів не допускається, оскільки нагріта вода при взаємодії з магнієм виділяє водень.

5. Слід намагатися звести до мінімуму можливість утворення іскор. Для того кожухи верстатів, повітроводи повинні бути виготовлені з металів, які при ударі не утворюють іскор.

6. Пил, який утворюється при обробці виробів, відсмоктується за допомогою спеціальної вентиляційної системи.

7. Систематично проводити прибирання приміщень від пилу та протирати обладнання.

8. Електрообладнання верстатів і цехи в цілому повинні бути тільки у вибухозахищеному виконанні.

9. Локалізація горіння магнієвих сплавів здійснюється піском, порошком окису магнію, графітом.

Нас в першу чергу цікавлять питання, як горить магній та як його гасити і в яких випадках це відбувається. Магній та його сплави часто використовуються в апаратах космічної та авіаційної техніки, автомобілебудуванні, різних агрегатах і відповідальних приладах. Найчастіше горить магнієва стружка або вироби з магнієвих сплавів, особливо в подрібненому стані. Пожежі шасі літаків виникають в основному при посадці і пов'язані, головним чином, з горінням гальмівного барабана, що призводить до загоряння гуми покришок коліс, при цьому розвивається, висока температура,

яка може викликати загоряння магнієвих сплавів барабанів коліс візка шасі, яке настає звичайно через 6-8 хвилин пожежі [39].

Виникає необхідність у застосуванні ефективних вогнегасних порошків спеціального призначення та засобів його подачі для гасіння такого класу пожеж.

Для гасіння магнію та його сплавів використовуються такі вогнегасні речовини [65, 68, 69, 73, 79, 81,82, 89, 93]:

- засипання палаючого магнію великою кількістю сухого графіту;
- універсальним засобом для гасіння палаючого магнію і його сплавів є сухий мелений флюс, що вживається при плавленні магнієвих сплавів. Запас цих флюсів повинен постійно бути на робочих місцях і зберігатися в герметичній тарі. Для гасіння пожеж магнієвих сплавів при обробці різанням застосовують патрони, заряджені флюсом [46];

- застосування трихлориду бору для гасіння магнієвого полум'я. Трихлорид бору взаємодіє з палаючим магнієм, утворюючи хлорид магнію, який припиняє доступ повітря до палаючої поверхні;

- засипання палаючого магнію сухим пилоподібним карналітом або піском.

Всі запропоновані вогнегасні речовини випробовувались при гасінні невеликих загорянь в лабораторних умовах. Вогнегасні порошки, які випускаються в Україні, не придатні для гасіння пожеж легких металів. Крім того при подачі під тиском порошку палаюча стружка магнію або його крупинки розбризкуються і збільшують площу горіння. При проведенні навчань з гасіння запалювальних пристроїв з магнієм у Запорізькій області пісок виявився малоефективним вогнегасним засобом ще й не технологічним при подаванні. До негативного результату призвело і гасіння вуглекислотними та порошковими вогнегасниками.

Для гасіння великомасштабних пожеж ці засоби не в повній мірі апробовані, не визначені оптимальні вогнегасні речовини, не відпрацьована

технологія гасіння, не проведений економічний розрахунок доцільності гасіння відповідною вогнегасною речовиною.

При проведенні аналізу пожеж, які виникли під час загоряння магнію та його сплавів, постає проблема у підвищенні ефективності порошкового пожежогасіння пожеж магнію і його сплавів та методики дослідження гасіння легких металів. При цьому треба врахувати [63], що:

- магній згоряє у вологому середовищі з вибухом. При взаємодії з водою виділяє горючі гази і велику кількість тепла. Горить в атмосфері діоксиду вуглецю. В атмосфері чистого сухого азоту магній займається. При температурі більше 400⁰С пил магнію енергійно взаємодіє з азотом, виділяючи тепло. Тому атмосфера азоту не може вважатися інертною;

- при подаванні вогнегасної речовини під високим тиском, магній що горить, розбризкується і збільшує відповідно площу горіння.

1.5. Ідея роботи, мета і задачі досліджень

Викладене вище дало підставу сформулювати ідею роботи, яка полягає у забезпеченні ефективного гасіння пожеж класу D шляхом використання розробленої рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення та удосконалення насадки-заспокоювача для його подачі з двома робочими поверхнями – еліптичним верхом та параболічним відбивачем.

Мета роботи – розкриття особливостей впливу виду, співвідношення компонентів, а також засобів подавання вогнегасного порошку спеціального призначення на ефективність процесів припинення горіння магнію та його сплавів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану розроблення і застосування вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D і виявити шляхи підвищення ефективності пожежогасіння магнію та його сплавів;

- розробити методики та провести дослідження з виявлення впливу і співвідношень компонентів вогнегасного порошку спеціального призначення для гасіння пожеж класу D із вітчизняної сировини на показники його якості;
- удосконалити математичну модель SolidWorks та з її застосуванням змоделювати процеси формування струменів вогнегасного порошку насадкою-заспокоювачем порошкового вогнегасника спеціального призначення;
- обґрунтувати параметри, розробити схемні рішення, розробити та виготовити насадку-заспокоювач порошкового вогнегасника спеціального призначення, а також провести її випробування;
- розробити методику визначення ефективності вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D у разі гасіння модельних вогнищ з наявністю магнію та його сплавів;
- провести дослідження з визначення вогнегасної ефективності розробленого вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D та технічного засобу його застосування в полігонних умовах, а також розробити проекти технічних документів на їх виготовлення та використання для припинення горіння магнію та його сплавів на початковій стадії пожежі.

Результати досліджень опубліковано в [9], [51], [52].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА РЕЦЕПТУРИ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ D

2.1. Гасіння пожежі магнію та його сплавів в лабораторних умовах

При горінні магнію температура може зростати понад 2000 °С. Тому деко для насипання стружки сплаву магнію має бути з термостійкого матеріалу. Стружку магнію важко підпалити, для цього використаємо газовий пальник.

Щоб визначити вогнегасні характеристики окремих складників порошку, які надалі будуть використовуватись для виготовлення порошків для гасіння магнієвих сплавів, необхідно провести вогневі випробування. Експеримент в лабораторних умовах пропонуємо проводити за розробленою нами методикою.

Увімкнули обладнання, перевірити його справність. В якості пожежного навантаження використовуємо стружку сплаву магнію з якого виготовляють барабани коліс літаків. Підготували наважку вогнегасних речовин. Стружку сплаву магнію (20 г) висипаємо на термостійке деко та рівномірно розподіляємо по площі 200x100 мм². Деко встановлене у лабораторній шафі. Увімкнули вентиляцію лабораторної шафи та одягнули засоби індивідуального захисту. Газовим пальником підпалюємо магнієвий сплав. Після розповсюдження полум'я на площу більше 50% розпочинаємо процес гасіння однією з підготовлених вогнегасних речовин (рис. 2.1) [71, 72, 76]. Досліджуваний вогнегасний склад насипаємо на поверхню, що горить, рівномірно. Закриваємо засувки, видаляємо леткі продукти згорання в атмосферу при повній потужності вентиляційної системи. Результати гасіння (рис. 2.2) зафіксуємо в таблиці 2.1; 2.2; 2.4, де вказуємо витрату вогнегасної речовини, час гасіння та розраховуємо інтенсивність подачі вогнегасної суміші. Очищаємо випробувальну шафу від твердих залишків магнієвих сплавів.

При проведенні експериментів необхідно дотримуватись заходів безпеки:

1. Провести інструктаж з особовим складом, який буде участь у проведенні експериментів.

2. Персонал, зайнятий роботами з порошками, має бути забезпечений засобами індивідуального захисту (при гасінні використовувати захисні окуляри та захисні рукавиці, при роботі з порошками – ще і респіратори).

3. Для захисту рук від порошку застосовувати силіконовий крем або інший аналогічний.

4. Для гасіння не використовувати воду.

5. Перевірити наявність та укомплектованість медичної аптечки.



Рисунок 2.1 – Випробування вогнегасних порошків для гасіння сплавів магнію в лабораторних умовах

Таблиця 2.1

Результати проведення досліджень окремих хімічних складників для вогнегасних порошків для гасіння сплавів магнію

№ експе-ри-менту	Вага наважки Mg, кг	Вид вогнегасної речовини	Витрата вогн. реч., кг	Час гасіння t, с	Примітка
1	0,02	BaSO ₄	0,116	23,2	Підсилює горіння і призводить до спалаху

Продовження таблиці 2.1

2	0,02	K_2CO_3	0,3	32	Прогорає, з'являються язички полум'я
3	0,02	FeO	0,1	37,7	Прогорає, з'являються язички полум'я
4	0,02	Мікросфера	0,06	30,08	Не погасили
5	0,02	Меламін	0,032	9,67	Прогорає
6	0,02	Аеросил	0,013	28	Не погасили
7	0,02	Стеарат кальцію	0,091	32,15	На початку частинки стеарату кальцію підсилювали горіння, а після гасіння утворилася зв'язуюча суміш
8	0,02	$CaCO_3$	0,097	39,01	Після гасіння $CaCO_3$ не покриває стружку магнію, а загоряється та відбувається прогорання
9	0,02	Каолін, біла глина	0,058	36,64	Прогорає, появляються язички полум'я
10	0,02	Мелена зола	0,154	31,1	Проявляються поодинокі язички полум'я
11	0,02	Мелений шлак	0,202	19,26	Проявляються поодинокі язички полум'я, але через 20 с після гасіння зникають

**Результати проведення дослідження сумішей вогнегасних порошків
для гасіння сплавів магнію**

№ Експе- ри- менту	Вага нава жки Mg, кг	Вид вогнегасної речовини	Витрата вогн. реч., кг	Час гасіння t, с	Примітка
1	0,02	MgCl ₂ ·6H ₂ O	0,112	28,04	Не погасили
2	0,02	P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO, CO ₃	0,11	30,97	Прогорання вогнегасної речовини
3	0,02	KCl, MgCl ₂	0,162	32,23	Прогорає, з'являються язички полум'я
4	0,02	Мелена зола-60% KCl, MgCl ₂ -39% Аеросил-1%	0,2	35,44	Проявляються поодинокі язички полум'я
5	0,02	Мелена зола-40% KCl, MgCl ₂ -58% Стеарат-2%	0,194	28,61	Прогорає, з'являються язички полум'я
6	0,02	Мелена зола-30% KCl, MgCl ₂ -69% Аеросил - 1%	0,206	22,54	Під шаром порошку продовжується горіння
7	0,02	Мелена зола-35% NaCl-54% Аеросил-1% Меламін -10%	0,17	16,03	Під шаром порошку продовжується горіння
8	0,02	Мелена зола-30% NaCl-59% Аеросил-1% Меламін -10%	0,192	19,21	Під шаром порошку продовжується горіння

Продовження таблиці 2.2

9	0,02	Мелена зола-40% NaCl -58% Стеарат-2%	0,194	20,54	Проявляються поодинокі язички полум'я, але через 20 с після гасіння зникають
10	0,02	Мелена зола-35% NaCl -64% Аеросил - 1%	0,205	15,41	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
11	0,02	Мелений шлак -35% NaCl -64% Аеросил - 1%	0,194	21,46	Після гасіння, через 10 с горіння припинене



Рисунок 2.2 – Результати випробувань вогнегасних порошків для гасіння магнію

2.2. Вибір методів і факторів математичного планування експериментів

Традиційні методи аналізу процесів гасіння, в основі яких лежить послідовний перебір всіх факторів гасіння і класичний регресійний аналіз, характеризуються рядом принципових недоліків, тому вони не можуть використовуватися як апарат для отримання математичних моделей, керування

і прогнозування процесів гасіння. Використання згаданих методів призводить до того, що багато рішень, які приймаються, носять випадковий характер і не завжди є оптимальними.

В даний час в багатьох галузях промисловості все ширше застосовуються нові математичні методи, які дозволяють отримати математичні моделі, що описують процеси і об'єкти, та із достатнім ступенем точності і достовірності дають змогу керувати ними.

При описанні впливу параметрів процесу гасіння та вогнегасного складу порошку на показники ефективності гасіння і продуктивності процесу при різних складах вогнегасного порошку, близькі до оптимуму моделі 1-го порядку переважно не придатні. Для цього дуже часто доводиться використовувати поліноміальні моделі другого порядку. Наперед не знаємо ні виду поверхні відбиття, ні області, в якій знаходиться оптимум. Тому при плануванні експерименту завжди намагаємося використовувати плани, які характеризують отримання максимальної інформації при самих найнесприятливіших умовах і при порівняно невеликій кількості дослідів, тобто оцінюємо оптимальність цих планів за різними критеріями.

Встановлено [22–24], що плани повних факторних експериментів типу 2^k , дробових факторних експериментів типу 2^{k-p} і плани на основі матриць Адамара належать до найбільш ефективних при побудові лінійних моделей і задовольняють як критеріям ортогональності, симетричності, нормування, рототабельності, так і критеріям D-, G-, A- і E-оптимальності, при яких відповідно мінімізується об'єм еліпсоїда розсіювання оцінок параметрів, максимальне значення дисперсії оцінки поверхні відбивання, середня дисперсія оцінок коефіцієнтів і максимальне власне значення коваріаційної матриці.

При переході до побудови моделей 2-го порядку вибір оптимальних планів помітно ускладнюється, оскільки ці плани не відповідають одночасно декільком важливим критеріям оптимальності. Так, наприклад, при виконанні критерію ортогональності в планах 2-го порядку порушуються вимоги нормування і рототабельності, тобто цей критерій є недостатнім [24]. Більш

потужним критерієм для планів 2-го порядку є критерій рототабельності, котрий забезпечує не тільки отримання симетричних інформаційних контурів, але і вельми близький до ортогональності і дозволяє мінімізувати систематичні помилки, пов'язані з неадекватним представленням результатів експерименту моделями 2-го порядку.

Тому в кожному конкретному випадку, враховуючи мету і умови експерименту, ми повинні сформулювати критерій оптимальності і вибрати для його реалізації такий план, котрий би найбільш повно задовольняв цим вимогам.

Для вивчення впливу основних факторів пожежогасіння на параметри гасіння магнію та його сплаву (інтенсивність гасіння) вогнегасними складами в процесі гасіння і побудови математичних моделей у вигляді поліноміальних залежностей другого порядку доцільно використовувати метод факторного планування із використанням плану 3^k [25]. Оскільки практичне використання факторного експерименту для отримання цих моделей при числі незалежних змінних $k \geq 4$ ускладнено через велику кількість дослідів, то запропоновано композиційні плани. Їх отримують на основі додавання до дослідів планів 1-го порядку типу 2^{k-p} ($k-p \geq 2$ при $p = 0, 1, \dots$) зоряних і нульових точок. При цьому загальне число необхідних експериментів ($N = 2^{k-p} + 2k + n_0$) різко зменшується, бо переважно приймають $n_0 = 1$. Для практичного використання композиційних планів необхідно встановити значення плеча зоряних точок і число нульових точок. Вибір проводиться виходячи із вибраного критерію оптимальності планування.

Перелік факторів [25], що впливають на контрольовані параметри процесу гасіння вогнегасного порошку, попередньо встановлений на основі аналізу літературних даних. Для різних напрямів експериментальних досліджень остаточний вибір факторів варіювання проводять на підставі їх незалежності, детермінованості та значущості, що встановлювалися згідно з результатами попередніх експериментів. Факторами, що визначають інтенсивність подачі вогнегасного порошку при гасінні магнію та його сплавів,

є витрата вогнегасного порошку G , час гасіння t та склад вогнегасної речовини C (NaCl).

2.3. Обґрунтування проведених досліджень

Гасіння металів і металовмісних сполук ВПСІ (вогнегасним порошком спеціального призначення) докорінно відрізняється від гасіння, наприклад, вуглеводневих ЛЗР, ГР порошками загального призначення (класи пожеж А, В, С). У разі гасіння пожеж класу D [26] основне завдання при подачі ВПСІ полягає у створенні на поверхні вогнища горіння шару порошкового покриття, бажано однакової товщини, що досягається шляхом використання так званих заспокоювачів, приєднаних до пристрою подачі (на виході ствола подачі) вогнегасників, порошкових автомобілів. Використання насадки-заспокоювача при подачі ВПСІ необхідне при під час гасіння порошків металів і їх гідридів, при цьому практично не допускається утворення аерозависі вогнегасного порошку [27].

В якості вогнегасних речовин можна використати хлористий натрій, терморозширений графіт та оксид магнію. Отже, для встановлення вогнегасної ефективності запропонованих вогнегасних речовин було проведено лабораторні дослідження. Відповідно було попередньо проведено чотири експерименти з гасіння сплавів магнію NaCl [5, 6]. У всіх випадках досягнуто гасіння. Повторних займань не відбувалось, догорання магнію та його сплаву не спостерігалось. Час гасіння мінімальний. Терморозширений графіт погасив горіння магнію та його сплаву. Деякий час спостерігалась висока температура, догорання (тління) магнію. Після гасіння MgO спостерігається явище його вигорання. Шар вогнегасної речовини прогорає, з'являються окремі язички полум'я, тому доходимо висновку, що гасіння не було досягнуто [18, 28].

Як видно з літературних джерел [18, 28, 29] та попередньо проведених досліджень, найкраще себе зарекомендував в якості вогнегасної речовини хлорид натрію. Щоб надати йому властивостей вогнегасного порошку до нього

додали ще два компоненти, а саме: мелений шлак та аеросил, базуючись на їх фізико-хімічних властивостях та на тому, що це є екологічно прийнятні вогнегасні речовини [87]. Введення до вогнегасного порошку тонко здрібненого шлаку (менше за 50 мкм) і з набагато більшою щільністю поліпшує гранулометричний склад порошку, збільшуючи при цьому його питому щільність (табл. 2.3) [77].

Таблиця 2.3

Склад меленого шлаку з відходів металургійного виробництва, %

FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
1	2	34	1	32	18	1	11

Загальним недоліком порошків такого складу є низька питома густина, що негативно впливає на його плинність (висока плинність порошку необхідна для створення оптимальної концентрації вогнегасного засобу за одиницю часу в зоні горіння). Чим нижча питома щільність порошку, тим більша його кількість відноситься з зони горіння висхідними потоками гарячого повітря, так і не взявши участі в процесі гасіння. Крім того, чим вища питома густина порошку, тим він далі транспортується з вогнегасника, що дає можливість операторові перебувати на більшій відстані від вогнища горіння, ніж при застосуванні порошку з більш низькою питомою щільністю. Істинна густина шлаку становить 2,94 г/см³. Висока об'ємна маса шлаку та його висока термостійкість дає змогу добре ізолювати горючий метал від навколишнього середовища.

Аеросил має властивостями антизлежувача сипучих матеріалів. Введення його в порошкові вогнегасні суміші підвищує текучість і вогнегасну ефективність порошків. Було проведено 15 експериментів з хлоридом натрію в межах від 57,5 до 78,5 %, меленого шлаку – від 20 до 40 % та аеросилу – від 1,5 до 2,5 %. На основі цих експериментів встановлено оптимальне співвідношення хлориду натрію – 73,5 %, меленого шлаку – 25 % та аеросилу – 1,5 %. З рис. 2.3

видно, як змінюється від співвідношення компонентів вогнегасного порошку інтенсивність гасіння та оптимальна його величина.

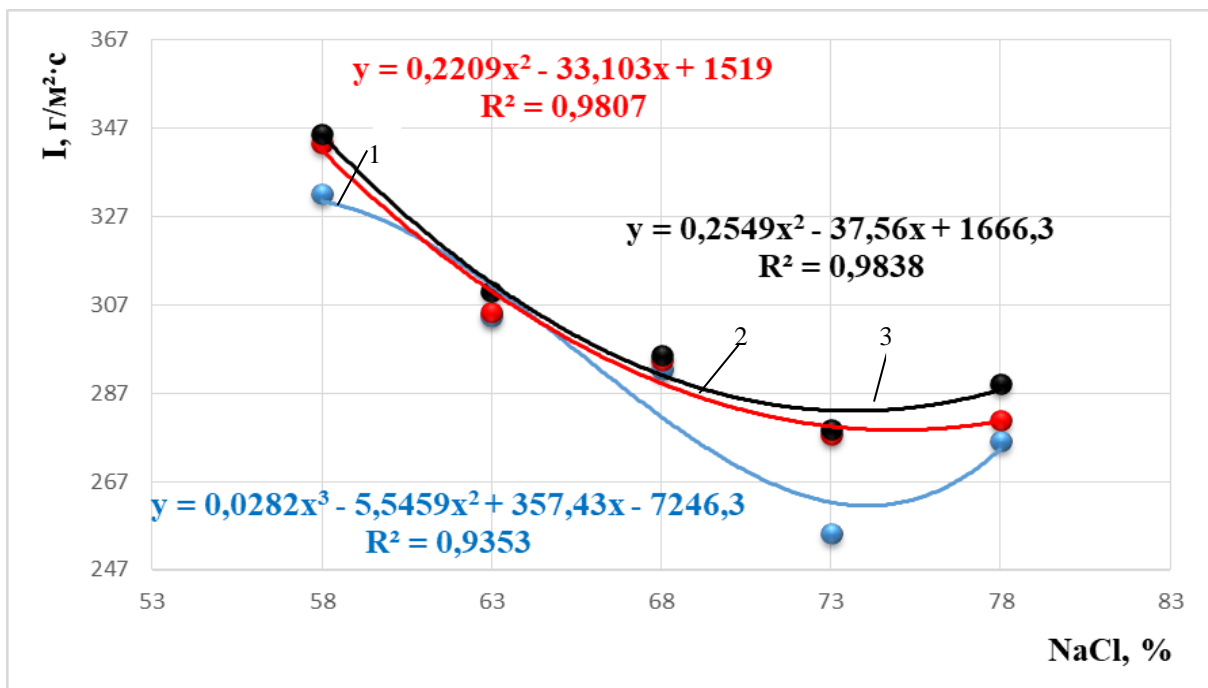


Рисунок 2.3 – Залежність інтенсивності гасіння від вмісту меленого шлаку та NaCl в межах від 57,5 до 78,5% при: 1 – 1,5%; 2 – 2,0%; 3 – 2,5% аеросилу

Як видно з рис. 2.3 та 2.4, менша кількість аеросилу краще впливає на процес гасіння, а саме: на інтенсивність гасіння та витрату вогнегасної речовини.

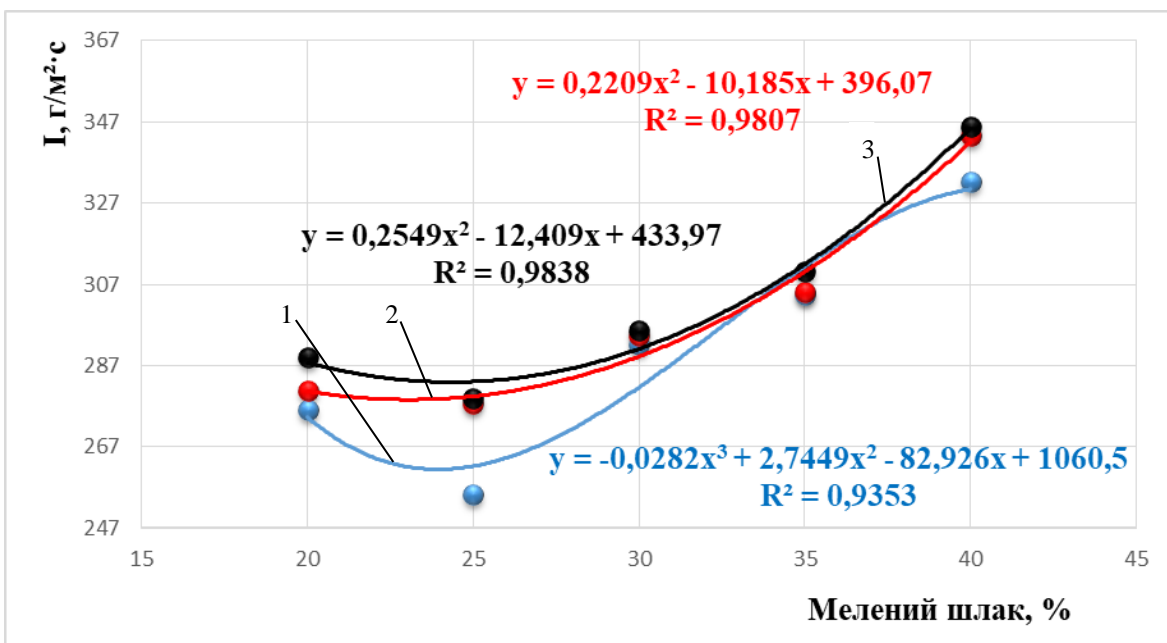


Рисунок 2.4 – Залежність інтенсивності гасіння від вмісту NaCl та меленого шлаку в межах від 25 до 40% при: 1 – 1,5%; 2 – 2,0%; 3 – 2,5% аеросилу

Отже, використання вогнегасного порошку за оптимальної інтенсивності гасіння, наведеної в табл. 2.4, експеримент №2 має забезпечити найкращу ефективність гасіння. Витрату вогнегасних речовин, час гасіння, час горіння, інтенсивність подачі фіксуємо та записуємо в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Результати гасіння магнію та його сплаву різними вогнегасними складами, які містять хлорид натрію, мелений шлак з відходів металургійного виробництва та аеросил

№ з/п	Вид вогнегасної речовини			Витрата, кг	Час гасіння $t_{сер}$, с	Інтенсивність I , кг/($m^2 \times c$)
	NaCl, %	мелений шлак, %	аеросил, %			
1	78,5	20	1,5	0,157	28,5	0,276
2	73,5	25	1,5	0,148	29,1	0,255
3.	68,5	30	1,5	0,167	28,6	0,292
4.	63,5	35	1,5	0,188	31	0,304
5.	58,5	40	1,5	0,2	30,1	0,332
6.	78	20	2	0,155	26,9	0,280
7.	73	25	2	0,146	26,2	0,277
8	68	30	2	0,162	28,6	0,294
9.	63	35	2	0,182	30	0,305
10	58	40	2	0,2	29,1	0,343
11	77,5	20	2,5	0,157	27,9	0,289
12	72,5	25	2,5	0,149	26,8	0,278
13	67,5	30	2,5	0,169	29,8	0,295
14	62,5	35	2,5	0,189	31,4	0,31
15	57,5	40	2,5	0,2	30,8	0,345

Крім того, побудовано залежність інтенсивності [88] гасіння вогнегасним складом залежно від співвідношення складових компонентів (рис. 2.1). Як бачимо найефективнішим вогнегасним порошком є рецептура № 2, яка має найменшу інтенсивність подачі вогнегасної суміші, а значить, найкращу ефективність гасіння.

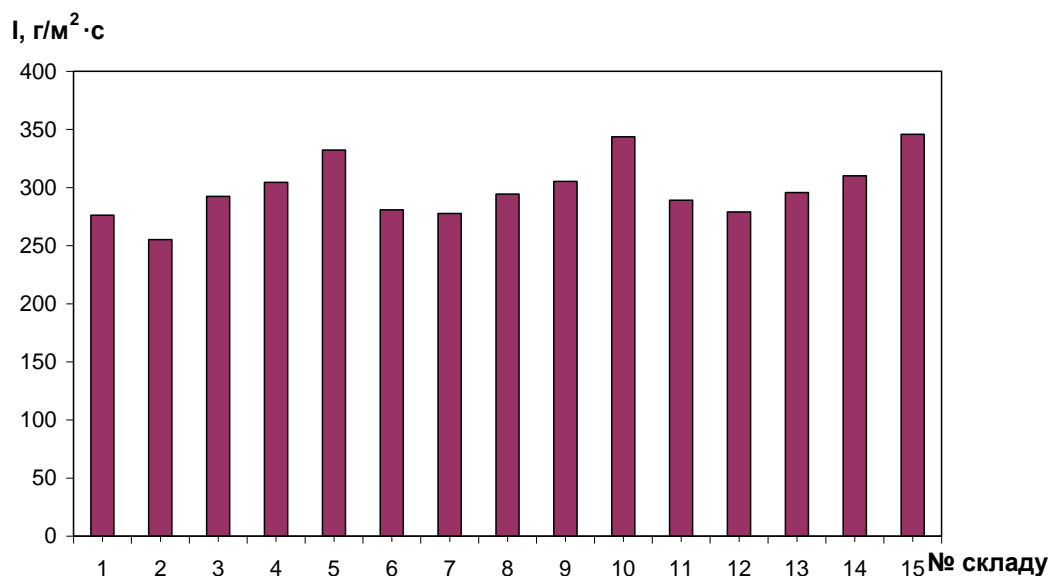


Рисунок 2.5 – Залежність інтенсивності гасіння I від рецептури вогнегасного порошку

2.4. Планування та обробка результатів факторного експерименту

У роботі експериментальні дослідження виконували згідно з планами матриць дробових факторних експериментів (ДФЕ) [30]. ДФЕ проводили згідно з планом №28 [30], при цьому за основні параметри гасіння вогнегасним порошком прийнято: G (фактор X_1), t (фактор X_2) та C (NaCl) (фактор X_3). Інші фактори незмінні. Рівні варіювання факторів для ДФЕ типу №28 [30] наведено у табл. 2.6.

Переважає більшість математичних описів процесів у технічних системах має вигляд ступеневих функцій. Не виняток і пожежна безпека, де встановлюють зв'язки між параметрами оптимізації (геометричними та фізичними параметрами, складовими різних процесів тощо) та характеристиками процесів гасіння у вигляді цих же функцій. Тому вважаємо, що для процесу гасіння магнію та його сплавів розробленим вогнегасним складом нелінійні за факторами математичні моделі 2-го порядку будуть адекватно описувати зв'язок між технологічними параметрами процесу гасіння та параметрами оптимізації, зокрема, інтенсивністю подавання вогнегасної

речовини. Після стандартного логарифмічного перетворення ступеневих функцій набувають вигляду рівняння регресії, для якої допустимо використовувати матриці планування експериментів:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2, \quad (2.1)$$

де Y – вибірка оцінка функції, що вивчається; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – вибіркові коефіцієнти регресії (оцінки для генеральних значень коефіцієнтів регресії $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$); X_i, X_j – незалежні змінні; k – загальне число незалежних змінних.

Вибіркові коефіцієнти регресії цієї моделі визначаються з використанням матриці планування і результатів експериментів; матриця нормальних рівнянь плану повинна бути не виродженою, тобто необхідно, щоб існувала обернена матриця $(X^*X)^{-1}$.

Загальне число коефіцієнтів регресії для моделі 2-го порядку виражається як

$$N_k = \frac{(k+1)(k+2)}{2}. \quad (2.2)$$

При побудові математичних моделей кількість повторних дослідів вибираємо $r = 2$ для доброї їх відтворюваності. Також на вибір кількості дослідів має вплив трудомісткість проведення експериментів, наявність необхідних матеріалів і обробка результатів.

Результати експериментів опрацьовували згідно з відомою методикою, яка містить статистичний аналіз досліджень [24, 25]. Перевірка гіпотези про адекватність отриманої математичної моделі проводиться за даними матриці планування і результатами з неповторними по умовах рядками із застосуванням критерію Фішера для рівня значимості $\alpha = 0,05$. Гіпотеза про значимість множинного коефіцієнта кореляції визначається за F критерієм.

Рівні варіювання факторів для ДФЕ типу №28 [30]

№ з/п	Характеристика фактора	Кодоване позначення	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
			Верхній	нижній	
1	Витрата вогнегасного порошку G, кг	X ₁	0,2	0,148	0,052
2	Час гасіння t, с	X ₂	31	26,2	4,8
3	Склад вогнегасної речовини C (NaCl)	X ₃	78,5	57,5	21

Вплив параметрів процесу порошкового гасіння на інтенсивність гасіння досліджували згідно з матрицями планів, складених на підставі теорії планування багатофакторних експериментів. Ця теорія дає змогу описати фізичний процес відповідною статистично-математичною залежністю, а при застосуванні статистичних процедур обробки даних – відповідним регресійним рівнянням.

2.5. Дослідно-емпіричні залежності для визначення інтенсивності гасіння пожеж класу D

Параметри подачі вогнегасного порошку призначають на підставі дослідно-емпіричних залежностей, які характеризують зв'язок основних параметрів гасіння із забезпечуваними інтенсивністю гасіння. Гасіння магнію та його сплавів характеризується витратою порошку, часом гасіння та його складом. Внаслідок цього на поверхні гасіння утворюється шар вогнегасного порошку який припиняє процес горіння стружки сплавів магнію. Процес гасіння залежить від формування параметрів подачі та складу вогнегасного порошку, які відіграють визначальну роль у підвищенні ефективності процесу гасіння. Це відбувається в результаті впливу оптимальних параметрів процесу

гасіння: витрата вогнегасного порошку G , час гасіння t та склад вогнегасної речовини C . Взаємний вплив параметрів процесу гасіння на ефективність через складність теоретичного прогнозування цього процесу доцільно досліджувати експериментально.

Під час гасіння стружки сплавів магнію контролювали такі параметри процесу гасіння: витрату вогнегасного порошку G , час гасіння t та склад вогнегасної речовини C (NaCl). За оптимальні параметри при гасінні стружки сплавів магнію прийнято – витрату вогнегасного порошку G , час гасіння t та склад вогнегасної речовини C . Інші фактори стабілізовані: діаметр посудини для подачі вогнегасного порошку становить 30 мм; вага наважки стружки магнію – 20 г; S – площа вогнища постійна – 2000 мм². На підставі експериментальних досліджень під час гасіння стружки сплаву магнію прийняті такі межі зміни факторів: $G = 0,148 - 0,2$ кг $t = 26,2 - 31$ с; $C (\text{NaCl}) = 57,5 - 78,5$.

Матриці планування дробових багатofакторних експериментів і виміряні значення зазначених параметрів процесу гасіння, отримані на стружці сплаву магнію при гасінні.

Обробку результатів експериментальних досліджень проводили згідно з викладеною у загальноприйнятій методиці [25]. Математичні залежності у кодованих змінних для визначення інтенсивності подачі вогнегасного порошку після перевірки однорідності дисперсій, відтворюваності у дослідах за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресій за допомогою критерію Стьюдента та адекватності математичних моделей при застосуванні критерію Фішера мають вигляд:

$$I=2,471+1,7224 \times X_1^2+1,7326 \times X_2^2+1,9724 \times X_3^2+0,2357 \times X_1+0,2430 \times X_2-0,4833 \times X_3+0,2535 \times X_1 \times X_2+0,0133 \times X_1 \times X_3+0,0125 \times X_2 \times X_3 \quad (2.3)$$

У натуральних змінних математичні залежності для відображення змін інтенсивності гасіння вогнегасним порошком від параметрів процесу гасіння мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 \lg I = & 2,471 + 1,7224 \cdot (15,50 \lg G - 34,67)^2 + 1,7326 \cdot (48,78 \lg t - 71,73)^2 + 1,9724 \cdot \\
 & (14,81 \lg C - 27,07)^2 + 0,2357 \cdot (15,50 \lg G - 34,67) + 0,2430 \cdot (48,78 \lg t - 71,73) - 0,4833 \cdot \\
 & (14,81 \lg C - 27,07) + 0,2535 \cdot (15,50 \lg G - 34,67) \cdot (48,78 \lg t - 71,73) + 0,0133 \cdot \\
 & (15,50 \lg G - 34,67) \cdot (14,81 \lg C - 27,07) + 0,0125 \cdot (48,78 \lg t - 71,73) \cdot (14,81 \lg C - 27,07)
 \end{aligned}$$

$$I = 10^{\lg I}. \quad (2.4)$$

Результати експериментального дослідження впливу основних параметрів процесу гасіння вогнегасним порошком магнію та його сплавів адекватно відображає дослідно-емпірична залежність, виведена на основі теорії планування багатофакторного експерименту. Її використання дозволяє не тільки здійснити аналіз вагомості впливів та взаємовпливів параметрів процесу на ті чи інші його показники, а і дає змогу поширити дані експериментального дослідження на інші матеріали та процеси гасіння, які належать до класу D.

2.6. Характеристика вогнегасного порошку спеціального призначення КМ-1

Вогнегасні порошки використовують для ліквідації горіння твердих, рідких та газоподібних речовин. Вогнегасний ефект застосування порошоків складається з хімічного гальмування реакції горіння, утворення на поверхні речовини, що горить, ізолювальної плівки, утворення хмари порошку, яка має властивості екрана, механічного збивання полум'я твердими частинками порошку та витискання кисню із зони горіння виділеним CO₂. Найчастіше порошки застосовують при горінні лужних та лужно-земельних металів та інших речовин (калію, магнію, натрію), які не можна гасити водою та водяними розчинами.

До найважливіших експлуатаційних властивостей вогнегасних порошоків належить їх здатність до:

- хімічного гальмування реакції горіння;
- утворення на поверхні, що горить ізолюючої плівки;
- утворення порошкової хмари, що витісняє кисень з зони горіння;
- механічного збивання полум'я твердими частками.

Завдяки добавкам, вогнегасні порошки мають добру текучість, стійкість проти злежування, грудкоутворення та зволоження і т.ін.

Вогнегасний порошок КМ-1 може бути використаний для гасіння пожеж легких металів (магній, алюміній та їх сплави) та пожеж класів D.

Основним принципом досягнення позитивного результату при гасінні металовмісних речовин є створення за допомогою вогнегасного порошку захисного шару покриття вогнища горіння, що перешкоджає доступу кисню повітря в зону горіння і не дає розповсюджуватись горінню. Таке покриття має бути досить щільним, мати необхідну товщину шару порошку по всій поверхні осередку горіння, що досягається при певній питомій витраті порошку ($\text{кг}/\text{м}^2$).

Головними перевагами вогнегасного порошку КМ-1 є:

- здатність гасіння спеціальних речовин, таких, наприклад, як палаючий сплав магнію;
- нетоксичність для людей, тварин і довкілля;
- низька вартість;
- зручність зберігання і використання.

Для більш детальнішої характеристики вогнегасного порошку КМ-1 було проведено дослідження з визначення фракцій маси порошку, результати досліджень наведені в табл.2.7.

Для дослідження фракцій маси порошку використовуємо три лабораторні сита СЛМ-200 з розмірами вічка, рекомендованими для визначення фракцій порошку: 0,1; 0,071; 0,045 мм, кришку та днище, вагу лабораторну AXIS BTU-210.

Експеримент в лабораторних умовах проводили за такою методикою:

- підготувати наважки вогнегасного порошку КМ-1 масою 1000 г;
- скласти сита одне на одне за розміром вічка від меншого до більшого;
- засипати одну із наважок вогнегасного порошку, закрити кришкою;

- проводимо пересіювання порошку та періодично через 2 хв зважуємо кількість вогнегасного порошку на ситах, коли маса порошку не змінюється тоді результати заносимо в табл. 2.7, дослід проводимо три рази.

Таблиця 2.7

Визначення фракцій маси порошку

№ з/п дослід	Кількість порошку під час проведення дослід, г	Розмір вічка, мм	Маса порошку за фракціями, г
1.	1000	до 0,1	235,1
		0,1 – 0,071	213,7
		0,071 – 0,045	436,3
		менше 0,045	114,9
2.	1000	до 0,1	233,4
		0,1 – 0,071	212,8
		0,071 – 0,045	438,1
		менше 0,045	115,7
3.	1000	до 0,1	234,3
		0,1 – 0,071	212,1
		0,071 – 0,045	439,4
		менше 0,045	114,2

Після проведення дослідження опрацьовуємо результати з табл. 2.7 та визначаємо середнє значення маси порошку в грамах та у відсотковому значенні, записуємо в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Середні значення маси порошку

Кількість порошку під час проведення досліду, г	Розмір вічка, мм	Середнє значення маси порошку за фракціями, г	середнє значення маси порошку за фракціями, %
1000	до 0,1	234,4	23,44
	0,1 – 0,071	212,8	21,28
	0,071 – 0,045	437,9	43,79
	менше 0,045	114,9	11,49

Як бачимо із опрацьованих результатів, кількість порошку фракції до 0,1 мм становить 23,44%. Такий відсоток порошку є необхідний для того щоб при подаванні важкі частинки осідали на горючу поверхню та не роздмухувалися.

Також досліджено показники якості вогнегасного порошку [70, 71] які наведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Показники якості вогнегасного порошку КМ-1

№з/п	Назва показників якості	Значення параметра
1	Насипна густина не ущільненого порошку кг/м ³ , не більше	1070
2	Насипна густина ущільненого порошку кг/м ³ , не більше	1465
3	Утримання вологи, % не більше	0,5
4	Вогнегасна здатність, кг/м ²	не більше 30
5	Стійкість до термічної дії	стійкий
6	Стійкість до вібрації	стійкий
7	Термін зберігання, років, не менше	5

Після закінчення терміну придатності КМ-1 підлягає регенерації або утилізації. Процес регенерації полягає у відновленні властивостей порошку. Для регенерації він відправляється на завод-виробник для відновлення його властивостей і характеристик.

Порошок КМ-1 можна утилізувати в якості піскосумішей у зимовий період для посипання тротуарних доріжок.

2.7. Висновки за розділом

1. Для визначення вогнегасних характеристик окремих складників порошку, які надалі будуть використовуватись для виготовлення порошків для гасіння магнієвих сплавів, запропонована лабораторна методика вогневих випробувань вогнегасних порошків.

2. Проведено лабораторні дослідження вогнегасних сумішей, які складаються з хлориду натрію, меленого шлаку і аеросилу та визначено параметри гасіння: інтенсивність подачі, масова витрата вогнегасних порошків.

3. Встановлено оптимальне співвідношення складників вогнегасного порошку, які забезпечують мінімальну величину інтенсивності подавання. Оптимальним є такий склад вогнегасного порошку: хлорид натрію – 73,5 %, мелений шлак – 25 % та аеросил – 1,5 %.

4. Покращено властивості вогнегасного порошку додаванням меленого шлаку та аеросилу, які надають вогнегасному порошку термостійкості, ізолювальної і антизлежувальної здатності, текучості та вогнегасної ефективності.

5. Результати експериментального дослідження впливу основних параметрів процесу гасіння вогнегасним порошком магнію та його сплавів адекватно відображає дослідно-емпірична залежність.

Результати досліджень опубліковано в [12], [28], [54], [55], [94].

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ НАСАДКИ-ЗАСПОКОЮВАЧА ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ D

3.1. Методика проведення експериментів при розробці насадки-заспокоювача

Алгоритм дослідження при розробці насадки-заспокоювача (рис. 3.1): визначення оптимального тиску при подаванні порошку через заспокоювач – визначення оптимальної відстані насадки від дна заспокоювача – дослідження діаметра та форми насадки – виготовлення оптимальної конструкції заспокоювача – гасіння макетної пожежі.

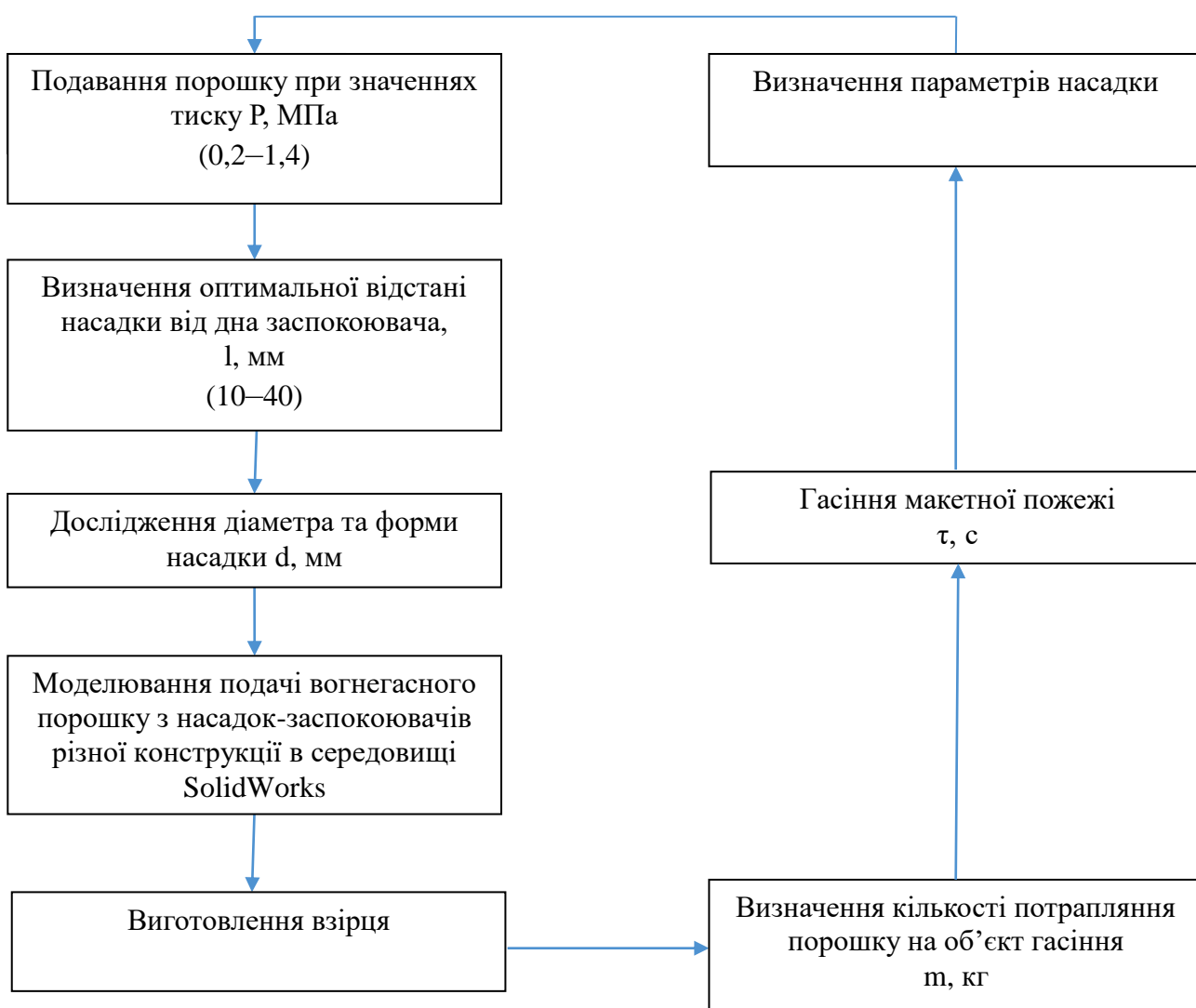


Рисунок 3.1 – Алгоритм дослідження при розробці насадки-заспокоювача

Головними критеріями кращого вибору є маса порошку, яка потрапить на об'єкт гасіння, та час подавання порошку.

З метою визначення оптимальної конструкції насадки проведемо дослідження в полігонних умовах без гасіння магнієвих сплавів з визначенням кількості потрапляння порошку на об'єкт гасіння (рис. 3.2).

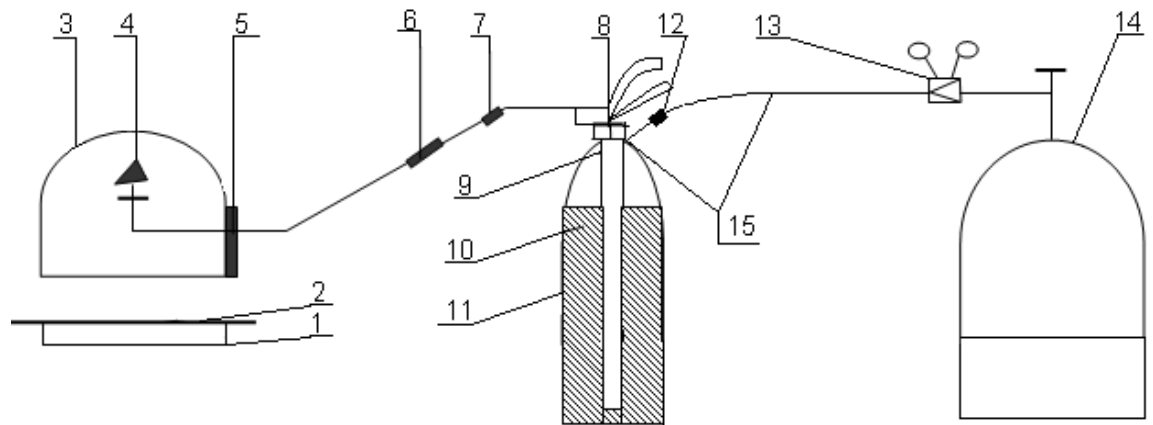


Рисунок 3.2 – Схема установки для дослідження параметрів насадки-заспокоювача:

1 – вага; 2 – квадратне деко 0,4x0,4 м для збору порошку; 3 – корпус заспокоювача; 4 – насадка; 5 – пристрій для переміщення насадки з трубою в корпусі; 6 – рукоятка; 7 – штуцер; 8 – запірно-пусковий пристрій вогнегасника; 9 – сифонна трубка; 10 – порошок; 11 – корпус вогнегасника; 12 – штуцер для повітряного шланга; 13 – редуктор з манометрами; 14 – балон з повітрям; 15 – шланги

Експеримент в лабораторних умовах проведено за такою методикою:

- візуально перевірити цілісність шлангів і трубок;
- засипати в корпус вогнегасника 1 кг вогнегасного порошку;
- встановити відповідну насадку на досліджуваній відстані від дна корпусу заспокоювача;
- під'єднати балон з повітрям через шланг до вогнегасника;
- з'єднати насадку-заспокоювач з вогнегасником;
- відкрити вентиль балона з повітрям;

- налаштувати редуктор на відповідний тиск;
- одягнути засоби індивідуального захисту (респіратор протипиловий);
- спрямувати заспокоювач на центр квадратного дека з висоти 0,35-0,37 метра;
- натиснути на важіль вогнегасника і тримати до повного виходу вогнегасного порошку з його корпусу;
- зважити порошок, який потрапив на поверхню умовного вогнища (2);
- зважити залишок в корпусі вогнегасника;
- результати дослідів занести в табл. 3.1-3.4.

Кожен дослід проводиться 3 рази. Результати дослідів, які відрізняються більше ніж на 15%, до уваги не беруться. Для визначення ефективності насадки-заспокоювача потрібно провести дослідження за 3-ма показниками: час подавання та тиск, при якому здійснюється подавання вогнегасного порошку; відстань від днища заспокоювача до насадки виходу вогнегасного порошку; діаметр насадки на виході.

Таблиця 3.1

Визначення параметрів подавання порошку з відстані насадки до дна заспокоювача 40 мм, при діаметрі насадки 10 мм та тиску подавання порошку 0,2 МПа

№ з/п	Р (тиск)	0,2 МПа	0,2 МПа	0,2 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення max, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	81	83	80	81	0,02	2,5
3	Маса порошку на об'єкті гасіння G, кг	0,800	0,815	0,810	0,808	0,007	0,0076
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				1,12*10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,140	0,135	0,125	0,133	0,007	0,0076



Рисунок 3.3 – Проведення експерименту з випробування насадки-заспокоювача

Таблиця 3.2

Визначення параметрів подавання порошку з відстані від насадки до дна заспокоювача 40 мм, при діаметрі насадки 10 мм та тиску подавання порошку 0,6 МПа

№ з/п	Р (тиск)	0,6 МПа	0,6 МПа	0,6 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення тах, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	57	58	70	62	0,08	7,24
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,650	0,655	0,615	0,64	0,015	0,02
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				1,72×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,080	0,070	0,072	0,074	0,006	0,005

Таблиця 3.3

**Визначення параметрів подавання порошку з відстані від насадки до дна
заспокоювача 40 мм, при діаметрі насадки 10 мм та тиску подавання
порошку 1 МПа**

№ з/п	Р (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення max, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	30	33	31	31,3	0,017	1,52
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,520	0,515	0,510	0,515	0,005	0,005
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				2,74×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,034	0,0380	0,037	0,036	0,002	0,002

Таблиця 3.4

**Визначення параметрів подавання порошку з відстані від насадки до дна
заспокоювача 40 мм, при діаметрі насадки 10 мм та тиску подавання
порошку 1,4 МПа**

№ з/п	Р (тиск)	1,4 МПа	1,4 МПа	1,4 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення max, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	27	26	25	26	0,01	1
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,440	0,435	0,420	0,431	0,009	0,01
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				2,76×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,025	0,023	0,028	0,025	0,003	0,002

З проведених досліджень видно, що чим менший тиск в корпусі вогнегасника, тим більше вогнегасного порошку залишається на листі квадратного дека. Установка для гасіння магнію може бути двох типів: з редуктором і без нього. Переважна більшість вогнегасників використовується без редуктора і є закачного типу. У вогнегасник закачується газ-витискувач під тиском $P=1,6$ МПа. Залишок на деку в діапазоні тисків від 0,6 до 1 МПа змінюється незначно від 0,64 кг до 0,515 кг (більше половини маси порошку, яка заправлена у вогнегасник, потрапляє на об'єкт гасіння, залишок порошку в корпусі становить менше 4%). При високих значеннях тиску інтенсивність подавання порошку на гасіння краща. За час подавання порошку тиск в корпусі вогнегасника знижується з 1,6 до 0,25 МПа. Найбільше часу вогнегасник працює при середньому тиску 1,0 МПа. Тому подальші наші дослідження будемо проводити лише при тиску 1 МПа.

Таблиця 3.5

**Визначення параметрів подавання порошку з відстані від насадки до дна
заспокоювача 27,5 мм при діаметрі насадки 10 мм**

№ з/п	P (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення тах, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1		1		
2	Час t, с	33	31	32	32	0,01	1
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,555	0,550	0,556	0,553	0,003	0,003
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V_m , кг/с				$2,88 \times 10^{-2}$		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,040	0,035	0,037	0,0373	0,003	0,0025

Таблиця 3.6

**Визначення параметрів подавання порошку з відстані насадки до дна
заспокоювача 15 мм при діаметрі насадки 10 мм**

№ з/п	Р (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 Мпа	Середнє значення	Відносне відхилення тах, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	29	31	30	30	0,01	1
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,570	0,580	0,575	0,575	0,005	0,005
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				3,19×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,030	0,026	0,024	0,027	0,003	0,004

Таблиця 3.7

**Визначення параметрів подавання порошку з відстані насадки до дна
заспокоювача 10 мм при діаметрі насадки 10 мм**

№ з/п	Р (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 Мпа	Середнє значення	Відносне відхилення тах, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	31	29	30	30	0,017	1
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,583	0,587	0,578	0,583	0,004	0,0045
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				3,23×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,028	0,023	0,032	0,027	0,005	0,004

Дослідження показали, що найкращі результати з потрапляння порошку на квадратне деко отримали при відстані насадки до дна заспокоювача 10 мм та діаметрі насадки 10 мм. Результати при відстані насадки до дна 15 мм несуттєво гірші – 0,583 і 0,575.

Для дослідження рівномірного розпилювання порошку використаємо сітку з вічком 2 мм. Результати занесемо в таблицю 3.8.

Таблиця 3.8

Визначення параметрів подавання порошку з відстані насадки до дна заспокоювача 10 мм з сіткою вічком 2 мм, діаметр на виході 10 мм

№ з/п	P (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 Мпа	Середнє значення	Відносне відхилення тах, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	47	43	45	45	0,02	2
3	Маса порошку на об'єкті гасіння G, кг	0,410	0,395	0,42	0,408	0,013	0,012
4	Залишок порошку в балоні, кг	0,043	0,037	0,04	0,04	0,003	7,5
5	Залишок порошку в заспокоювачі, кг	0,203	0,189	0,225	0,206	0,019	0,018

Параметри часу викиду порошку та маси попадання порошку на об'єкт гасіння гірші, ніж при подаванні без сітки з насадками, розміщеними навіть на відстані 40 мм, 25 мм і т.ін. Тому надалі цей варіант з різними сітками не будмо досліджувати.

Таблиця 3.9

**Визначення параметрів подавання порошку при відстані насадки до дна
15 мм, діаметр на виході 7,5 мм**

№ з/п	Р (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення max, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	36	37	35	36	0,01	1
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,477	0,482	0,480	0,48	0,002	0,0025
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				2,22×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,023	0,027	0,025	0,025	0,002	0,002

Таблиця 3.10

**Визначення параметрів подавання порошку при відстані насадки до дна 15
мм, діаметр на виході 5 мм**

№ з/п	Р (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення max, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	39	41	40	40	0,01	2,9
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,427	0,429	0,43	0,429	0,001	0,001
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				1,78×10 ⁻²		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,025	0,028	0,027	0,027	0,001	0,015

Бачимо, що чим більший діаметр насадки, тим більше порошку потрапляє на об'єкт гасіння. Спробуємо використати насадку у вигляді дифузора діаметром 16 мм. Це максимальний розмір насадки у порошкових вогнегасників.

Таблиця 3.11

**Визначення параметрів подавання порошку при відстані насадки до дна
10 мм, діаметр на виході дифузора 16 мм**

№ з/п	Р (тиск)	1 МПа	1 МПа	1 МПа	Середнє значення	Відносне відхилення max, %	Середнє квадратичне відхилення, %
1	Загальна вага, кг	1	1	1	1		
2	Час t, с	31	32	30	31	0,01	1
3	Маса порошку на об'єкті гасіння, G, кг	0,634	0,628	0,63	0,63	0,004	0,003
4	Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с				$3,38 \times 10^{-2}$		
5	Залишок порошку в балоні, кг	0,020	0,022	0,024	0,022	0,002	0,002

Визначимо оптимальний тиск при подаванні порошку через заспокоювач, оптимальну відстань насадки від дна заспокоювача, проведемо дослідження діаметра та форми насадки, потім виготовляємо оптимальну конструкцію заспокоювача та гасимо макетну пожежу. Основними елементами у насадці-заспокоювачі для подачі вогнегасних порошоків для гасіння магнію є відбивач, сопло або дифузор. В попередніх дослідженнях визначено, що найбільше порошку попадає на поверхню при тиску на соплі 0,2 МПа і менше. Щоб зменшити додатково швидкість потоку порошку, краще застосовувати дифузор з вихідним діаметром 12–16 мм. Оптимальна відстань від торця сопла (дифузора) до поверхні відбивача становить 10–15 мм [18].

3.2. Планування експерименту для визначення оптимальної конструкції насадки-заспокоювача

Повним факторним експериментом (ПФЕ) називається такий експеримент, при реалізації якого визначаються параметри оптимізації при всіх можливих поєднаннях рівнів варіювання факторів. Якщо ми маємо справу з k факторами, кожний з яких може встановлюватись на q рівнях, то для того, щоб здійснити повний факторний експеримент необхідно поставити $N = q^k$. Найбільшого розповсюдження набули отримали експерименти, в яких фактори варіюють на 2 рівнях, тобто експерименти типу 2^k .

Планування, проведення і обробка результатів ПФЕ складається з таких обов'язкових етапів :

- кодування факторів;
- складання план-матриці експерименту;
- рандомізація дослідів;
- реалізація плану експерименту;
- перевірка відтворюваності дослідів;
- перевірка адекватності лінійної моделі;
- оцінка значущості коефіцієнтів регресії.

Відповідно до завдань роботи потрібно встановити функцію відгуку у вигляді поліноміальної математичної моделі за результатами експериментальних досліджень впливу діаметра насадки одностороннього заспокоювача в межах $D = 5...16\text{мм}$, відстані від відбивача в межах $L = 1...4\text{см}$ та тиску в межах $P = 0,2...1\text{ МПа}$ на кількість порошку, яка потрапляє на об'єкт гасіння.

Оскільки на проведення дослідження впливає 3 фактори, то проводимо дробовий факторний експеримент типу 2^{3-1} .

Навіть наймізерніша інформація про процес дає можливість припустити, що деякі з взаємодій факторів незначущі в тій обмеженій частині факторного

простору, в якій передбачається проведення експерименту. У вузьких межах експериментування поверхня відбиття може бути в дуже багатьох випадках представлена поліномом другого ступеня. При цьому модель процесу повинна мати відмінні від нуля коефіцієнти при лінійних членах b_i , парних взаємодіях b_{ij} і квадратичних членах b_{ii} .

Якщо вплив деякої взаємодії признається настільки малим, що коли можна знехтувати, то природно, що коефіцієнт регресії при такій взаємодії значущо не відрізнятиметься від нуля. Це дозволяє використовувати відповідний стовпець розширеної матриці для оцінки впливу додаткового фактора.

Кодування факторів

Кодування факторів необхідне для перевodu натуральних факторів в безрозмірні величини, щоб мати нагоду побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Для перевodu натуральних змінних в кодові X_1 заповнюють таблицю кодування змінних на двох рівнях (табл. 1). Як нульовий рівень факторів звичайно вибирають центр інтервалу, в якому передбачається вести експеримент.

Таблиця 3.12

Кодування змінних на двох рівнях

Інтеграл варіювання та рівень факторів	Діаметр насадки D, мм	Відстань від відбивача L, см	Тиск P, МПа
Кодове позначення	x_1	x_2	x_3
Нульовий рівень, $x_{i0} = 0$	10,5	2,5	0,6
Верхній рівень, $x_i = +1$	16	4	1
Інтервал варіювання, δ_i	5,5	1,5	0,4
Нижній рівень, $x_i = -1$	5	1	0,2

Зв'язок між кодовим і натуральним виразом фактора задається формулою:

$$x = \frac{x_1 - x_{i0}}{\delta_i}, \quad (3.1)$$

де x_i – натуральне число;

x_{i0} - значення i -го фактора на нульовому рівні;

δ_i – інтеграл варіювання i -го фактора.

$$x_1 = \frac{D - 10,5}{5,5} = 0,8D - 1,9$$

$$x_2 = \frac{L - 2,5}{1,5} = 0,6L - 1,67$$

$$x_3 = \frac{P - 0,6}{0,4} = 2,5P - 1,5$$

$$x_1 x_2 = (0,18D - 1,9)(0,67L - 1,67) = 0,12DL - 1,27L - 0,3D + 3,17$$

$$x_1 x_3 = (0,18D - 1,9)(2,5P - 1,5) = 0,45DP - 0,27D - 4,75P + 2,85$$

$$x_2 x_3 = (0,67L - 1,67)(2,5P - 1,5) = 1,68LP - 4,18P - L + 2,51$$

Складання план-матриці експерименту

Складання план-матриці експерименту здійснюється таким чином: для x_1 – рівні чергуються в кожному досліді, для x_2 паралельних – через два і т.д. Для нашого випадку, коли $k=3$ необхідно виконати вісім дослідів, що наведено у табл. 3.13.

Розширена матриця планування факторного експерименту 2^{3-1} (піврепліка) та результати дослідів

Таблиця 3.13

Кількість та кодування дослідів

№ з/п дослідів	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	y_1	y_2	$y = \frac{y_1 + y_2}{2}$
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,508	0,512	0,510
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,663	0,671	0,667
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,442	0,438	0,440
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,690	0,696	0,693

Рандомізація дослідів

Природно, що на проведення нашого дослідів впливають не тільки x_1, x_2 та x_3 , але ще ряд чинників, які можуть бути взагалі невідомі досліднику. Для того, щоб внести елемент випадковості впливу цих факторів на результат експерименту, а це необхідно для обґрунтованого використання апарату математичної статистики, встановлюється випадковий порядок постановки дослідів у часі.

Для здійснення рандомізації користуються таблицями випадкових чисел, за допомогою яких виконують нібито витягання номерів з урни. В даному прикладі отримали таку послідовність проведення дослідів:

4; 2; 1; 3; 2; 4; 1; 3.

В цій послідовності кожне поєднання рівнів (номери дослідів) зустрічаються двічі. Паралельні досліди передбачаються для оцінки відтворюваності процесу і проведення статистичних оцінок.

Реалізація плану експерименту

Реалізацію плану експерименту представлено в таблиці 2. Приведений план експерименту є розширеною матрицею, оскільки введено додаткові стовпці x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 , що дозволяє оцінити коефіцієнт регресії при взаємодії факторів. Стовпець x_2x_3 повністю повторює стовпець x_1 ; стовпець x_1x_3 точно такий, як стовпець x_2 ; стовпець x_1x_2 має ті ж ознаки, що і стовпець x_3 . У цьому випадку рівняння регресії буде мати вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (3.2)$$

Якщо коефіцієнти при взаємодіях не дорівнюють нулю, то визначені коефіцієнти регресії будуть оцінками дії сумісних ефектів (табл. 3.13):

b_1 буде оцінювати сумісну дію факторів x_1 та x_2x_3 ;

b_2 буде оцінювати сумісну дію факторів x_2 та x_1x_3 ;

b_3 буде оцінювати сумісну дію факторів x_3 та x_1x_2 .

Таким чином дробовий факторний експеримент, який виконується за планом, відображеним у таблиці 3.13, не дозволяє визначати незалежно один від одного вплив лінійних ефектів і ефектів взаємодії факторів.

Генеруюче співвідношення і визначальний контраст

При побудові планів дробового факторного експерименту дуже важливо знати як будуть змішані між собою ефекти. Умови змішування ефектів в матриці дробового факторного експерименту задаються так званим визначальним контрастом. Таким контрастом для прикладу, який розглядається, згідно із даними табл. 3.13 є:

$$x_3 = x_1 x_2. \quad (3.3)$$

Вираз (3.3) називають генеруючим співвідношенням. Помножимо вираз (3.3) на x_3 та отримаємо:

$$x_3^2 = x_1 x_2 x_3 \quad (3.4)$$

Враховуючи, що $x_3^2 = 1$ незалежно від рівня фактора (+1 або -1), можна записати

$$1 = x_1 x_2 x_3 \quad (3.5)$$

Цей вираз і називають визначальним контрастом. На підставі цього виразу визначаємо умови змішування. Для цього вираз (3.5) множимо на кожний фактор і визначаємо їх змішування:

$$\text{для } x_1 \text{ маємо } x_1 = x_1^2 x_2 x_3 = x_2 x_3;$$

$$\text{для } x_2 \text{ маємо } x_2 = x_1 x_2^2 x_3 = x_1 x_3;$$

$$\text{для } x_3 \text{ маємо } x_3 = x_1 x_2 x_3^2 = x_1 x_2 \text{ (тому що } x_i^2 = 1 \text{)}.$$

Повний факторний експеримент може бути поділений на репліки різної дрібності з максимальною визначальною спроможністю відносно лінійних ефектів.

Вплив кількості взаємодій на тип експерименту.

Для позначення дробового факторного експерименту використовують запис виду $2k$ -р, де p – кількість взаємодій в повному факторному експерименті типу $2k$, яке підлягає заміні новими (додатковими) факторами. Якщо $p = 1$, то

експеримент типу $2k-1$ називається півреплікою від повного факторного експерименту типу $2k$. При $p = 2$ маємо чвертьрепліку і т. д.

Перевірка відтворюваності дослідів

Відтворюваність дослідів перевіряється за критерієм Кохрена.

Для цього визначаємо дисперсії розсіювання результатів дослідів за залежністю:

$$s_{pi}^2 = \frac{\Delta_i^2}{2}, \quad (3.6)$$

де Δ – різниця між двома паралельними дослідями; $\Delta_i = y_{1i} - y_{2i}$

$$\delta_1 = 0,512 - 0,508 = 0,004; \quad s_{p1} = \frac{(0,004)^2}{2} = 0,000008$$

$$\delta_2 = 0,671 - 0,663 = 0,008;$$

$$s_{p2} = \frac{(0,008)^2}{2} = \frac{0,00064}{2} = 0,000032$$

$$\delta_3 = 0,442 - 0,438 = 0,004; \quad s_{p3} = \frac{(0,004)^2}{2} = 0,000008$$

$$\delta_4 = 0,696 - 0,690 = 0,006; \quad s_{p4} = \frac{(0,006)^2}{2} = 0,000018$$

Після цього визначаємо значення критерію Кохрена

$$G = \frac{s_{pi \max}^2}{\sum_{i=1}^N s_{pi}^2} \leq G_{(0,05; f_n f_B)} \quad (3.7)$$

де s_{pi}^2 – дисперсія, яка характеризує розсіювання результатів дослідів на відповідному поєднанні рівнів факторів;

$$s_{pi \max}^2 - \text{найбільша з дисперсій у рядках плану } s_{pi \max}^2 = 0,000032;$$

$G_{(0,05; f_n f_B)}$ – табличне значення критерію Кохрена при 5% рівні значущості (табл. 3.14);

$f_n = N = 4$ – число незалежних дослідів;

$f_B = m - 1$ – число ступенів вільності кожної оцінки;

m – число паралельних (повторних) дослідів (в нашому випадку $m = 2$)

Тоді:

$$G = \frac{0,000032^2}{0,000008 + 0,000032 + 0,000008 + 0,000018} = \frac{0,324}{0,66} = 0,1552$$

$$G = 0,1552 < G(0,05;4;1)=0,9065$$

Відтворюваність процесу забезпечується.

При цьому визначаємо дисперсію відтворюваності (похибку дослід):

$$S_B^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_p^2}{N} = \frac{0,08 + 0,32 + 0,08 + 0,18}{4} = \frac{0,66}{4} = 0,165$$

Таблиця 3.14

Значення $G_{(0,05;f_n,f_B)}$

f_n	f_B		
	1	2	3
2	0,9985	0,9750	0,9392
3	0,9669	0,8709	0,7977
4	0,9065	0,7679	0,6841
5	0,8412	0,6838	0,5981
6	0,7808	0,6161	0,5321
7	0,7271	0,5612	0,4800
8	0,6798	0,5157	0,4377

Визначення коефіцієнтів регресії

У випадку, коли процес відтворюється, розраховуємо коефіцієнти регресії b_0, b_1, b_2 .

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_{icер}}{N} \quad (3.8)$$

$$b_0 = \frac{0,510 + 0,667 + 0,440 + 0,693}{4} = 0,578$$

$$b_{23} = b_1 = \frac{(-1) \times 0,51 + (+1) \times 0,667 + (-1) \times 0,44 + (+1) \times 0,693}{4} = 0,41$$

$$b_{13} = b_2 = \frac{(-1) \times 0,51 + (-1) \times 0,667 + (+1) \times 0,44 + (+1) \times 0,693}{4} = -0,044$$

$$b_{12} = b_3 = \frac{(+1) \times 0,51 + (-1) \times 0,667 + (-1) \times 0,44 + (+1) \times 0,693}{4} = 0,096$$

В цьому випадку отримуємо наступне рівняння:

$$y = 0,578 + 0,41x_1 - 0,44x_2 + 0,096x_3 + 0,096x_1x_2 - 0,044x_1x_3 + 0,41x_2x_3 \quad (3.9)$$

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії

Значущість коефіцієнтів регресії оцінюється за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_B)} \frac{S_E}{\sqrt{N}} \quad (3.10)$$

де $t_{(0,05;f_B)}$ - табличне значення критерію Стьюдента при 5% рівні значущості з числом ступенів вільності $f_B=N$ (табл.3.15)

Таблиця 3.15

Значення $t_{(0,05;f_B)}$

$f_B=N$	$t_{(0,05;f_B)}$
1	12,71
2	4,30
3	3,18
4	2,78
5	2,57
6	2,45
7	2,36
8	2,31

Для нашого випадку $t_{(0,05;4)} = 2,78$. Тоді $\Delta b = 2,78 \frac{\sqrt{0,165}}{2} = 0,565$

При такому значенні коефіцієнтів значущості приймаємо рішення залишити тільки значущі коефіцієнти.

Кінцевий вигляд моделі буде такий:

$$y = 0,578 + 0,41x_1 - 0,44x_2 + 0,41x_2x_3 \quad (3.10)$$

Перевірка адекватності лінійної моделі

Адекватність лінійної моделі перевіряється за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_B^2} \leq F_{(0,05; f_{ад} f_B)}, \quad (3.11)$$

де $s_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{сер} - y_{мод,i})^2}{N - m - 1}, \quad (3.12)$$

$N=4$ – число незалежних оцінок дисперсії (кількість незалежних дослідів);

$m=2$ – число паралельних дослідів (число повторних дослідів);

$M_{сер}$ – середнє значення відгуку в i -му досліді;

$M_{мод,i}$ – розраховане за моделлю значення в i -му досліді;

$F_{(0,05; f_{ад} f_B)}$ – критерій Фішера при 5% рівні значущості з числом ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ад} = N - m - 1$ та числом ступенів вільності дисперсії відтворюваності $F_B = N$ (табл. 3.16).

Визначаємо:

$$M_{мод,1} = 0,578 + 0,41(-1) - 0,44(-1) + 0,41(-1) = 0,198$$

$$M_{мод,2} = 0,578 + 0,41(+1) - 0,44(-1) + 0,41(+1) = 1,838$$

$$M_{мод,3} = 0,578 + 0,41(-1) - 0,44(+1) + 0,41(-1) = -0,682$$

$$M_{мод,4} = 0,578 + 0,41(+1) - 0,44(+1) + 0,41(+1) = 0,958$$

Тоді $s_{ад}^2$ буде:

$$s_{ад}^2 = \frac{(0,51 - 0,198)^2 + (0,667 - 1,838)^2 + (0,44 - (-0,682))^2 + (0,693 - 0,958)^2}{4 \times 2 \times 1} = 0,097 + 1,37 + 1,259 + 0,07 = 2,796 \quad (3.13)$$

Критерій Фішера:

$$F = \frac{s_B^2}{s_{ад}^2} = \frac{0,165}{2,796} = 0,06 < F_{(0,05,1,4)} = 7,7086, \quad (3.14)$$

тобто модель адекватна.

Таблиця 3.16

Значення $F_{(0,05;f_{ад}f_B)}$

$f_B=N$	$f_{ад} = N - m - 1$	
	1	2
1	161,45	199,5
2	18,513	19,0
3	10,128	9,5521
4	7,7086	6,9443
5	6,6079	5,7861
6	5,9874	5,1433
7	5,5914	4,7374
8	5,3177	4,4590

Перехід від кодових значень до натуральних.

$$M = 0,578 + 0,41 \times (0,18D - 1,9) - 0,44 \times (0,67L - 1,67) + 0,41 \times (1,68LP - 4,18P - L + 2,51)$$

$$M = 0,578 + 0,0738D - 0,779 - 0,2935L + 0,7348 + 0,6888LP - 1,7138P - 0,41L + 1,0291$$

В кінцевому вигляді наведена залежність матиме вигляд:

$$M = 1,5629 + 0,0738D - 0,7035L + 0,6888LP - 1,7138P$$

На підставі отриманої залежності будемо графічні залежності:

1) $M = f(L)$ при D та P на нульовому рівні

($D = 10,5 \text{ мм}; P = 0,6 \text{ МПа}$).

2) $M = f(D)$ при L та P на нульовому рівні ($L = 2,5 \text{ см}; P = 0,6 \text{ МПа}$).

3) $M = f(P)$ при d та L на нульовому рівні ($D = 10,5 \text{ мм}; L = 2,5 \text{ см}$).

Визначаємо кількість точок на графіку для отриманих залежностей:

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_{\max}}{L_{\min}}} + 3 = \sqrt{\frac{4}{1}} + 3 = 5;$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{D_{max}}{D_{min}}} + 3 = \sqrt{\frac{16}{5}} + 3 = 5;$$

$$N_3 = \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{min}}} + 3 = \sqrt{\frac{1}{0,2}} + 3 = 6;$$

Визначаємо крок для отриманих залежностей :

$$I_1 = \frac{L_{max} - L_{min}}{N_1 - 1} = \frac{4 - 1}{4} = 0,75 \text{ см};$$

$$I_2 = \frac{D_{max} - D_{min}}{N_2 - 1} = \frac{16 - 5}{4} = 2,75 \text{ мм};$$

$$I_3 = \frac{P_{max} - P_{min}}{N_3 - 1} = \frac{1 - 0,2}{5} = 0,16 \text{ МПа};$$

Складаємо дані для отриманих залежностей :

$$1) \quad L_1 = 1 \text{ см}; L_2 = 1,75 \text{ см}; L_3 = 2,5 \text{ см}; L_4 = 3,25 \text{ см}; L_5 = 4 \text{ см}.$$

$$M = 1,5629 + 0,0738 * 10,5 - 0,7035 * 1 + 0,6888 * 1 * 0,6 - 1,7138 * 0,6 = 0,98$$

$$M = 1,5629 + 0,0738 * 10,5 - 0,7035 * 1,75 + 0,6888 * 1,75 * 0,6 -$$

$$1,7138 * 0,6 = 0,8$$

$$M = 1,5629 + 0,0738 * 10,5 - 0,7035 * 2,5 + 0,6888 * 2,5 * 0,6 - 1,7138 * 0,6 = 0,58$$

$$M = 1,5629 + 0,0738 * 10,5 - 0,7035 * 3,25 + 0,6888 * 3,25 * 0,6 -$$

$$1,7138 * 0,6 = 0,37$$

$$M = 1,5629 + 0,0738 * 10,5 - 0,7035 * 4 + 0,6888 * 4 * 0,6 - 1,7138 * 0,6 = 0,15$$

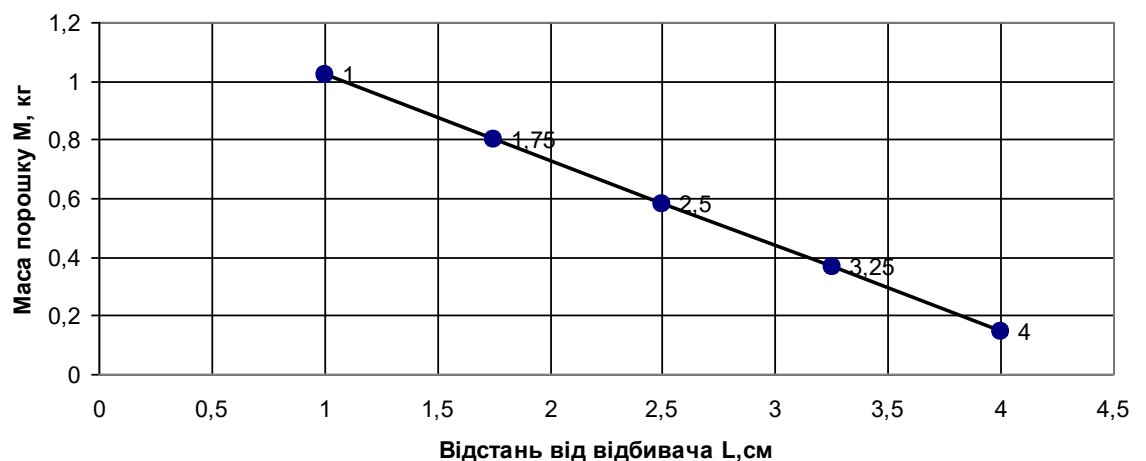


Рисунок 3.4 – Залежність маси порошку M до відстані від відбивача L

$$2) \quad D_1 = 5 \text{ мм}; D_2 = 7,75 \text{ мм}; D_3 = 10,5 \text{ мм}; D_4 = 13,25 \text{ мм}; D_5 = 16 \text{ мм};$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,6 - 1,7138*0,6 = 0,18$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*7,75 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,6 - 1,7138*0,6 = 0,38$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*10,5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,6 - 1,7138*0,6 = 0,58$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*13,25 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,6 - 1,7138*0,6 = 0,78$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*16 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,6 - 1,7138*0,6 = 0,9$$

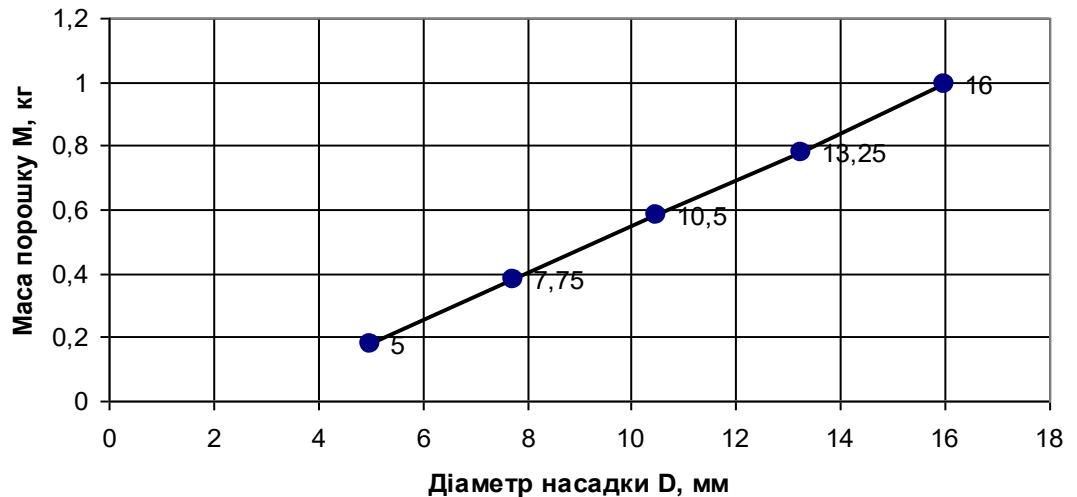


Рисунок 3.5 – Залежність маси порошку M від діаметра насадки D

$$P_1 = 0,2 \text{ МПа}; P_2 = 0,36 \text{ МПа}; P_3 = 0,52 \text{ МПа}; P_4 = 0,68 \text{ МПа}; P_5 = 0,84$$

МПа;

$$P_6 = 1 \text{ МПа.}$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*10,5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,2 - 1,7138*0,2 = 0,580$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*10,5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,36 - 1,7138*0,36 = 0,582$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*10,5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,52 - 1,7138*0,52 = 0,583$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*10,5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,68 - 1,7138*0,68 = 0,585$$

$$M = 1,5629 + 0,0738*10,5 - 0,7035*2,5 + 0,6888*2,5*0,84 - 1,7138*0,84 = 0,586$$

$$M = 1,5629 + 0,0738 \cdot 10,5 - 0,7035 \cdot 2,5 + 0,6888 \cdot 2,5 \cdot 1 - 1,7138 \cdot 1 = 0,587$$

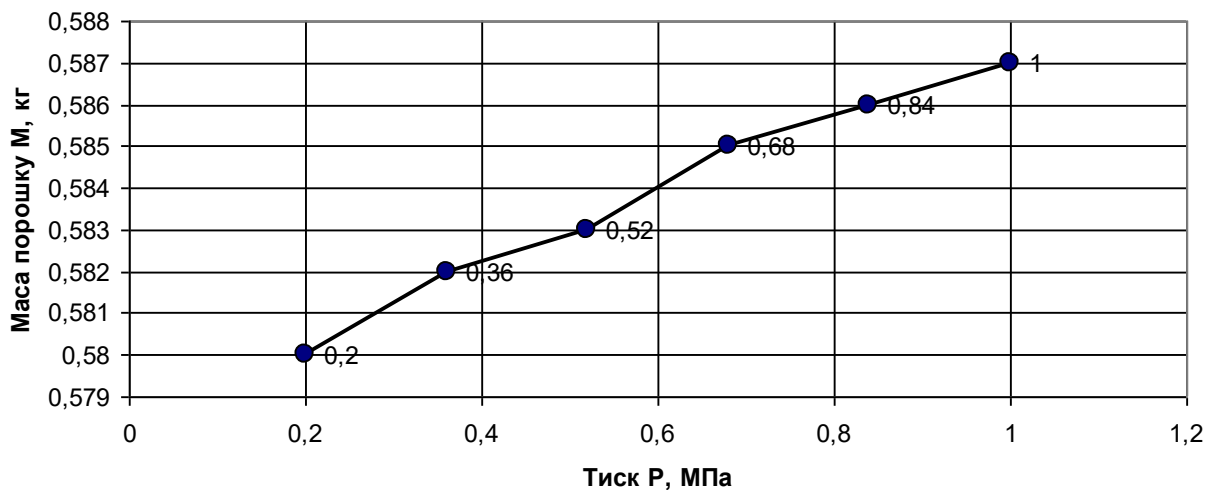


Рисунок 3.6 – Залежність маси порошку М від тиску Р

Аналізуючи графічні залежності можна зробити такі висновки :

1) з графіка видно (рис. 3.4), що на кількість вогнегасного порошку, який покриває поверхню горіння, суттєво впливає відстань від відбивача одностороннього заспокоювача. При зменшенні відстані від відбивача збільшується кількість порошку на об'єкті гасіння

$$(D = 10,5 \text{ мм}; P = 0,6 \text{ МПа}).$$

2) Аналізуючи графік на рис. 3.5 спостерігаємо, що при збільшенні діаметра насадки одностороннього заспокоювача збільшується маса порошку, яка потрапляє на об'єкт гасіння ($L = 2,5 \text{ см}; P = 0,6 \text{ МПа}$).

3) На рис. 3.6 зображено графік залежності маси порошку від тиску при сталих відстані від відбивача та діаметрі насадки

4) ($D = 10,5 \text{ мм}; L = 2,5 \text{ см}$). Спостерігається несуттєве збільшення маси порошку на об'єкті гасіння при збільшенні тиску;

5) Згідно планування експериментів для визначення оптимальної конструкції насадки-заспокоювача необхідно провести не менше 8 дослідів.

3.3. Дослідження насадок-заспокоювачів для гасіння пожеж класу D

Для теоретичних досліджень насадки-заспокоювача використаємо програмний продукт COSMOSFloWorks [10, 48, 49], який призначений для розв'язування прикладних задач в області аерогідродинаміки та теплопередачі шляхом моделювання відповідних фізичних процесів. COSMOSFloWorks є повністю інтегрованим додатком CAD-системи SolidWorks і може ефективно використовуватись для розрахунків силової (стаціонарної та нестаціонарної) взаємодії між твердими тілами та потоком рідини (газу) у випадку їх взаємного руху; впливу різних фізичних факторів на рух текучого середовища; вирішення проблем теплообміну; розрахунку руху твердих і/або рідких частинок в потоці газу або рідини.

Математична модель будується шляхом геометричного проектування реального об'єкта в середовищі SolidWorks з подальшим автоматичним обміном необхідною інформацією між COSMOSFloWorks та SolidWorks. Рух текучого середовища і теплообмін між тілами моделюється з допомогою рівнянь Нав'є–Стокса, які в нестаціонарній формі описують закони збереження маси, імпульсу та енергії.

Ця система рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії нестаціонарного просторового потоку в Декартовій системі координат $(x_i, i = 1, 2, 3)$ набуває такого виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) &= S_k u_k + Q_H, \end{aligned} \quad (3.15)$$

де t – час; u – швидкість текучого середовища; ρ – густина текучого середовища; S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища; E – повна енергія одиничної маси текучого середовища; Q_H – тепло, що виділяється джерелом тепла в одиничному об'ємі текучого середовища; τ_{ik} – тензор в'язких напружень зсуву; q_i – дифузійний тепловий потік, нижні індекси означають підсумовування за трьома координатними напрямками.

Крім цього, використовуються рівняння стану текучого середовища, а залежність теплопровідності компонентів середовища від температури описується відомими емпіричними формулами.

Дифузійний тепловий потік моделюється з допомогою рівняння

$$q_i = - \left(\frac{\mu_i}{Pr} + \frac{\mu_i}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (3.16)$$

Для стискуваних середовищ (газів) використовується рівняння стану такого виду:

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (3.17)$$

де $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – вектор концентрацій компонентів текучого середовища.

Для газів використовується рівняння стану ідеального газу $\rho = \frac{P}{RT}$, де R –

газова стала модельованого газу, яка для суміші газів визначається як

$R = R_{унів.} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{M_i}$, де M_i – молекулярна маса i -го компонента газу. Для врахування

залежності густини від температури використовується рівняння

$$\rho = \left[\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\rho_{0i}} (1 + \beta_{Ti} (T - T_0)) \right]^{-1}, \quad \dots \dots \dots (3.18)$$

де β_{Ti} – коеф. об'ємного теплового розширення i -го компонента, ρ_{0i} – густина i -го компонента при деякій температурі T_0 .

Вплив гравітації моделюється з допомогою члена S_i , що входить в (3.15) як зовнішня масова сила:

$$S_i = -\rho g_i, \quad (3.19)$$

де g_i – i -та складова (вздовж i -тої осі системи координат) вектора гравітаційного прискорення.

Значний інтерес для нашого випадку становлять двофазові середовища, а саме – потік газу із твердими частинками. Двофазові потоки середовища із рідкими або твердими частинками моделюються як рух цих частинок в стаціонарному потоці газу. Тобто, математична модель ґрунтується на припущенні, що силовий та тепловий вплив частинок на рух газу неістотний. Таке припущення правильне лише в тому випадку, коли масова концентрація частинок в двофазному середовищі не перевищує 30 %. Визначення опору частинок ґрунтується на тому, що їх форма є сферичною. Температура частинок визначається із теплообміну з навколишнім середовищем, а оскільки маса частинки є незмінною, то змінюється її розмір. Якщо необхідно, то можна врахувати дію гравітації. Взаємодія частинок з поверхнями твердих тіл моделюється як повне прилипання (краплі рідини) або як відбивання (ідеальне та неідеальне), властиве твердим тілам. Виходячи з цього розраховуються траєкторії руху частинок. Також можна визначати як процес налипання частинок, так і ерозію поверхонь.

Для розв'язку задачі безперервна нестаціонарна математична модель дискретизується як за простором, так і за часом. Для цього вся розрахункова область покривається сіткою, грані чарунок якої паралельні до координатних площин Декартової системи координат. Сітка генерується автоматично з можливістю впливу на розміри чарунок для покращення точності розрахунку. Розрахунки здійснюються за допомогою методу скінченних об'ємів [49].

Використовуючи методику побудови моделей конструкцій в середовищі SolidWorks [10, 11], побудуємо модель відомої конструкції заспокоювача вогнегасника [12-17], конструкційна схема якої представлена на рис. 3.7.

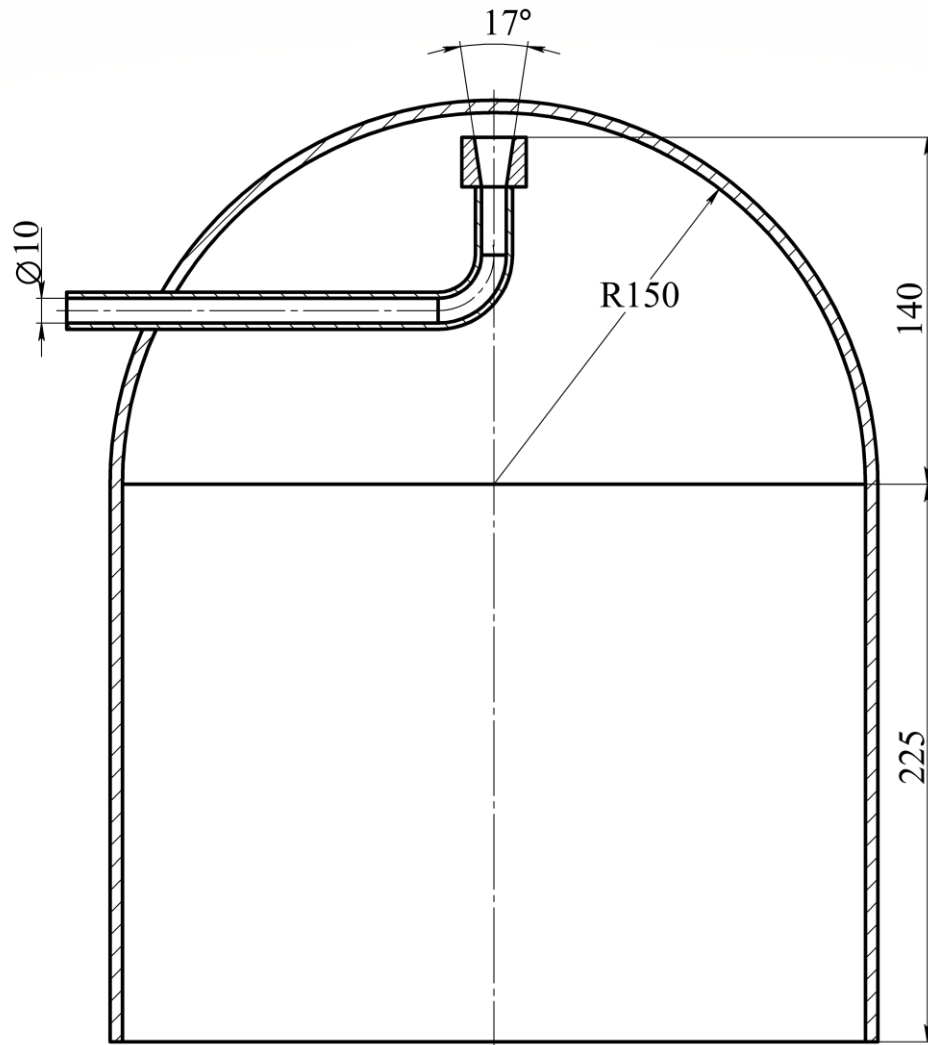
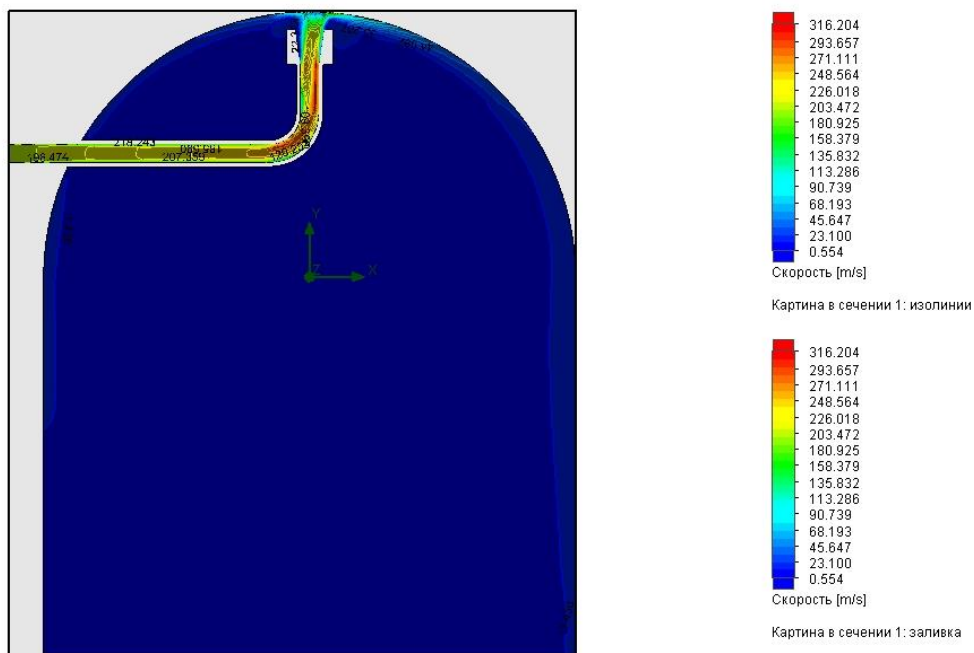


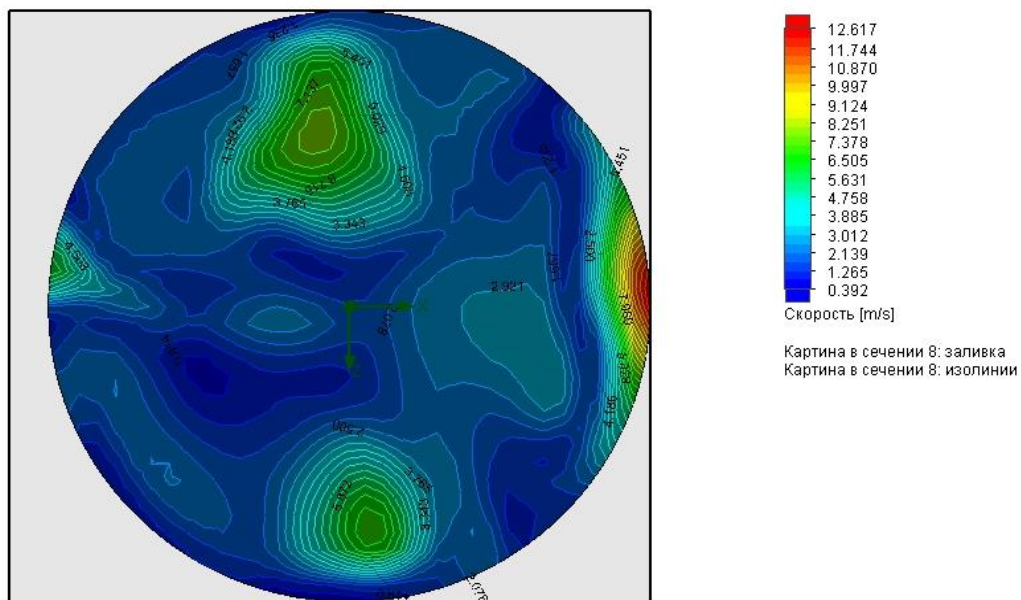
Рисунок 3.7 – Конструкційна схема заспокоювача для подавання вогнегасного порошку (розрахункова модель)

Стиснутий робочий газ (азот) подається під тиском 0,2 МПа на вхід моделі (Ø10 мм) разом із дрібнодисперсним (100 мкм) порошком кухонної солі (не більше 30 %), утворюючи двофазове рухоме середовище, тверда фаза якого не впливає на газоподібну. Для конструювання насадки за допомогою математичної моделі для встановлення початкових умов визначався тиск на виході з насадки за допомогою манометра ТМ-520Р. Газ, виходячи із

дифузорної насадки, вдаряється в верхню точку сферичного корпусу, розтікається по його об'єму і виходить назовні (рис. 3.8).



a



б

Рисунок 3.8 – Хромограма витікання газу: *a* – вертикальний симетричний переріз

б – горизонтальний переріз біля виходу

Як видно із рис. 3.8 *a*, максимальною швидкість газу (310 м/с) є на виході із трубки, а потім, в процесі його розширення в корпусі заспокоювача, швидкість зменшується і на виході досягає досить малих значень (від 0,5 до 12,5 м/с – рис. 3.8 *б*). Як видно із хромограм, швидкість газу в об'ємі корпусу заспокоювача є нерівномірною, а його розповсюдження (рис. 3.9) має турбулентний характер.

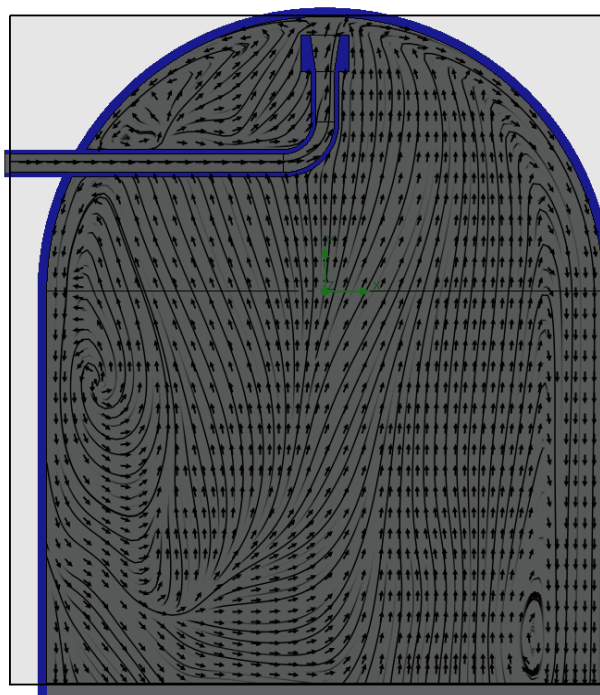


Рисунок 3.9 – Траєкторії руху газу всередині корпусу заспокоювача

На рис. 3.10 зображено траєкторії руху частинок твердої фази двофазового середовища (дрібнодисперсних частинок кухонної солі). Як видно із рис. 3.10, швидкість твердих частинок відрізняється від швидкості газу і у місці максимальних значень становить 245 м/с. На виході із корпусу заспокоювача швидкість частинок є різною і лежить в діапазоні від 2,2 до 110 м/с. Причину цього видно на рис. 3.10. Траєкторії частинок із більшими значеннями швидкості є прямими, а траєкторії із меншими значеннями – ламаними. Тобто, швидкість частинки гаситься внаслідок її блукання всередині об'єму корпусу заспокоювача вогнегасника. Причиною є: тертя частинки об тверду поверхню;

неідеальне відбивання частинок від твердої поверхні; зіткнення частинок між собою та тертя з турбулентними потоками газу. Слід відмітити, що цей процес має імовірнісний характер і статистика траєкторій руху частинок є допустимою в результатах обчислень.

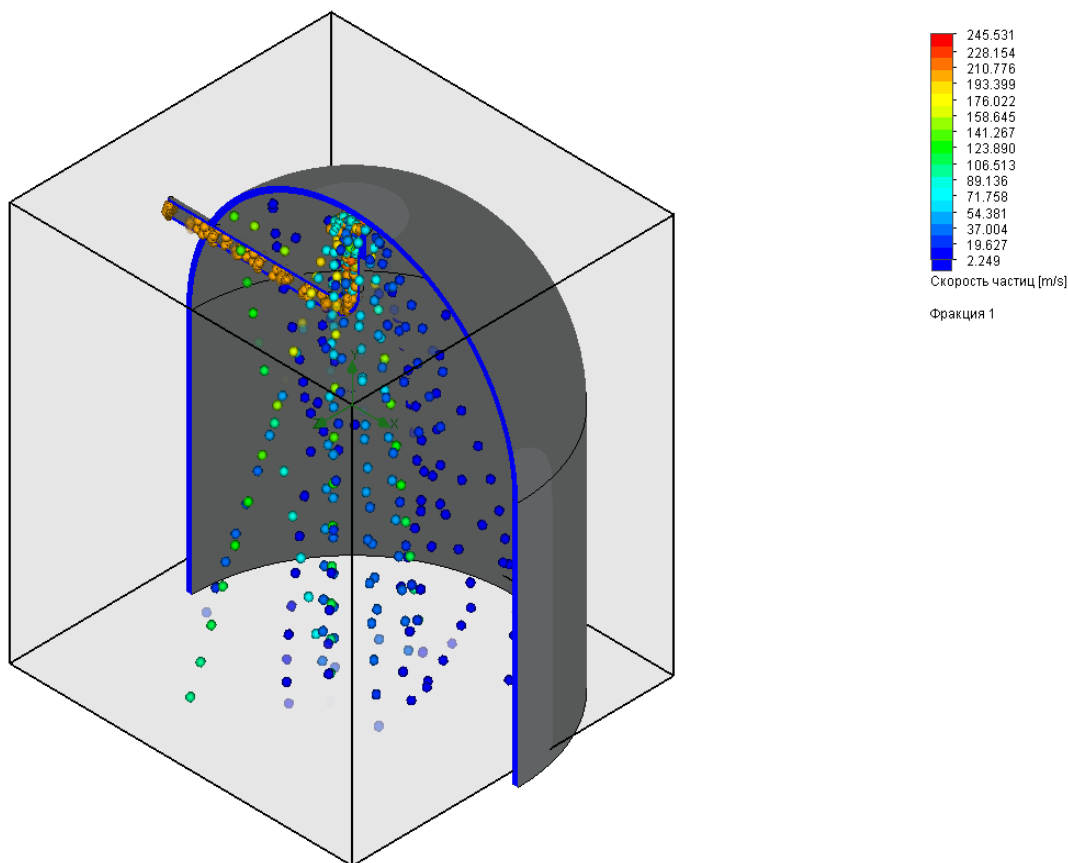


Рисунок 3.10 – Траєкторії руху твердих частинок всередині заспокоювача

Якщо міркування щодо гасіння швидкості руху твердої фази середовища є правильними, то слід змінити геометрію відбивача частинок, наприклад, із сферичної на еліптичну, конструкційна схема якого зображена на рис. 3.11.

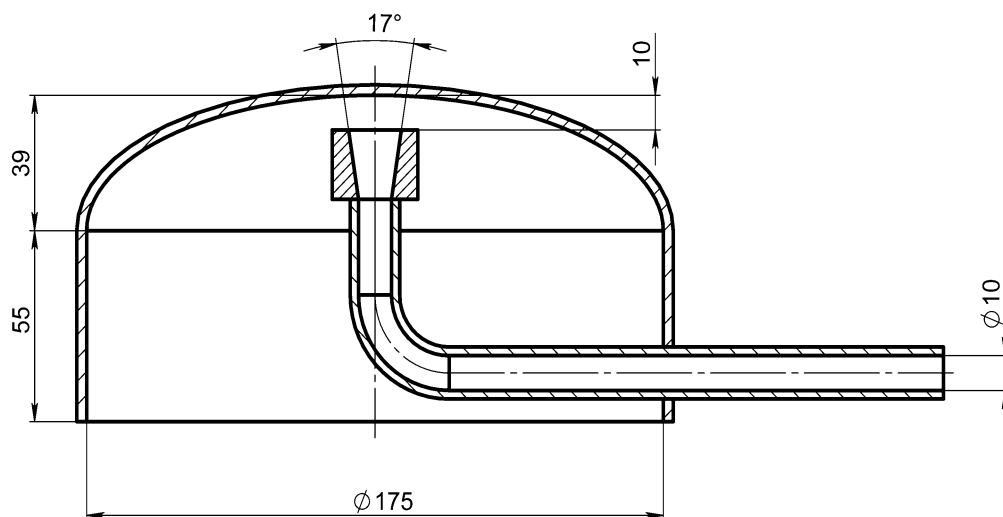
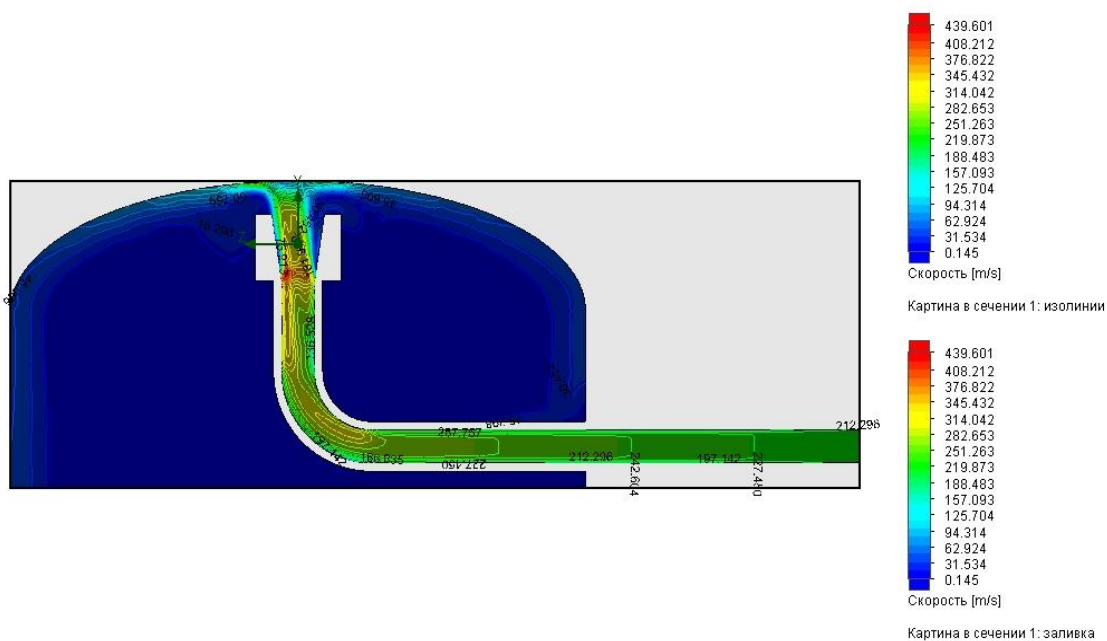


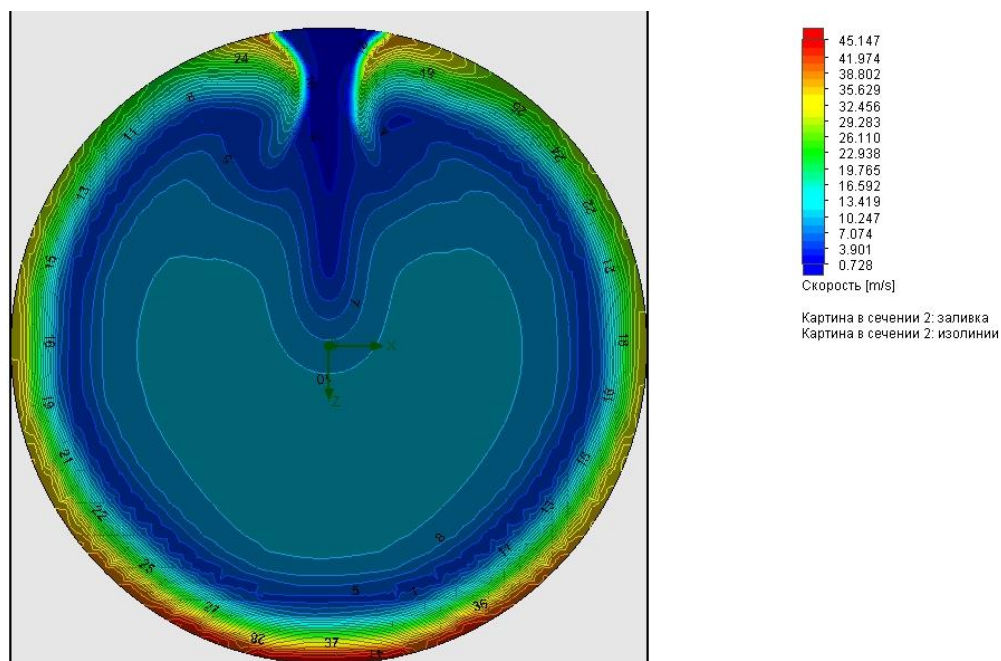
Рисунок 3.11 – Розрахункова модель заспокоювача із еліптичним верхом

За основу відбивача частинок взято частину корпусу вогнегасника ВП-6, а саме – еліптичне днище із циліндричною частиною корпусу, в отворі стінки якого вмонтовано вхідну трубку з дифуззором.

Результати розрахунку такої моделі представлено на рис. 3.12–3.14.



a



б

Рисунок 3.12 – Хромограма витікання газу: *a* – вертикальний симетричний переріз *б* – горизонтальний переріз біля виходу

На рис. 3.12 *a* представлено хромограму витікання цього ж газу із дифузора під тиском 0,2 МПа, який вдаряється в еліптичне днище. Як видно із рис. 3.12 *a*, максимальне значення швидкості зменшується на 25 %. Це можна пояснити падінням опору внаслідок зміни геометрії стінки, в яку вдаряється потік газу.

На рис. 3.12 *б* показано хромограму витікання газу із корпусу насадки (переріз повернуто на 90° за годинниковою стрілкою) у найнижчій його частині. Як видно із хромограми, максимальне значення швидкості (45 м/с) майже в чотири рази вище ніж у попередньому випадку, а течія газу структурується за швидкістю відносно стінки.

Характер протікання газу – турбулентний, про що свідчить дослідження траєкторій його руху (рис. 3.13).

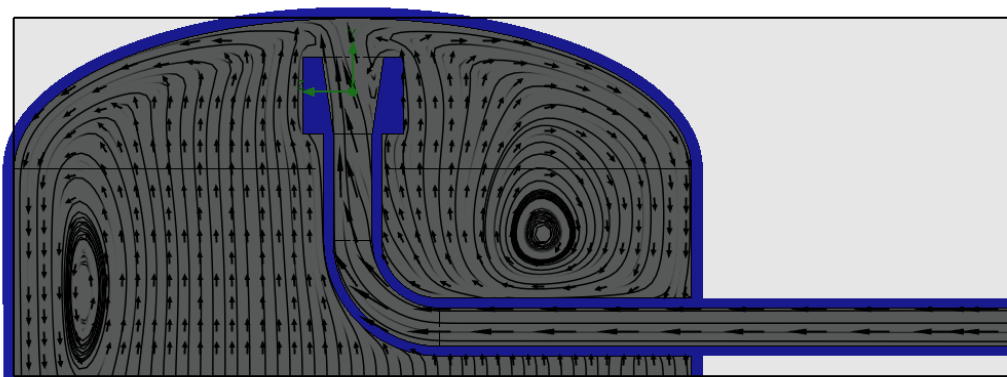


Рисунок 3.13 – Траєкторії руху газу всередині корпусу насадки-заспокоювача

Однак, як показали дослідження руху частинок твердої фази, швидкість частинок є нижчою і лежить в діапазоні 1,6–80 м/с. Як видно із рис. 3.14, частинки є більш розкидані в просторі корпусу заспокоювача, мають більше ламаних траєкторій руху, частинки, відбиваючись від твердої поверхні, проходять довші відстані і більше гасять енергію внаслідок тертя газу об поверхню корпусу насадки-заспокоювача.

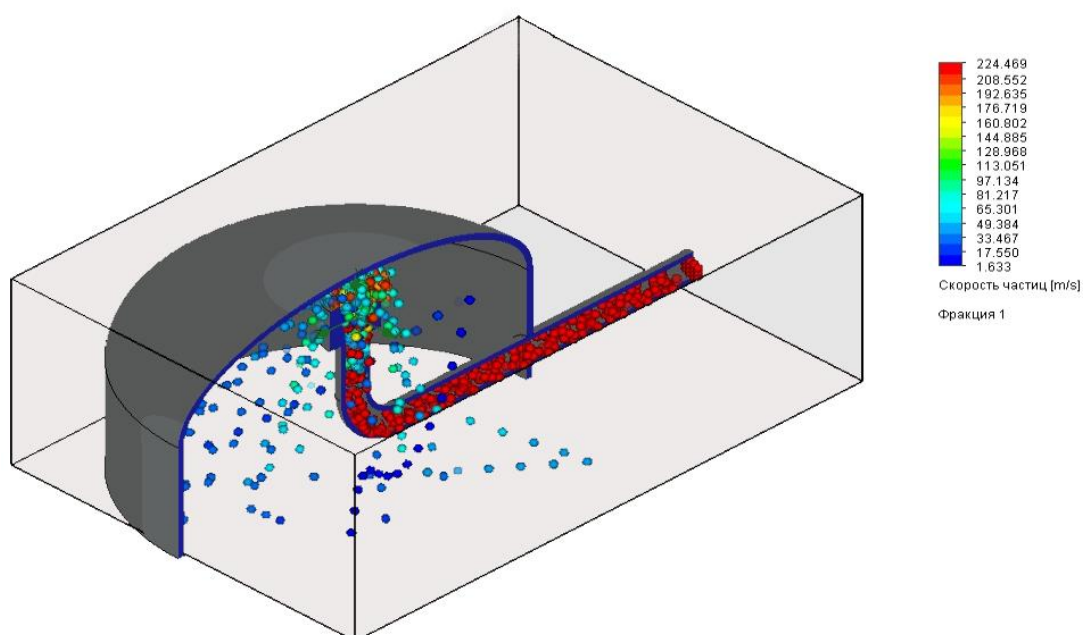


Рисунок 3.14 – Траєкторії руху твердих частинок всередині корпусу насадки-заспокоювача

Отже, не дивлячись на вищі значення швидкості руху газу, максимальне значення швидкості руху частинок твердої фази суміші є на 27 % меншим, ніж у попередньому випадку.

3.4. Моделювання процесів, які відбуваються у двосторонніх насадках-заспокоювачах та визначення оптимальної конструкції

На рис. 3.15 зображено конструкційну схему та розрахункову модель заспокоювача із еліптичним верхом та додатковим еліптичним дзеркалом з врахуванням досліджень, викладених раніше [17].

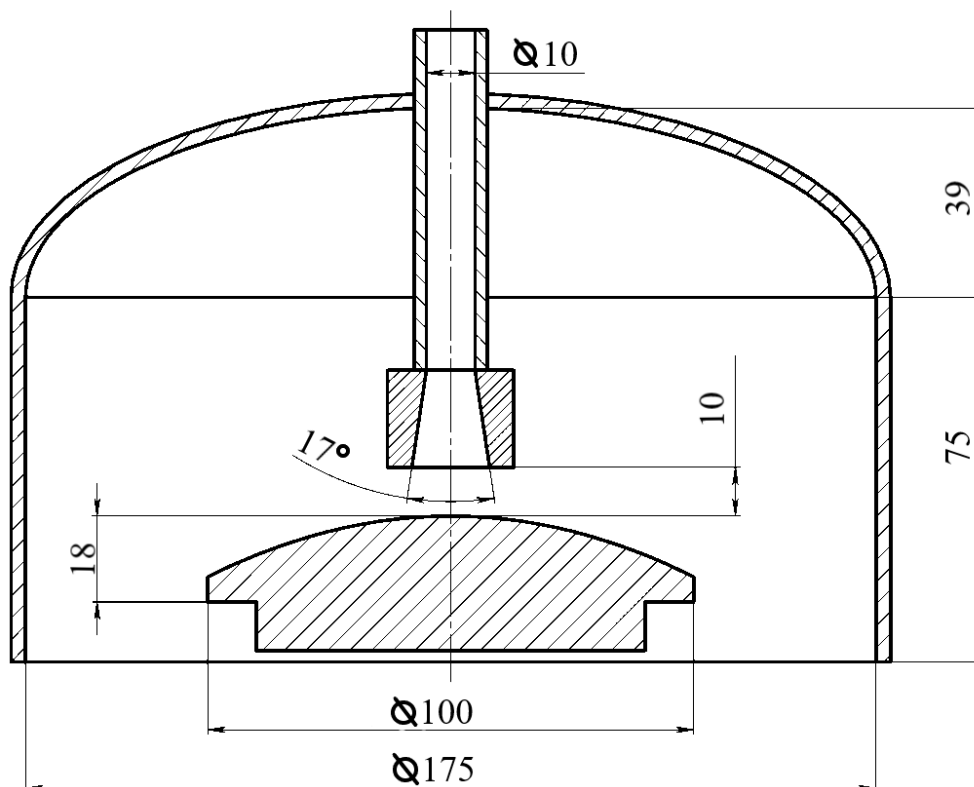
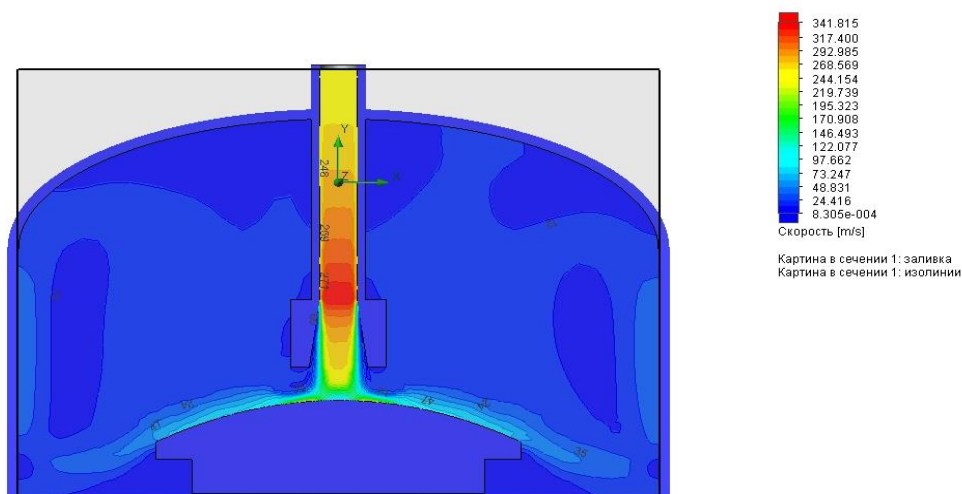


Рисунок 3.15 – Розрахункова модель заспокоювача із еліптичним верхом та додатковим параболічним дзеркалом

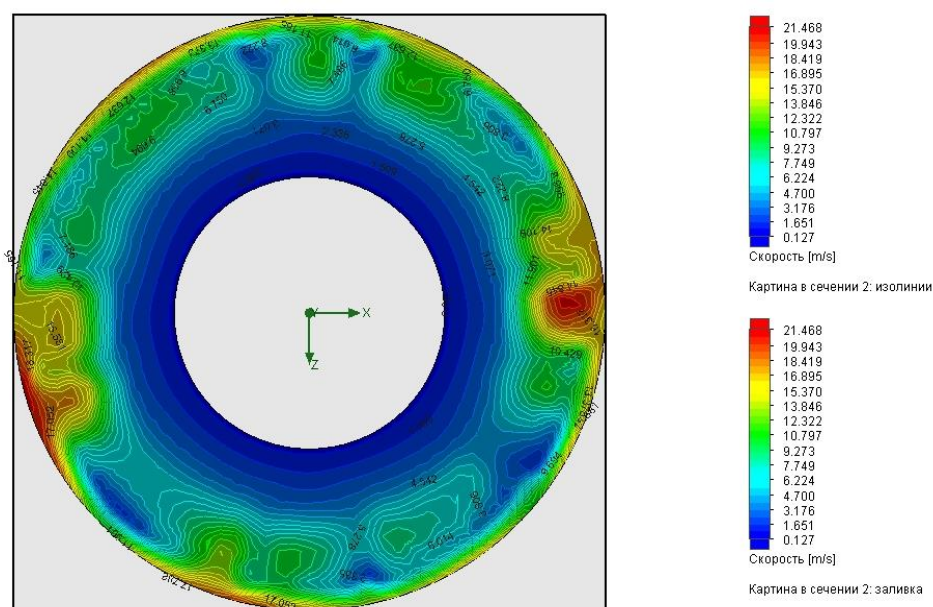
Як видно із рис. 3.15, рухоме двофазове середовище, вийшовши із дифузора, вдарятиметься в параболічне дзеркало (відбивач), а вже від нього

підніматиметься вгору – до еліптичного днища, відбившись від якого розпилюватиметься в навколишнє середовище та попадатиме на об'єкт гасіння.

Така конструкційна схема повинна бути більш ефективною, тобто має більше сповільнюватися рух твердої фази і, як наслідок, більше її потраплятиме на об'єкт гасіння.



a



б

Рисунок 3.16 – Хромограма витікання газу: *a* – вертикальний симетричний переріз; *б* – горизонтальний переріз біля виходу

Хромограми витікання газу в обох перерізах корпусу насадки-заспокоювача представлені на рис. 3.16 *a* та рис. 3.16 *б*. Як видно із аналізу рис.

3.16. протікання газу є симетричним та турбулентним, а значення його швидкостей дещо зменшилися порівняно з попереднім варіантом виконання конструкції. Особливо зменшилась швидкість газу на виході із корпусу насадки-заспокоювача – більш ніж в два рази (з 45 м/с до 21 м/с – рис 3.16 б).

Високу та симетричну турбулентність протікання газу зображено на рис. 3.17. Потік газу є досить симетрично закрученим і має добре виражені зони турбулентності, які повинні призводити до гасіння швидкості руху твердої фази рухомого середовища.

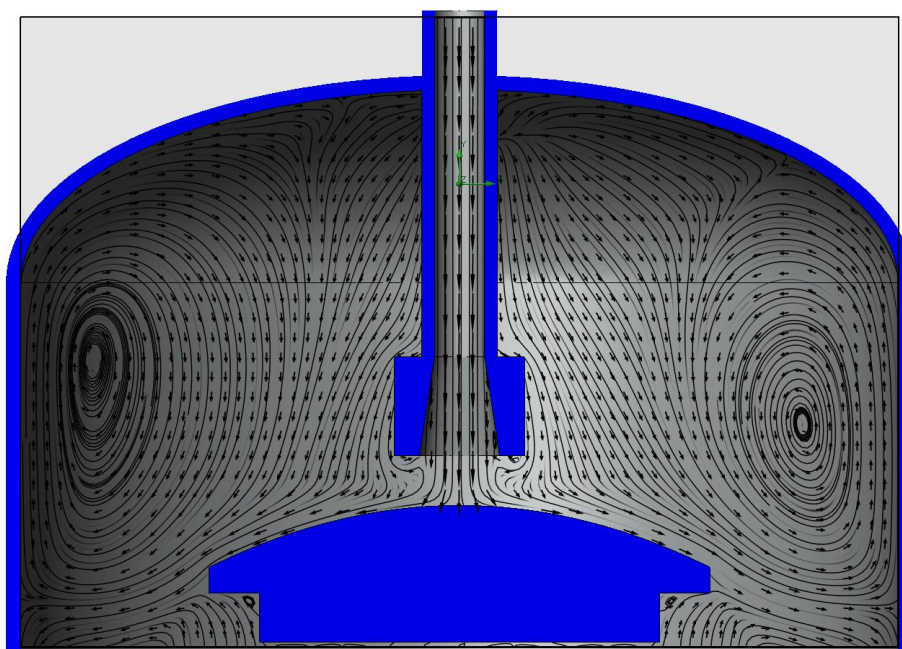


Рисунок 3.17 – Траєкторії руху газу всередині корпусу насадки-заспокоювача із додатковим дзеркалом

Траєкторії руху твердих частинок всередині корпусу насадки-заспокоювача із додатковим параболічним дзеркалом представлено на рис. 3.18.

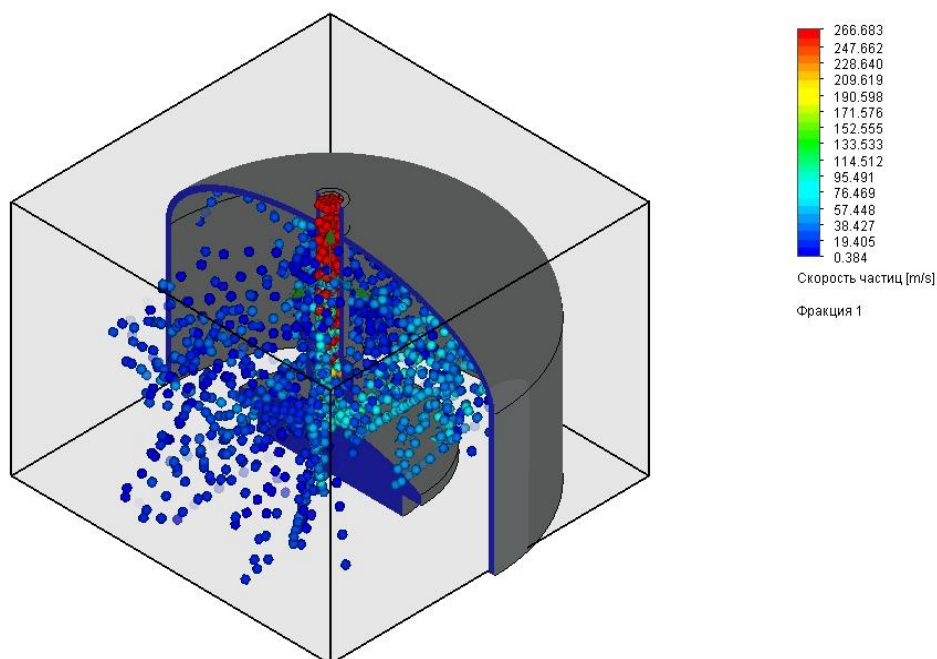


Рисунок 3.18 – Траєкторії руху твердих частинок всередині корпусу насадки-заспокоювача із додатковим дзеркалом

Як видно із рис. 3.18, частинки твердої фази розпоршені в просторі корпусу насадки-заспокоювача. Траєкторії руху формуються із багатьох зіткнень з поверхнями та труться об закручений потік газу та поверхню вогнегасника. Як наслідок – значення швидкості частинок на виході із корпусу насадки-заспокоювача лежить в діапазоні 0,3 – 20 м/с, що є в п'ять разів менше ніж у випадку сфери та в чотири рази менше ніж у випадку одного еліпса.

3.5. Експериментальна перевірка адекватності змодельованих процесів в насадках-заспокоювачах

Експериментальні дослідження проводились методом визначення ефективності порошкових засобів для гасіння макетних пожеж класу D. Для вогнища використали сплав магнію та чистий магній в пропорції 3:1. МЛ5 (7,5–9 % Al; 0,2–0,8 % Zn; 0,15–0,5 % Mn).

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалось метрологічно атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання з точністю не більше 0,5 %.

Критерієм кращого вибору є, в першу чергу, маса порошку, яка потрапила на об'єкт гасіння, та час подавання порошку. З метою підтвердження конструкційних параметрів заспокоювача проведемо дослідження в полігонних умовах (без гасіння магнієвих сплавів) з встановленням кількості порошку, який потрапляє на об'єкт гасіння.

Схема установки для дослідження конструкційних параметрів заспокоювача представлена на рис. 3.2.

Враховуючи результати досліджень [12, 19, 20, 21, 61] експеримент в лабораторних умовах проводити за такою методикою:

- візуально перевірити цілісність шлангів і трубок;
- засипати в корпус вогнегасника 1кг вогнегасного порошку;
- зібрати установку для визначення потрапляння вогнегасного порошку на об'єкт гасіння умовного горіння магнію або подібних речовин та провести експеримент відповідно [17].

Кожний дослід проводимо 3 рази. Результати дослідів, які відрізняються більше ніж на 15 %, до уваги не беруться.

Випробування проводили при різних тисках, різних діаметрах насадки і відстанях від насадки до поверхні заспокоювача, а також з різними від формами насадки (пряме сопло або дифузор) [17].

Найкращі результати отримали коли при відстані дифузора до поверхні заспокоювача дорівнювала 10 мм, а діаметр на виході дифузора – 16 мм (табл. 3.17). Тиск в корпусі вогнегасника приймаємо 1 МПа. Це середнє значення тиску, при якому найдовше працює вогнегасник.

Таблиця 3.17

**Результати експериментальних досліджень з використанням
одностороннього відбивання порошку**

Р (тиск)	Середнє значення при тиску 1 МПа
Загальна вага, кг	1
Час t, с	30
Маса порошку, яка потрапила на об'єкт гасіння, G, кг	0,63
Масова швидкість потрапляння порошку на деко V_m , кг/с	$3,5 \times 10^{-2}$
Залишок порошку в балоні, кг	0,022

Як впливає із аналізу табл. 3.17, значення тиску під час проведення експериментальних досліджень суттєво (в п'ять разів) відрізняється від розрахункового. Це пояснюється роботою, затраченою на транспортування порошку. Адже при продуванні моделі із балона стиснутого газу без порошку, середнє значення тиску становило близько 0,2 МПа. Саме це значення тиску і задавалося в розрахункових моделях. Гранична концентрація порошку в моделі береться такою, яка не впливає на процес протікання газу, лише газ впливає на процес руху твердої фази. Це дуже малі концентрації (max до 30 %). Однак, в реальних умовах ми забираємо порошок по максимуму, забезпечуючи тим самим ефективне гасіння пожежі. Це вже впливає на рух газу, чого ми, на жаль, ще не можемо враховувати в моделях програмного середовища COSMOSFloWorks. Можемо лише констатувати факт – опір протіканню газу всередині трубки зростає в п'ять разів.

Експериментальні дослідження вогнегасника із заспокоювачем, конструкція якого складається із еліптичного днища з циліндричним корпусом та параболічним дзеркалом, ми провели при попередніх умовах. Результати досліджень представлені в табл. 3.18.

Таблиця 3.18.

Результати експериментальних досліджень з двостороннім відбивачем порошку

Р (тиск)	Середнє значення при тиску 1 МПа
Загальна вага, кг	1
Час t, с	31
Маса порошку, яка потрапила на об'єкт гасіння, G, кг	0,92
Масова швидкість потрапляння порошку на деко V _m , кг/с	$4,95 \times 10^{-2}$
Залишок порошку в балоні, кг	0,022

З результатів табл. 3.17 і 3.18 видно, що на поверхню дека $0,4 \times 0,4$ м потрапило при односторонньому відбивачеві 0,63 кг порошку, а при двосторонньому відбивачеві 0,92 кг при залишку в балоні 0,022 кг. Тобто у другому випадку на об'єкт не потрапило всього 6% порошку [50].

На рис. 3.19. зображено процес гасіння пожежі за допомогою експериментального зразка вогнегасника із одностороннім відбивачем та розробленим заспокоювачем з двома робочими поверхнями.

*a**б*

Рисунок 3.19 – Гасіння пожежі за допомогою експериментального зразка вогнегасника із заспокоювачем: *a* – односторонній відбивач *б* – двосторонній відбивач

Помітною є компактність струменя порошку та його плавність висипання. Порошок рівномірно покриває поверхню горіння. Після гасіння прогарів не спостерігається по всій поверхні. При гасінні макетного вогнища з використанням одностороннього відбивача пожежу було погашено за 20 с, а з використанням двостороннього відбивача – за 7 с.

З експериментальних досліджень, представлених в табл. 3.17 (вага порошку на об'єкті гасіння при односторонньому відбивачеві заспокоювача становить 0,63 кг) та табл. 3.18 (вага порошку на об'єкті гасіння при двохсторонньому відбивачеві становить 0,92 кг), видно, що вага порошку на поверхні гасіння зросла на 0,29 кг. Вага залишку порошку на деку зросла на 31,5 %, що вказує на значно кращу ефективність заспокоювача з конструкційною схемою із двома відбивачами твердої фази – еліптичного відбивача та додаткового параболічного дзеркала. Такі ж результати спостерігаємо і на рис. 3.12–3.14, 3.16–3.18.

Конструкція більш складна від відомої, але дає кращий результат в гасінні легких металів. Час гасіння менший в 2,9 раза. Розробка може використовуватися при створенні стаціонарних та переносних систем пожежогасіння для гасіння легких металів та сплавів, в тому числі і запалювальних гранат за умови правильного підбору порошку. Досягнуто позитивних результатів під час проведення полігонних випробуваннях насадки-заспокоювача на макетному вогнищі при горінні стружки сплавів магнію.

Використання насадки-заспокоювача є ефективним для припинення горіння пожеж класу D на початковій стадії, гасіння масштабних пожеж легких металів але ця конструкція є не ефективною.

При конструюванні насадки-заспокоювача треба врахувати вимоги до матеріалу з якого виготовляється насадка. Матеріал повинен мати високу температуру плавлення і бути легким, оскільки дасть змогу довший час працювати в зоні високих температур.

3.6. Висновки за розділом

1. Розроблена лабораторна методика дослідження насадки-заспокоювача для пожеж класу D на прикладі сплавів магнію. Параметри за часом викиду порошку та масою попадання порошку на об'єкт гасіння з використанням сітки з вічком 2 і більше мм гірші, ніж при подаванні без сітки з насадками, розміщеними навіть на відстані 40 мм, 25 мм і т.ін. Встановлено, що кращі результати щодо подавання порошку на об'єкт гасіння дають дифузори з діаметром 16 мм на відстані 10 мм до дна заспокоювача.

2. З хромограм видно, що швидкість газу в об'ємі корпусу заспокоювача з одностороннім відбивачем є нерівномірною, а його розповсюдження має турбулентний характер. Як показало моделювання насадки-заспокоювача з еліптичним дном, його використання є ефективнішим від сферичного. Не дивлячись на вищі значення швидкості руху газу, максимальне значення швидкості руху частинок твердої фази суміші є на 27 % меншим, ніж у попередньому випадку. Тиск в корпусі вогнегасного пристрою повинен бути високий для аерації порошку та транспортування його на далекі відстані, а на виході порошок має рухатись направлено і плавно, інтенсивно покриваючи поверхню.

3. Змодельовано подавання порошку з насадок-заспокоювачів різної конструкції. Встановлено, що траєкторії руху середовища формуються із багатьох зіткнень з поверхнями, що труться об закручений потік газу та поверхню вогнегасника. Як наслідок – значення швидкості частинок на виході із корпусу насадки-заспокоювача лежить в діапазоні 0,3 – 20 м/с, що є в п'ять разів меншим ніж у випадку сфери, та у чотири рази менший, ніж у випадку самого лише еліпса. Запропоновано насадку-заспокоювач для подавання вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D з двома робочими поверхнями – еліптичним верхом та параболічним відбивачем.

4. Відповідність математичної моделі експериментально перевірена на фізичній моделі, у вигляді заспокоювача для подавання вогнегасного порошку

для гасіння пожеж магнію з двома робочими поверхнями – еліптичним верхом та параболічним відбивачем. Потрапляння порошку на об'єкт гасіння становить більше 0,920 кг при використаних 0,978 кг, що становить більше 90 % вогнегасної речовини, витраченої на гасіння. Заспокоювач з двома робочими поверхнями ефективніший від попереднього заспокоювача з одностороннім відбивачем з однією робочою поверхнею на 30 % за кількістю порошку, який потрапив в зону горіння. Це покращує ефективність гасіння, більшим шаром порошку покриває поверхню горіння, не роздмухуючи стружку з поверхні горючого металу. Час гасіння макетного вогнища з 20 с зменшився до 7 с та збільшилась кількість порошку, який потрапив на поверхню гасіння.

Математична модель будується на основі геометричного проектування реального інженерного об'єкта в середовищі SolidWorks з подальшим автоматичним обміном необхідною інформацією і дає змогу проектувати різні насадки-заспокоювачі для гасіння пожеж класу D.

Запропонована методика оцінки ефективності насадки-заспокоювача з визначенням кількості вогнегасного порошку, що потрапив на деку розміром $0,4 \times 0,4$ при подачі з вогнегасника з зарядом 1 кг через відповідну насадку-заспокоювач, може бути використана при випробуваннях насадок.

Результати досліджень опубліковано в [12], [50], [52], [56], [62], [95].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ВОГНЕГАСНИМИ ПОРОШКАМИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБЛЕНИХ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ

4.1. Дослідження недоліків відомих методик з визначенням ефективності гасіння пожеж класу D

У зв'язку з відсутністю методики для визначення вогнегасної ефективності порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D в Україні, за основу беремо методики, викладені в міжнародному стандарті ISO 7165:2017 «Fire fighting — Portable fire extinguishers — Performance and construction» (Пожежогасіння – Портативні вогнегасники – Виконання та будова) та ГОСТ 53280.5-2009 «Установки пожежогасіння автоматичні. Вогнегасні речовини. Частина 5. Порошки вогнегасні спеціального призначення. Класифікація, загальні технічні вимоги та методи випробувань».

Обидві методики мають ряд недоліків, які потрібно усунути при створенні проекту Української методики випробувань вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D. Проаналізувавши методику випробувань вогнегасних порошків ГОСТ 53280.5-2009 «Установки пожежогасіння автоматичні. Вогнегасні речовини. Частина 5. Порошки вогнегасні спеціального призначення. Класифікація, загальні технічні вимоги та методи випробувань» та провівши випробування за цією методикою, було визначено ряд недоліків, а саме:

– класифікація пожеж в наведеній методиці здійснюється відповідно до ГОСТ 27331-87 «Пожежна техніка. Класифікація пожеж», в якому клас пожеж D поділено на підкласи D1, D2, D3, що не відповідає вимогам європейських

норм, які є чинними на території України (ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж»);

– розміри металевого каркасу з листової сталі зі стороною (500 ± 10) мм, висотою (150 ± 5) мм і товщиною стінок від 2,5 мм до 3,0 мм для проведення випробувань з використанням магнієвої стружки є малими;

– не вказана кількість бензину, яка необхідна для розпалювання магнію.

Проаналізувавши міжнародну методику випробувань вогнегасних порошків, викладену в міжнародному стандарті ISO 7165:2017 «Fire fighting — Portable fire extinguishers — Performance and construction» (Пожежогасіння — Портативні вогнегасники — Виконання та будова) було виявлено такі недоліки — газовий чи кисневий факел, який використовується для розпалу магнію не забезпечує повноцінного горіння по всій площі, а тільки створює окремі осередки займання.

4.2. Дослідження з визначення кількості пального для підпалювання магнієвої стружки

Під час розробки «Методики випробування вогнегасних порошків спеціального призначення» були проведені експериментальні дослідження з визначення кількості бензину для розпалу стружки магнію (табл. 4.1).

Обладнання для проведення досліджень:

- дека розміром $0,6 \times 0,6 \times 0,3$ та $0,5 \times 0,5 \times 0,15$;
- циліндр скляний мірний;
- секундомір з похибкою вимірювання не більше $\pm 0,2$ с;
- вага з похибкою зважування не більше $\pm 0,1$ г.

Дослідження проводилися таким чином: в деко розміром $0,6 \times 0,6$ м. засипали стружку сплаву магнію в кількості 1,4 кг. та рівномірно розподіли по всій площі дека. Поверхню стружки для кращого займання рівномірно полили бензином А 92 в кількості, наведеній у табл.1, та фіксували час займання стружки та час коли вогнем було зайнято 50% площі дека.

В таблиці 4.1 наведені середні значення результатів проведених досліджень.

Таблиця 4.1

Дослідження з визначення кількості бензину для розпалювання стружки магнію

№ з/п дослідю	Кількість бензину, л	Час займання, с	Час займання 50% площі дека, с	Площа горіння стружки, $F_{\text{стружки}}, \text{м}^2$	Маса стружки сплаву магнію, кг
1.	0,254	20	75	0,36	1,4
2.	0,152	24	85	0,36	1,4
3.	0,127	29	80	0,36	1,4
4.	0,101	34	84	0,36	1,4
5.	0,051	36	80	0,36	1,4

Відповідно до ISO 7165:2017, час займання стружки повинен становити не більше 30 секунд. З табл. 4.1 бачимо, що ці дані умови задовольняє дослід № 3. Був зафіксований час, коли зайнялось 50% площі дека зі стружкою сплаву магнію, в третьому досліді вона становила 80 секунд. Дослідження визначили, що для підпалу магнієвої стружки до 30 с необхідно використовувати не менше 0,127 л бензину марки А 92.

Після проведення аналізу переваг та недоліків вказаних вище методик було розроблено проект методики випробувань вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D, який пропонується використовувати в Україні.

4.3. Проект методики випробування вогнегасних порошків спеціального призначення

Визначення основних критеріїв оцінки якості вогнегасних порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D [64, 66, 67, 74, 86].

1. Визначення щільності вогнегасного порошку.

Метод заснований на визначенні відношення маси, яка вільно засипається, і маси ущільненої вібрацією протягом певного часу, порошку до займаного ним об'єму.

1.1. Апаратура.

Циліндр скляний мірний 4-250-1, згідно з ГОСТ 1770.

Ваги з найменшою межею зважування 300 г і похибкою зважування не більше 0,1 г

Вібростенд, який забезпечує вібрацію з частотою 100 Гц і віброприскорення від 100 до 150 м/с².

Секундомір з похибкою вимірювання не більше $\pm 0,2$ с.

1.2. Проведення випробування.

В чистий сухий циліндр через лійку поміщають $(100,0 \pm 0,1)$ г порошку. Циліндр закривають пробкою і перевертають обертовими рухами у вертикальній площині, роблячи 10 повних обертів з частотою близько $0,5$ с⁻¹. Відразу після закінчення обертань циліндр ставлять вертикально, пробку виймають, дають порошку відстоятися протягом (180 ± 5) с і визначають об'єм V_1 см³, який він зайняв. Потім циліндр ставлять на поверхню столика вібростенда, закривають пробкою, ущільнюють порошок протягом (300 ± 5) с з частотою 100 Гц і віброприскоренням 125 м/см² і відповідно визначають об'єм V_2 см³.

Допускається проводити ущільнення порошку вручну постукуванням циліндра об тверду поверхню (220-260 ударів на хвилину) з висоти 10-15 мм.

1.3. Обробка результатів.

Відносну щільність порошку при вільній засипці ρ_B кг/м³, обчислюють за формулою:

$$\rho_B = \frac{m}{V_1} \times 1000 \quad (4.1)$$

де m - маса проби порошку, г;

V_1 – об'єм, зваженого порошку після відстоювання (180 ± 5) с, см³;

1.4. Відносну щільність ущільненого порошку, ρ_v кг/м³, обчислюють за формулою:

$$\rho_v = \frac{m}{V_2} \times 1000 \quad (4.2)$$

де V_2 – об'єм, зваженого порошку після ущільнення на вібростенді (300±5) с, см³.

Примітка. Це випробування проводиться 3 рази, після чого визначаємо середнє арифметичне значення з 3 дослідів і приймаємо його, як результат проведеного дослідження.

2. Визначення масової частки вологи.

Метод заснований на визначенні відношення маси вологи, що міститься в порошку, до маси порошку після сушіння.

2.1. Апаратура.

Шафа сушильна з терморегулятором, що дозволяє вимірювати температуру нагрівання від 50 до 100°C.

Скляночка мірна місткістю 100 мл.

Ексикатор з осушувачем (прожарений силікагель або хлористий кальцій).

Ваги аналітичні з похибкою зважування не більше ±0,02 г.

Кислота сірчана концентрована.

2.2. Проведення випробування.

В чисту суху, попередньо зважену скляночку поміщають (20,0 ± 0,1) г порошку. Склянку закривають кришкою і зважують з похибкою не більше ±0,02 г. Потім склянки з порошком переносять у сушильну шафу, знімають кришку і сушать до постійної маси близько 4 год. Температура сушіння повинна бути вказана в офіційному документі на випробуваний порошок. Сталість маси порошку контролюють зважуванням стаканчика через 3 год від початку сушки і далі через кожні 15 хв. Перед зважуванням скляночку закривають кришкою. Після повернення скляночки в сушильну шафу кришку відкривають. Після досягнення постійної маси закриту склянку з порошком

поміщають на 30 хв в ексікатор для охолодження і потім проводять остаточний контроль сталості маси.

2.3. Обробка результатів. Вологість порошку $W, \%$, обчислюють за формулою:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (4.3)$$

де m - маса наважки порошку, г;

m_1 - маса скляночки з порошком до сушки, г;

m_2 - маса скляночки з порошком після сушки, г.

Примітка. Це випробування проводиться 3 рази, після чого визначаємо середнє арифметичне значення з 3 дослідів і приймаємо його, як результат проведеного дослідження.

3. Визначення схильності до вологопоглинання і злежування.

Метод заснований на визначенні відношення маси вологи, яка поглинається порошком, до маси цього порошку і з подальшою візуальною оцінкою його схильності до злежування.

3.1. Апаратура.

Шафа сушильна з терморегулятором по 2.1.

Скляночки скляні по 2.1.

Кислота сірчана, розчин з масовою часткою 26%.

Амоній сірчаноокислий насичений розчин.

Ексікатор з розчином сірчаної кислоти або сірчаноокислого амонію для створення в ньому 80% вологості повітря

Ваги лабораторні, згідно з 2.1

Сито з вічками 0,1 см

Термометр лабораторний з ціною поділки не більше 1 °С

3.2. Визначення схильності до поглинання вологості.

В чисту суху, попередньо зважену склянку поміщають $(20,0 \pm 0,2)$ г порошку, закривають кришкою і зважують з похибкою не більше 0,005 г. Потім склянку з порошком поміщають в ексікатор з розчином сірчаної кислоти або

хлористого амонію, що дає змогу створити в ексікаторі 80% вологість повітря, знімають кришку зі склянки і кладуть її поруч, ексікатор закривають кришкою. Порошок витримують в ексікаторі 24 год при температурі $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$. Потім склянку закривають кришкою, виймають з ексікатора і зважують.

3.3. Обробка результатів.

Схильність до вологопоглинання $V, \%$, обчислюють за формулою

$$V = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (4.4)$$

де m – початкова маса порошку, г;

m_1 – маса скляночки з порошком після витримки (зволоження), г;

m_2 – маса скляночки з порошком до витримки (зволоження), г.

3.4. Визначення схильності до злежування.

Після завершення випробування (3.2) скляночку з порошком поміщають в сушильну шафу, відкривають кришку і висушують до постійної маси, як вказано в пункті 2.2. Потім висушений порошок висипають з висоти (200 ± 50) мм на сито. Обережно потрушуючи сито, просіюють порошок. У випадку, якщо на ситі залишилися які-небудь грудки, вважається, що порошок не пройшов випробування на злежуваність. Порошок вважається схильним до злежування, якщо в двох з трьох паралельних визначень утворюються грудки.

4. Визначення плинності і залишку порошку.

Метод заснований на вимірюванні витрати вогнегасного порошку, який подається з вогнегасника під тиском робочого газу, а також на визначенні масової частки залишку в ньому.

4.1. Апаратура.

Ваги аналітичні з похибкою зважування не більше $\pm 0,02$ г

Секундомір з похибкою вимірювання не більше $\pm 0,2$ с.

Прилад випробувальний типу закачного вогнегасника з місткістю корпусу $2,5 \text{ дм}^3$, забезпечений насадкою-розпилювачем.

Вібростенд, що забезпечує вібрацію з частотою 100 Гц і віброприскорення від 50 м/с^2 до 150 м/с^2 , та має допустиму масу навантаження

на столі вібратора – не менше 5,0 кг. Манометр з максимальним тиском не менше 2,0 МПа і похибкою вимірювання не більше $\pm 0,05$ МПа.

4.2. Підготовка до випробування.

У вогнегасник завантажують таку кількість порошку, яка в ущільненому стані відповідно до пункту 1 має обсяг 1,75 дм³. Після цього вогнегасник герметизують (закручують головку) і закачують азотом з газового балона або повітрям до тиску ($1,6 \pm 0,05$) МПа.

4.3. Проведення випробування.

Заряджений вогнегасник жорстко закріплюють на столі вібростенда і піддають дії вібрації з частотою 100 Гц і віброприскоренню 120 м/с² протягом (600 ± 5) с або віброприскоренню 60 м/с² протягом (1200 ± 5) с.

Знімають вогнегасник з вібростенда і визначають його масу (з порошком). Випускають порошок з вогнегасника протягом 6 с. Потім визначають масу вогнегасника з залишком порошку. Для визначення масової частки залишку проводять ті ж операції, але в цьому випадку випускають порошок при повністю відкритому запірному пристрої до повного припинення виходу порошку. Крім того, додатково визначають масу вогнегасника без порошку. Допускається в разі відсутності вібростенда проводити ущільнення порошку вручну (500 ударів протягом 10 хв), б'ючи вогнегасник з висоти 10-15 мм по твердій поверхні.

4.4. Обробка результатів

Плинність порошку T , кг/с, обчислюють за формулою

$$T = \frac{m_1 - m_2}{b} \times 100 \quad (4.5)$$

де m_1 – маса вогнегасника з порошком, кг;

m_2 – маса вогнегасника із залишком порошку після випуску впродовж фіксованого часу, кг;

b - час випуску порошку з вогнегасника, с.

У разі, якщо весь порошок з вогнегасника виходить менш ніж за 6 с, він вважається таким, що пройшов випробування на плинність.

4.5. Масову частку залишку $W_3, \%$, обчислюють за формулою

$$W_3 = \frac{m_3 - m_4}{m_1 - m_4} \quad (4.6)$$

де m_3 – маса вогнегасника з залишком порошку (після повного випуску), кг;

m_4 – маса вогнегасника без порошку, кг.

Примітка. Це випробування проводиться 3 рази, після чого визначаємо середнє арифметичне значення з 3 дослідів і приймаємо його, як результат проведеного дослідження.

Частина 2. Випробування порошоків цільового призначення шляхом гасіння вогнегасниками штучно створених пожеж класу D.

1. Загальні положення.

Метод випробування порошоків створений з використанням вогнегасника з номінальним зарядом 13,6 кг порошку та використанням спеціально створеної насадки-заспокоювача. Вогнегасники, що мають менший заряд, перевіряються використовуючи пропорційно зменшену кількість порошку та площу поверхні горіння.

Випробування необхідно проводити в захисному одязі та спорядженні з відповідним рівнем захисту. Всі залишки після проведення випробування повинні бути утилізовані належним чином.

Випробування проводять під відкритим небом, в огороженій місцевості для обмеження впливу вітру або у спеціально обладнаному приміщенні, де вентиляція забезпечує необхідну видимість та концентрацію кисню протягом проведення випробування.

Застереження. Деякі засоби пожежогасіння, що використовуються для гасіння пожеж класу D, є токсичними (наприклад, хлорид барію $BaCl_2$) та / або можуть взаємодіяти з металом, що горить, з отриманням матеріалів, які є токсичними або іншим чином небезпечними (наприклад, фосфати, які реагуючи з металами утворюють фосфіди металів, що розкладаються водою з одержанням фосфіну, PH_3 , токсичного горючого газу).

Немає комплексних характеристик порошку, який міг би гасити всі пожежі класу D. Для гасіння конкретно взятого металу чи його сплаву розробляють спеціальні порошки цільового призначення, відповідно до цієї методики. Визначають оптимальну вагу порошку, необхідну для гасіння пожежі на певній площі, глибину та інші характеристики порошку при гасінні, заносять їх в таблицю, яка кріпиться на вогнегасник, та вказують в інструкції виробника.

2. Обладнання, речовини та методи проведення випробування.

Випробування проводяться на сталевій плиті квадратної форми, розмірами 1×1 м і товщиною 5 мм. Для зручного згортання спаленого металу використовують знімний металевий каркас розмірами (600×600×300 мм).

Щоб розпалити метал своєю стружку використовують газовий або кисневий факел, який може запалити метал 30 секунд.

Випробування складається з 4 дослідів з використанням:

1. магнієвого сплаву;
2. магнієвого сплаву зі змазувально-охолоджуючим маслом;
3. магнію з реагентом;
4. магнію зі змазувально-охолоджуючим маслом та реагентом.

Магнієвий сплав повинен містити $8,5 \pm 1\%$ алюмінію і, максимум, $2,5\%$ цинку, а номінальний розмір частинок повинен становити від 10 мм до 25 мм, шириною від 6 мм до 13 мм та товщиною 0,05 мм.

Магній на основі реагенту повинен містити не менше 99,5% магнію, а номінальний розмір часток повинен становити від 6 мм до 9 мм, шириною 3 мм та товщиною 0,25 мм.

Для випробувань без змазувально-охолоджуючого масла використовують $18,0 \pm 0,1$ кг металу для кожного досліді. Для випробувань зі змазувально-охолоджуючим маслом використовують $16,2 \pm 0,1$ кг металу, рівномірно нанесеного $1,8 \pm 0,1$ кг мастила з нафтою, відносна щільність якого - $0,86 \pm 0,01$ та температура в'язкості - 146 ± 5 ° C (для кожного окремого досліді).

3. Процедура проведення випробування.

На сталевій плиті квадратної форми розміщують металевий чи дерев'яний каркас з розмірами, відповідно до п. 2. Металевий каркас повинен щільно прилягати до сталевій плити так, щоб не допустити витоку назовні продуктів горіння.

В залежності від того, який дослід проводиться (1, 2, 3 чи 4) всередину металевого каркасу засипають відповідну кількість металу, змазувально-охолоджуючого масла та/або реагента і рівномірно розподіляють по всій площі сталевій плити граблями або правилом з прямим краєм.

Після цього беруть бензин марки А 92, в кількості 0,127-0,150 літра та рівномірно поливають поверхню металу, який будуть розпалювати.

Далі беруть газовий чи кисневий факел (п.2), підносять його до центра площі поверхні металу та тримають не довше 30 с .

Пожежа поширюється, доки не займе 25% об'єму металевій стружки, що горить, або 50% поверхні горіння, залежно від того, що станеться раніше. Після цього вогнегасник може бути розряджений по площі полум'я, за бажанням оператора, постійно чи періодично, відповідно до інструкцій виробника. Необхідне переконання, що під час подавання порошку на поверхню горіння не розбризкується стружка магнію з дека.

Після того, як вогнегасник повністю розряджено, пожежа залишається у стані спокою протягом часу, рекомендованого виробником вогнегасника або протягом 60 хвилин, якщо відповідної рекомендації немає.

Після закінчення відведеного часу треба дослідити спалену суміш з порошком. Порошок вважається таким, що пройшов випробування, якщо після закінчення відведеного часу:

1. Пожежа повністю ліквідована.
2. Маса спаленої суміші є більша за 10% від початкової маси металевій стружки до початку горіння.

4.4. Економічна ефективність запропонованих пристроїв та вогнегасних порошків для гасіння пожеж магнію та його сплавів

Економічну ефективність вогнегасних порошків характеризує їх вартість та мінімальна кількість порошку для досягнення гасіння пожежі. Запропонований оптимальний склад вогнегасного порошку спеціального призначення для гасіння класу D магнію та його сплавів рецептурою у такому складі: хлорид натрію – 73,5 %, мелений шлак – 25 % та аеросил – 1,5 %.

Вартість вогнегасного порошку спеціального призначення для гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів вказана в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Вартість використаних вогнегасних речовин для гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів

№ з/п	Назва порошку	Вартість 1 кг (грн)	Використано (кг)	Загальна вартість одного кг (грн)
1	NaCl	4,90	0,735	3,6015
4	Мелений шлак	1,50	0,25	0,375
5	Аеросил	144	0,015	2,16
Всього		150,4	1	6,1365

Економічну ефективність розробленого вогнегасного порошку характеризує їх вартість та мінімальна кількість порошку для досягнення гасіння пожежі. Якщо порівняти вартість запропонованого вогнегасного порошку «КМ-1», що становить 6,14 грн за кг та відомих марок а саме: ПС-1, ПГС, ПХ, Петрос-2М (який на сьогодні не випускається); Іспанського виробництва Modelo 570, Modelo 571; Європейського виробництва TOTALIT M, виробництва США M28, L2, Російського виробництва П-1, ПХК, ПГХК «Завеса»; вартість яких становить від 10 до 14 грн, то видно, що запропонований вогнегасний порошок є дешевший у 1,9 раза.

Враховуючи, що в Україні є маса підприємств космічної та авіаційної техніки, автомобілебудування, де використовують магній та його сплави, а також кількість складів з боєприпасами, на яких є ризик підпалу запальними пристроями, які виготовлені із сплавів магнію, річна потреба в такому порошку становить не менше 100000 кг.

Розрахуємо економічну ефективність використання існуючих вогнегасних порошоків спеціального призначення, виходячи з їхньої середньої вартості та вартості розробленого «КМ-1».

Визначаємо економічну ефективність (E_1), вартість існуючого вогнегасного порошку спеціального призначення за кордоном (B_1), залежно від річної потреби (N_r):

$$E_1 = N_r \cdot B_1 \quad (4.7)$$

$$E_1 = 100000 \cdot 11,14 = 1114000 \text{ грн}$$

Визначаємо економічну ефективність (E_2), вартість розробленого вогнегасного порошку спеціального призначення (B_2), залежно від річної потреби (N_r):

$$E_2 = N_r \cdot B_2 \quad (4.8)$$

$$E_2 = 100000 \cdot 6,14 = 614000 \text{ грн}$$

Визначаємо різницю економічної ефективності за вартістю (E_c) між існуючими вогнегасними порошками спеціального призначення та розробленого:

$$E_c = E_1 - E_2 \quad (4.9)$$

$$E_c = 1114000 - 614000 = 500000 \text{ грн.}$$

Отже, під час використання розробленого вогнегасного порошку спеціального призначення «КМ-1» економиться 500000 грн і це лише економія на різниці у вартості існуючих та розробленого вогнегасного порошку. Коли враховувати, ще пристрій для подачі, який забезпечує більшу кількість потрапляння вогнегасного порошку на об'єкт гасіння, чим зменшує час гасіння пожежі і відповідно збереже майно яке могло б потрапити в площу горіння, тоді економія ще більш зросте.

Також на витрату вогнегасного порошку впливає пристрій для його подачі, час гасіння пожежі та час від початку загоряння до початку подачі вогнегасного порошку. При проведенні досліджень існуючих насадок-заспокоювачів для гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів, макетне вогнище було погашене за 20 с та вага порошку, який потрапив на об'єкт гасіння при односторонньому відбивачеві заспокоювача, становить 0,63 кг. Використовуючи запропоновану насадку-заспокоювач з двома робочими поверхнями еліптичним верхом та параболічним відбивачем для гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів, макетне вогнище було погашене за 7 с та на об'єкт гасіння потрапило більше 0,920 кг при використаних 0,978 кг, що становить понад 90 % вогнегасної речовини, витраченої на гасіння. Запропонований вогнегасний порошок КМ-1 з використанням двосторонньої насадки заспокоювача погасив макетну пожежу в 2,9 раза швидше від існуючих засобів та порошків.

4.5. Висновки за розділом

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

1. За основу розробленої «Методики» взято ISO 7165:2017 «Fire fighting — Portable fire extinguishers — Performance and construction».
2. Враховано результати дослідження щодо використання кількості та марки пального для підпалювання стружки сплаву магнію.
3. Деко розмірами 0,5×0,5 описане в ГОСТ Р 53280.5.-2009 не вміщає задекларовану кількість магнієвої стружки.
4. Визначено кількість бензину для підпалювання магнієвої стружки в кількості не менше 0,127 л марки А 92, підпалювання здійснюється до 30 секунд. Середній час горіння 50% площі дека становить 80 секунд.
5. При випробуванні вогнегасних порошків треба використовувати насадки одного типу.
6. Запропонований вогнегасний порошок є дешевшим від існуючих у 1,9 раза.

Результати досліджень опубліковано в [85].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеною, самостійно виконаною кваліфікаційною працею, за результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень наведено розв'язання актуального наукового завдання: розкриття особливостей впливу і співвідношень компонентів вогнегасного порошку спеціального призначення, а також параметрів технічного засобу його подавання, на ефективність припинення горіння магнію та його сплавів, як підгрунтя підвищення ефективності порошкового пожежогасіння. За результатами дисертаційної роботи зроблені такі висновки:

1. За результатами проведеного аналізу сучасного стану питання щодо розроблення і застосування вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D виявлено, що шляхами підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів в Україні є створення нових рецептур таких порошоків із застосуванням вітчизняної сировинної бази, а також удосконалення технічних засобів їх подавання.

2. Розроблено методики та проведено дослідження з виявлення впливу і співвідношень компонентів вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D із вітчизняної сировини на показники його якості, за результатами яких розроблена рецептура вогнегасного порошку спеціального призначення КМ-1 – із вмістом хлориду натрію (до 73,5%, мас.), шлаку металургійного виробництва (до 25%, мас.) та гідрофобного аеросилу (до 1,5%, мас.).

3. Удосконалено математичну модель SolidWorks та з її застосуванням змодельовано процеси формування струменів вогнегасного порошку насадкою-заспокоювачем порошкового вогнегасника спеціального призначення, зокрема визначено оптимальні його параметри з двостороннім відбивачем, діаметром насадки 16 мм у вигляді дифузора з відстанню до дна 10 мм.

4. Обґрунтовано параметри, розроблено схемні рішення, розроблено та виготовлено насадка-заспокоювач порошкового вогнегасника спеціального призначення і за результатами експериментальних досліджень доведено

ефективність його застосування для подавання вогнегасних порошоків спеціального призначення на поверхні горіння модельних вогнищ пожеж класу D, зокрема із вмістом магнію та його сплавів;

5. Запропоновано проект методики на основі ISO 7165:2017, визначення ефективності вогнегасних порошоків спеціального призначення, сутність якої полягає у гасінні модельних вогнищ пожеж класу D з наявністю магнію та його сплавів випробувальним пристроєм типу вогнегасника із запропонованою насадкою-заспокоювачем із визначенням маси подавання вогнегасного порошку на одиницю поверхні модельного вогнища за умов позитивних результатів припинення їх горіння;

6. Проведено дослідження з визначення вогнегасної ефективності розробленого вогнегасного порошку для гасіння пожеж класу D та запропонованого технічного засобу його застосування в полігонних умовах, а також розроблено проекти технічних документів на їх виготовлення та використання за для припинення горіння магнію та його сплавів на початковій стадії виникнення пожежі класу D.

7. Проведено розрахунки очікуваного економічного ефекту від застосування запропонованого способу гасіння пожеж класу D з наявністю магнію та його сплавів, який становить 500 тис. грн на рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Potezny pozar fabryki polmag w olszowej plonie 47-ton-magnezu = Потужний вогонь заводу polmag в 47-тонному виході магнію. URL: <https://nto.pl/potezny-pozar-fabryki-polmag-w-olszowej-plonie-47-ton-magnezu/ar/8962865>
2. Magnesium Brand richtet bei Sonneberg Millionenschaden = 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>
3. Сайт газети «Україна молода». URL: <http://www.umoloda.kiev.ua/regions/0/0/28280/>
4. 160 тон отрутохімікатів згоріло в результаті пожежі в Криму. URL: <http://tsn.ua/ukrayina/160-tonn-otrutohimikativ-zgorilo-v-rezultati-pozhezhi-v-krimu.html>;
5. Про затвердження голів Української частини спільних міжурядових комісій з питань співробітництва <http://www.newsru.ua/ukraine/28apr2010/mg.html>
6. Стали відомі подробиці вибуху на складах боєприпасів на Запоріжжі. URL: http://espreso.tv/news/2016/02/18/staly_vidomi_podrobysci_vybukhu_na_sklada_kh_boyeprypasiv_na_zaporizhzhі
7. На ММК за выходные было два пожара! Огнеборцы тушили возгорание в ККЦ. URL: <http://www.telefakt.ru/news/lenta-novostejj/na-mmk-zasutki-proizoshlo-dva-pozhara>
8. Український науково-дослідний інститут цивільного захисту (УкрНДІЦЗ) Державної служби України з надзвичайних ситуацій: Державна установа. Київ, 2016. URL: <http://undicz.dsns.gov.ua>
9. Ковалишин. В. В., Марич В. М., Ковалишин Вол. В. Р.Я. Лозинський. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна безпека*. 2016. № 28. С. 58–63.

10. Дударева Н. Ю., Загайко С. А. SolidWorks 2007: практ. руководство. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. 1328 с.

11. Алямовский А. Ф., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике: практ. руководство. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.

12. Марич В. М., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. та ін. Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу Д 1. *Пожежна безпека*. 2018. № 32. С. 45–54.

13. ГОСТ Р 53280.5-2009. № 55-ст. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Изд. Офиц. Москва: Стандартинформ, 2009. 11 с.

14. Огурцов С. Ю., Стилик І. Г., Антонов А. В. Аналіз методів випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2013. № 1 (27). С. 86–91.

15. Габриэлян С. Г. Применение аргона для пожаротушения стружки сплавов магния и титана, образующейся при обработке на станках с числовым программным управлением и обрабатывающих центрах. *Пожарная безопасность*. 2017. № 4. С. 45–51.

16. Balanyuk V. M., Kozyar N. M., Garasymuyk O. I. The usage of gas and aerosol powder extinguishing mixtures for protection of incendiary mixtures. *ScienceRise*. 2016. Т. 5. № 2 (22). Р. 10–14.

17. Марич В. М., Ковалишин В. В., Мірус О. Л. та ін. Вплив насадок-заспокоювачів на ефективність гасіння пожеж класів D1. *Вісник ЛДУ БЖД: зб. наук. праць*. 2018. № 17. С. 93–101.

18. Ковалишин В. В., Марич В. М., Кирилів Я. Б. та ін. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2016. № 29. С. 46–56.

19. Rakowska J., Radwan K., Ślosorz Z. Badania porównawcze wyników analizy granulometrycznej ziaren proszku gaśniczego przeprowadzonej różnymi metodami. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2014. № 34 (2). P. 57–64.

20. Курепин А. Е., Карлик В. М., Сичкоренко Л. А. Способ тушения металлов: пат. 2119368 Россия. № 97105933/25; заявл. 11.04.1997; опубл. 27.09.1998, МПК: 6А 62D 1/00 А.

21. Баланюк В. М., Ковалишин В. В., Козяр Н. М. Запобігання займання газових сумішей н-гептану комбінованими системами ударних хвиль та об'ємних вогнегасних речовин. *ScienceRise*. 2017. № 11 (40). С. 21–24.

22. Налимов В. В. Теория эксперимента: физ.-математическая. библиотека инженера ФМБИ. Москва: Наука, 1971. 207 с.

23. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента: статьи. Москва: Изд-во МГУ, 1971. 72 с.

24. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности). Москва: Легкая индустрия, 1974. 262 с.

25. Душинский В. В., Пуховский Е. С., Радченко С. Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении: монография. Київ: Техніка, 1977. 176 с.

26. Терещнев В. В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. Москва: Пожкнига, 2004. 256 с.

27. Особенности горения и тушения металлов и гидридов металлов (11 окт., 2016 г.). URL: <http://autocarta.ru/other/gorenie-i-tushenie-metallov-i-gibridov-metallov.html>.

28. Марич В. М., Ковалишин В. В., М., Кирилів Я.Б. та ін. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 18-19 травня 2017 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 59–61.

29. Глосарій термінів з хімії / уклад. Й. Опейда, О. Швайка; Ін-т фізико-орган. хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України; Донецький нац. ун-т – Донецьк: Вебер, 2008. 758 с.

30. Бродский Р. З., Бродский Л. И., Голикова Т. И. и др. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справ. изд. Москва: Металлургия, 1982. 752 с.

31. Баратова А. Н., Корольченко А. Я. «Пожаро-взрывопасность веществ и материалов и средства их тушения»: справочник : в 2-х т. Москва: Химия, 1990. Т. 1. 495 с.

32. 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>.

33. Баланюк В. М., Козяр Н. М., Гарасим'юк О. І. Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей. *ScienceRise*. 2016. Т. 5, № 2 (22). С. 10–14.

34. Антонов А. В., Стилик І. Г. Методи випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності за класом пожежі Д. *Вісник УкрНДІПБ*. 2013. № 2 (28). С. 242–248.

35. CANNLC-S508-M90. Standard for the Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers and Class D Extinguishing Media. Underwriters' Laboratories of Canada, 1996 Edition.

36. *Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden*: Ständige Konferenz der Innenminister und senatoren der Länder / Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Heyrothsberge, 2017.

37. Class D Magnesium fire. Powder Fire Extinguisher. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sJ5TlaYPGs>

38. Class D fires – Chubb Pyromet Extinguisher = Пожежі класу D – Chubb Pyromet вогнегасник. URL: https://www.youtube.com/watch?v=CTFxCr_Oy94

39. Магній. URL:
<http://uareferat.com/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D0%B9>
40. Em qualifikation italien vs kroatien nach randale un ter brochenhttp. URL:
[//www.spiegel.de/sport/fussball/em-qualifikation-italien-vs-kroatien-nach-randale-unterbrochen-a-1003289.html](http://www.spiegel.de/sport/fussball/em-qualifikation-italien-vs-kroatien-nach-randale-unterbrochen-a-1003289.html).
41. Schmalfuß H.: Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw. *Feuerwehr-Magazi*. 2016. № 5. S. 8.
42. Schlüsslmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand. *Blaulicht*. 2016. № 3. S. 4–8.
43. Buhlemann F. Magnesium-Brand richtet bei Sonneberg Millionenschaden an. *Thüringer Allgemeine*. 2010. 08.07.
44. Filzen M. Feuerwehr löscht Magnesium-Brand im Essener Hafen mit Sand. *Feuerwehr Essen*. Pressemitteilung (vom 20.10.2015).
45. Filzen M. Feuehr-Essen: Feuer in Essener Hafenmühle, brennt gelagertes Aluminiumgranulat. *Feuerwehr Essen*. Pressemitteilung (vom 23.01.2016).
46. НАОП 1.2.20-1.01-86. Правила безпеки при виробництві магнію. URL:
normativ.com.ua/types/tdoc7534.php.
47. Вибухи на складах боєприпасів в Україні – історія катастроф. URL:
<https://gordonua.com/ukr/publications/vibuhi-na-skladah-bojepripasiv-v-ukrajini-istorija-katastrof-179716.html>.
48. Баратов А. Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. Москва: Стройиздат, 1982. 72 с.
49. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SollidWorks Simulation. Моква: ДМК Пресс, 2011. 464 с. (Серия «Проектирование»).
50. Kovalyshyn V. V., Marych V. M., Novitskyi Y. M., Gusar B. M., Chernetskiy V. V., Mirus O. L. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D. *Efst-ern-European Journal of Enterprise Technogies*. 2018. Vol. 5. № 5 (95). P. 68–76.
51. Ковалишин В. В., Марич В. М. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації*:

метеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 20-21 жовтня 2016 р.). Львів: ЛДУ БЖД, 2016. С. 304–305.

52. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : метеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 20-21 жовтня 2016 р.). Львів: ЛДУ БЖД, 2016. С. 316–318.

53. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в 2 кн. Москва: Химия, 1990. Кн. 1. 496 с.

54. Марич В. М., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. та ін. Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: метеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 18–19 травня 2018 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. С. 54–56.

55. Ковалишин В. В., Марич В. М., Войтович Т. М., Гусар Б. М. Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*: метеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 14 вересня 2018 р.). Львів: ЛДУБЖД, 2018. С. 42–43.

56. Ковалишин В. В., Марич В. М., Бортник М. Я. Вдосконалення конструкції насадки-заспокоювача для підвищення ефективності гасіння пожеж класу D1. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали. Всеукр. наук.-практ. конф. (Київ, 9-10 жовтня 2018 р.). Київ, 2018. С. 213–215.

57. Глосарій термінів з хімії / уклад. Й. Опейда, О. Швайка; Ін-т фізико-орган. хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький нац. ун-т. Донецьк: Вебер, 2008. 758 с.

58. Способ тушения металлов. Пат. СРСР № 686598; опубл. 15.09.79, кл.А 62 D 1/00). Опубл.: 1998.09.27.

59. Способ предотвращения воспламенения металлических порошков. МПК 1690794, кл. А 62 D 1/00. Заявка: 1989.04.07. Опубл.: 1991.11.15. Авт. св. СССР № 1335299, кл. А 62 С 3/04, 1986.

60. ГОСТ. Р.12.3.047:98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля: [Введен 2000-01-01]. Изд. офиц. Москва: Госстандарт РФ, 2000. 85 с.

61. Методичний посібник з питань експлуатації та застосування вогнегасників. Київ: Основа, 1997. 149 с.

62. Ковалишин В. В, Марич В. М. Дослідження насадок-заспокоювачів для гасіння пожеж класу D. *Безпека життя і діяльність людини – освіта, наука, практика*: матеріали міжнар. наук.-метод. конф. (Рівне, 18–19 квітня 2019 р.). Рівне: НУВГП, 2019. С. 115–116.

63. Czerwona Księga Pożarów: wybrane problemy pożarów oraz ich skutków: 2 t. / ed. by P. Guzowski, D. Wróblewski, D. Małozieć Krakow: CNBOP-PIB Józefów, 2014. T. 1. 624 s.

64. НПБ 174-98* Порошки огнетушащие специального назначения. Общие технические требования. Методы испытаний. Классификация. Москва: ФГУ ВНИИПО МВД России, 2000. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294850/4294850803.htm>.

65. Баратов А. Н., Вогман Л. П. Огнетушащие порошковые составы. Москва: Стройиздат, 1982. 72 с.

66. ДСТУ 3105-95 Порошки вогнегасні. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1998. 18 с.

67. ГОСТ Р 53280.4-2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Москва: Стандартинформ, 2009. Ч. 4: Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования и методы испытаний. С. 7–8.

68. Сенчихін Ю. М., Сировий В. В. Довідник керівника гасіння пожежі. Київ, 2016. 320 с.

69. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативної-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: Наказ МВС № 340 від 26.04.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/z0802-18>

70. Сабинин О. Ю., Агаларова С. М. Огнетушащие порошки. Проблемы. Состояние вопроса. *Пожаровзрывобезопасность*: сб. науч. трудов. Москва, 2007. Т. 16. № 6. С. 63–68.

71. Ковалишин В. В., Кріса І. Я., Васильєва О. Е., Кирилів Я. Б. Основи експлуатації вогнегасників: навч. посібник. Львів: Сполом, 2011. 304 с.

72. Баратов А. Н., Вогман Л. П. Огнетушащие порошковые составы. Москва: Стройиздат, 1982. 72 с.

73. Сабинин О. Ю. Экспериментальное изучение влияния технологических свойств порошковых составов на их огнетушащую способность при импульсном способе пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность*. Москва, 2008. № 6. С. 64–74.

74. ДСТУ 3972-2000. Техніка пожежна. Установки порошкового пожежогасіння. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань. Київ: Госстандарт України, 2000. 29 с.

75. Довідник рятувальника на випадок виникнення надзвичайних ситуацій з небезпечними хімічними речовинами / Баланюк В. М., Винявська Г. Ф., Квашук В. П. та ін. Львів: Сполом, 2012. 712 с.

76. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. Вогнегасні речовини: посібник. Київ, 2004. 171 с.

77. ДСТУ Б В.2.7-302:2014. Шлак доменний гранульований для цементів, бетонів і будівельних розчинів». Вид. офіц. Київ: Мін-во регіон. розвитку, буд-ва та житл.-комун. госп-ва України, 2015. 21 с.

78. Kang H. et al. Effects of Quenching Rate on the Microstructures and Mechanical Properties of the Heat Treatable Mg-4.2Y-2.3Nd-1.0Gd-0.6Zr Magnesium Alloy. *Materials Science Forum*, 2015. Vol. 816. P. 356–361.

79. Nelson R. Extinguishing Agents and Application Techniques for Combustible Metal Fires: NFPA Handbook. Chapter 11–7, National Fire Protection Association, 2003.

80. NFPA 484, Standard for Combustible Metals. National Fire Protection Association, 2006. 158 p.

81. Wilson C., Tapscott R., Zallen D. Reformulation and Origination of Extinguishing: Phase II. *Agents Extinguishing Agent for Magnesium Fire*. New Mexico Engineering and Research Institute Report TA3-20 prepared for Air Force Engineering and Services Center. Tyndall Air Force Base, 1985. P. 25–46.

82. 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), Springfield,, 2006. (November). 12 p.

83. Wilson C., Plugge M. and Zallen D. Evaluation of Existing: Phase 1. *Agents Extinguishing Agent for Magnesium Fire / New Mexico Engineering and Research Institute Report* prepared for Air Force Engineering and Services Center. Tyndall Air Force Base, 1983. P. 3–24.

84. Firefighter – training – extinguishing – magnesium – fires. *Firehouse*. URL:<https://www.firehouse.com/operations-training/hoselineswater-appliances/article /11300616/firefighter-training-extinguishing-magnesium-fires>.

85. Ковалишин В. В., Марич В. М., Гусар Б. М. та ін. Обґрунтування методики випробувань вогнегасних порошків спеціального призначення. *Пожезна безпека*. 2018. № 33. С. 53–59.

86. ISO 7165:2017. Firefighting – Portable fire extinguishers – Performance and construction.

87. Антонов А. В. Наукові основи розроблення та технології застосування екологічно прийнятних вогнегасних речовин. *Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору*: матеріали XVII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників. Київ: ІДУЦЗ, 2015. С. 23–24.

88. Харченко И. А., Хмельницкий В. В., Сазонов Н. В.. Способ определения оптимальной интенсивности подачи огнетушащего вещества для тушения твердого горючего материала. *Огнетушащие порошковые средства*: сб. науч. трудов. Москва: ВНИПО, 1985. С. 67–72.

89. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В.П. та ін. Вогнегасні речовини: посібник. Київ: Пожінформтехніка, 2004. 176 с.

90. Колосов Г. Г., Сергиенко К. А., Куценко Г. В. Способ получения универсального огнетушащего порошкового состава. *Крупные пожары: предупреждение и тушение*: материалы XVI науч.-практ. конф. (Москва, 2001 г.): в 2-х ч. Москва: ВНИИПО, 2001. Ч. 2. С. 199–204.

91. Галикеев А. Р. Определение пожаровзрывоопасных показателей углеродсодержащих отложений при составлении рецептуры огнезащитных красок и создании огнетушащих порошков. *Нефтегазовое дело*: электр. науч. журнал. 2001. URL: http://www.scholar.ru/catalog.php?page=1&topic_id=84

92. Патент 871804 А62С 1/00 Способ определения огнетушащей способности порошковых составов / Лубяный, Умнягин, Шевцов, Товбин, Емельянов, Слободяник, Забуга, Галаджий, Даценко, Баратов, Вайсман. Заявка 2843374, 28.11.1979, Опубл.: 15.10.1981.

93. Антонов А. В. Теоретическии и практические вопросы разработки огнетушащих веществ в Украине: *Крупные пожары: предупреждение и тушение*: материалы XVI науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Москва: ВНИИПО МВД России, 2001. Ч. 2. С. 10–12.

94. Патент Вогнегасний порошок спеціального призначення «КМ-1» / Ковалишин В. В., Марич В. М., Гусар Б. М., Ковалишин Вол. В., Кирилів Я. Б. Заявка а 2018 01936, 26.02.2018.

95. Патент Заспокоювач для подавання вогнегасного порошку при гасінні пожеж класу D1 / Ковалишин В. В., Марич В. М., Ковалишин Вол. В., Мірус О. Л., Гусар Б. М. Заявка а 20180 03705, 06.04.2018.

96. Тихонов В. Н. Аналитическая химия магния: монография. Москва: Наука, 1973. 254 с. Серия «Аналитическая химия элементов».

97. 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. № 10 (82). P. 31–36.
98. Розенбанд В., Гани А. Синтез порошка диборида магния в режиме теплового взрыва. *Физика горения и взрыва*. 2014. Т. 50. № 6. С. 34–39.
99. Богуслаев В. А., Качан А. Я., Калинина Н. Е. и др. Авиационно-космические материалы и технологии: справочник. Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2009. 351 с.
100. Rourke, D. J. Magnesium – current status and future prospects. *Conference in conjunction with METER 2000: Magnesium New Business Opportunities*: Proc. Intern. Brescia, 2000. P. 14–23.
101. Сон К. Е., Канг М. Ч., Ким К. Х. Исследования и разработки применения магниевых сплавов в Южной Корее. *Литейное производство*. 2006. № 1. С. 8–10
102. Дирина Х., Майер П., Фехнер Д., Болен Я., Кайнер К. У. Настоящее и будущее магниевых сплавов в нашей цивилизации. *Литейное производство*. 2006. № 1. С. 4–7.
103. Корнилов И. И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов: монография. Москва: АН СССР, 1961. 214 с.
104. Юм-Розери В., Рейнор Г. В. Структура металлов и сплавов: монография / пер. с англ.: М. М. Бородкина. Москва: Металлургиздат, 1959. 391 с.
105. Даркен Л. С., Гурри Р. В. Физическая химия металлов: учебник. Москва: Металлургиздат, 1960. 245 с.
106. Гшнейднер К. А. Сплавы редкоземельных металлов. Москва: Мир, 1965. 185 с.
107. Уоббер Дж. Металлургия и металловедение плутония и его сплавов: монография. Москва: Госатомиздат, 1962. 102 с.
108. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова думка, 1987. 829 с.

109. Пат. 39357 Украина: МПК С22С 23/00. Ливарний сплав на основі магнію з підвищеною рідинотекучістю / Шаломеев В. А., Цивірко Е. І., Лукінов В. В., Лисенко Н. О. – заявитель и патентообладатель Запорож. нац. техн. ун-т; заявл. 28.08.08; опубл. 25.02.09, Бюл. № 4.

110. Пат. 39358 Украина: МПК С22С 23/00. Ливарний сплав на основ магнію / Шаломеев В. А., Цивірко Е. І., Лукінов В. В., Лисенко Н. О., Пархоменко А. В. – заявитель и патентообладатель Запорож. нац. техн. ун-т; заявл. 28.08.08; опубл. 25.02.09, Бюл. № 4.

111. Брауэр К. О. Пиротехнические устройства для космических аппаратов. *Вопросы ракетной техники*. 1969. Вып. 10. С. 47–61.

112. Шидловский А. А. Основы пиротехники: уч. пособие. Москва: Машиностроение, 1973. 320 с.

113. Кириченко О. В., Цыбулин В. В., Ващенко В. А., Заика П. И. Пожароопасные свойства пиротехнических нитратных систем. *Комплексне використання сировини, енерго- та ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., (Черкаси, 27-29 трав. 2004 р.). Черкаси, 2004. С. 73–74.

114. Industriehalle brennt Grosseinsatz in Landshut = Промисловий зал горить масштабну операцію в Ландсхуті. URL: https://www.pnp.de/nachrichten/bayern/2972437_Industriehalle-brennt-Grosseinsatz-in-Landshut.html

115. У Німеччині горів баварський завод bmw. Glavk.Info (10 июня 2018 р.). URL: <https://nv.ua/ukr/world/countries/u-nimechchini-horiv-bavarskij-zavod-bmw-2475328.html>

116. В Мадриде из-за пожара химвеществ десятки тысяч людей заставили сидеть дома. Комментарии УА. 2016. URL: <https://comments.ua/world/593821-v-madride-iz-za-pozhara-himveshchestv.html>

117. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих материалов: уч. пособие. Москва: ВИПТШ МВД, 1981. 190 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Проблеми гасіння магнію та його сплавів / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин та ін. Пожежна безпека. 2016. №28. С. 58–63.
2. Дослідження хімічних речовин, як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Я. Б. Кирилів та ін. Пожежна безпека. 2016. № 29. С. 46–56.
3. Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу Д1 / В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів та ін. Пожежна безпека. 2018. №32. С. 45–54. doi: 10.32447/20786662.32.2018.07
4. Вплив насадок–заспокоювачів на ефективність гасіння пожеж класів D1 / В. М. Марич, В. В. Ковалишин, О. Л. Мірус та ін. // Вісник. 2018. № 17. С. 93–101. doi: 10.32447/20784643.17.2018.13
5. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chernetskiy, O. L. Mirus. Efst-ern-European Journal of Enterprise Technogies. 2018. Vol. 5, Issue 5 (95). P. 68–76. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144874
6. Обґрунтування методики випробувань вогнегасних порошків спеціального призначення / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Б. М. Гусар та ін. Пожежна безпека. 2018. № 33. С. 53–59. doi: 10.32447/20786662.33.2018.07

Апробація матеріалів дисертації:

1. Ковалишин В. В., Марич В. М. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 20-21 жовтня 2016 р. Львів, 2016. С. 304–305.
2. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 20-21 жовтня 2016 р. Львів, 2016. С. 316–318.

3. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів. / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Я. Б. Кирилів та ін. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Черкаси, 18-19 травня 2017 р. Черкаси, 2017. С. 59–61.

4. Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію / В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів та ін. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Черкаси, 18-19 травня 2018 р. Черкаси, 2018. С. 54–56.

5. Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, Б. М. Гусар. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 14 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 42–43.

6. Ковалишин В. В, Марич В. М., Бортник М. Я. Вдосконалення конструкції насадки-заспокоювача для підвищення ефективності гасіння пожеж класу D1. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 9-10 жовтня 2018 р. Київ, 2018. С. 213–215.

7. Ковалишин В. В, Марич В. М. Дослідження насадок-заспокоювачів для гасіння пожеж класу D. *Безпека життя і діяльність людини – освіта, наука, практика*: зб. тез доп. міжнар. наук.-метод. конф., м. Рівне, 18-19 квітня 2019 р. Рівне, 2019. С. 115–116.

Патенти:

1. Вогнегасний порошок спеціального призначення «КМ-1» / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Б. М. Гусар, Вол. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів: пат. Україна: МКВ А62D 1/00. № а 2018 01936; заявл. 26.02.2018.

2. Заспокоювач для подавання вогнегасного порошку при гасінні пожеж класу D1 / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин, О. Л. Мірус, Б. М. Гусар: пат. Україна: МКВ А62D 1/01. № а 20180 03705; заявл. 06.04.2018.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник начальника

ГУ ДСНС у Львівській області

полковник служби цивільного захисту

І.М. Дідух

20 18 року



АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Марича Володимира Михайловича

«Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів»

Комісія у складі:

голови комісії – начальника оперативно-координаційного центру полковника сл. ц. з. Марусяка Ю. М.;

членів комісії: заступника начальника відділу організації пожежогасіння та роботи з об'єктовими підрозділами ГУ ДСНС України у Львівській області полковника сл. ц. з. Гуменюка М. М., начальника сектору підготовки та організації служби ГУ ДСНС України у Львівській області підполковник сл. ц. з. Драгана М. І., склала цей акт та стверджує, що результати дисертаційної роботи Марича Володимира Михайловича і запропоновані ним інженерно-технічні рішення, зокрема насадка-заспокоювач для ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів пройшла апробацію у пожежно-рятувальних підрозділах м. Львова.

Голова комісії

Марусяк Ю. М.

Члени комісії

Гуменюк М. М.

Драган М. І.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-дослідної роботи
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності

д. с. г. н., професор

А. Д. Кузик

« 15 » 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи

Комісія у складі:

голови комісії – завідувача кафедри промислової безпеки та охорони праці к.х.н., доцента Міруса О. Л.;

членів комісії: заступника начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт к.т.н., доцента Луца В. І., завідувача науково-дослідної лабораторії Петровського В. Л., встановила, що результати дисертаційної роботи Марича Володимира Михайловича на тему: «Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів» за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук) використовуються у навчальному процесі при викладанні:

– на кафедрі пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт – дисциплін «Пожежна тактика» та «Тактика пожежогасіння та рятувальних робіт»;

– на кафедрі ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій – дисципліни «Пожежна техніка»;

– на кафедрі промислової безпеки та охорони праці – дисципліни «Охорона праці в галузі».

В лекційних курсах навчальних дисциплін використані теоретичні положення та методичні підходи дисертаційної роботи щодо гасіння пожеж легких металів, використання вогнегасного порошку спеціального призначення і насадки-заспокоювача для його подачі та дотримання безпеки праці під час гасіння пожеж класу D магнію та його сплавів.

Завідувач кафедри
промислової безпеки та охорони праці,
к.х.н., доцент

О. Л. Мірус

Заступник начальника кафедри пожежної
тактики та аварійно-рятувальних робіт,
к.т.н., доцент

В. І. Луц

Завідувач науково-дослідної лабораторії

В. Л. Петровський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора
з науково-виробничої роботи
ТзОВ «Науково-виробниче
товариство «Вогнеборець»



Юзьків Т. Б.

20 / 8 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Марича Володимира Михайловича

«Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів»

Комісія в складі:

голови комісії – заступника директора ТзОВ НВП «Вогнеборець»
Лозинського А. Т.;

членів комісії: начальника дільниці виготовлення та перезарядки
вогнегасників Пігія В. І., старшого наукового співробітника Львівського
державного університету безпеки життєдіяльності Кирилів Я. Б., склала цей
акт про те, що матеріали дисертації Марича В. М. «Підвищення ефективності
порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів» використані при
розробці та виготовленні насадки-заспокоювача для гасіння пожеж класу D
магнію та його сплавів.

Виріб пройшов дослідну експлуатацію та показав свою ефективність.
Насадка-заспокоювач призначена для подавання вогнегасного порошку з
метою гасіння пожеж магнію з двома робочими поверхнями – еліптичним
верхом та параболічним відбивачем. Потрапляння порошку на об'єкт гасіння
становить 0,920 кг при використаних 0,978 кг, що складає більше 90 %
вогнегасної речовини, витраченої на гасіння. Заспокоювач з двома робочими

поверхнями ефективніший від попереднього заспокоювача з одностороннім відбивачем з одною робочою поверхнею на 30 % за кількістю порошку, який потрапив в зону горіння. Це покращує ефективність гасіння, дозволяє більшим шаром порошку покривати поверхню горіння, не роздмухуючи стружку з поверхні горючого металу. Час гасіння макетного вогнища при цьому з 20 с зменшується до 7 с.

Використання насадки-заспокоювача планується при виготовленні пристрою для гасіння пожеж класу D.

Голова комісії


Лозинський А. Т.

Члени комісії


Пігій В. І.


Кирилів Я. Б.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Державного
центру сертифікації ДСНС України



Грушовінчук О. В.

20/9 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Марича Володимира Михайловича

на тему «Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів»

Комісія в складі:

голови комісії – начальника лабораторії ДЦС ДСНС України
Ромащенко С. О.;

членів комісії: доцента кафедри процесів горіння та загальної хімії навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки ЛДУБЖД, к.т.н., доцент Баланюка В. М., старшого наукового співробітника ЛДУБЖД, к.т.н. Кирилів Я. Б., склала цей акт, яким підтверджується використання результатів дисертаційного дослідження Марича В. М. «Підвищення ефективності порошкового пожежогасіння магнію та його сплавів» у вигляді проекту «Методики з визначення ефективності гасіння пожеж класу D (гасіння магнію, алюмінію та їх сплавів) вогнегасними порошками спеціального призначення».

В Україні відсутня методика з випробування ефективності вогнегасних порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D. «Методика» може бути взята за основу при розробці відповідної методики в Україні. В даний час використовується для визначення ефективності гасіння пожеж класу D порошками спеціального призначення, до затвердження відповідного ДСТУ.

В розробленій методиці описано як визначити вогнегасну ефективність порошків цільового призначення. В методику входять наступні розділи: визначення щільності вогнегасного порошку; визначення масової частки вологи; визначення схильності до вологопоглинання і злежування; визначення плинності і залишку порошку; випробування порошків цільового призначення шляхом гасіння вогнегасниками штучно створених пожеж класу D.

Встановлено, що для підпалювання магнієвої стружки необхідно використовувати не менше 127 грам бензину марки А-92. Методика наближена до Методики ISO 7165:2017 «Fire fighting – Portable fire extinguishers – Performance and construction».

Використання результатів дисертаційної роботи Марича В. М. дозволяє покращити якість вогнегасного порошку для підвищення рівня протипожежного захисту об'єктів, на яких використовуються магній та його сплави.

Голова комісії

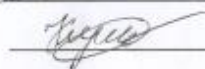


Ромашенко С. О.

Члени комісії



Баланюк В. М.



Кирилів Я. Б.

ДОДАТОК В

Технічні умови вогнегасного порошку спеціального призначення «КМ-1»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора
з науково-виробничої роботи
ТзОВ «Науково-виробниче
товариство «Вогнеборець»

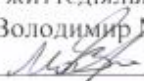


Юзьків Т. Б.
20 18 року

**ВОГНЕГАСНИЙ ПОРОШОК
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ «КМ-1»
ОГНЕТУШАЩИЙ ПОРОШОК
СПЕЦІАЛЬНОГО НАЗНАЧЕННЯ «КМ-1»
SPECIAL DRY CHEMICAL POWDER «КМ-1»
ТУ У 20.5-4003720005:2018**

РОЗРОБЛЕНО

Викладач кафедри ПБ та ОП, ад'юнкт
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності
Марич Володимир Михайлович


« 16 » 11 20 18 року

СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ.

Ці технічні умови поширюються на вогнегасний порошок спеціального призначення «КМ-1» (далі за текстом - вогнегасний порошок), який призначений для гасіння пожеж класу D (магнію, алюміній та їх сплавів) при гасінні вогнегасниками та пожежними автомобілями.

Вогнегасний порошок використовується у вогнегасниках, установках пожежогасіння та пожежних автомобілях порошкового та комбінованого пожежогасіння в усіх кліматичних зонах за ГОСТ 15150 при температурі від мінус 50°C до 50°C.

Ці технічні умови обумовлюють вимоги до вогнегасного порошку, що поставляється для потреб народного господарства України та на експорт.

Приклад запису позначки при замовленні і в технічній документації:

“Порошок вогнегасний «КМ-1» ТУ У 20.5-4003720005:2018”.

Обов'язкові вимоги до якості вогнегасного порошку, які забезпечують його безпеку для життя, здоров'я та майна громадян, охорони довкілля, викладені у розділі 3 цих технічних умов.

Технічні умови треба перевіряти регулярно, але не рідше одного разу на п'ять років, після надання їм чинності чи останнього перевіряння, якщо не виникає потреби перевіряти раніше у разі прийняття нормативно-правових актів відповідних національних (міждержавних) стандартів та інших нормативних документів, якими регламентовано інші вимоги, ніж ті, що встановлені у технічних умовах.



1. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

1.1. Вогнегасний порошок повинен відповідати вимогам ISO 7165:2017 цих технічних умов, та виготовлятися за технологічним регламентом НВП «Вогнеборець», розробленим і затвердженим в установленому порядку, а для постачання на експорт - вимогам контракту.

1.1.1. Основні характеристики

Показники якості вогнегасного порошку повинні відповідати вимогам, що вказані в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1. Показники якості вогнегасного порошку та їх значення.

№з/п	Назва показників якості	Значення параметра
1.	Насипна густина не ущільненого порошку кг/м ³ , не більше	1070
2.	Насипна густина ущільненого порошку кг/м ³ , не більше	1465
3.	Утримання вологи, % не більше	0,3
4.	Вогнегасно здатність, кг/м ²	0,55
5.	Стійкість до термічної дії	стійкий
6.	Стійкість до вібрації	стійкий
7.	Термін зберігання, років, не менше	5

Таблиця 2. Визначення фракцій маси порошку

Кількість порошку під час визначення фракцій, г	Розмір вічка, мм	Середнє значення маси порошку за фракціями, г	Середнє значення маси порошку за фракціями, %
1000	до 0,1	230 – 260	23 – 26
	0,1 – 0,071	230 – 260	23 – 26
	0,071 – 0,045	не менше 440	не менше 44
	менше 0,045	не менше 100	не менше 10



Як видно із опрацьованих результатів, що кількість порошку фракції до 0.1 мм становить не менше 23%. Такий відсоток порошку є необхідний для того щоб при подачі важкі частинки осідали на горючу поверхню та не роздмухувалися.

Якщо порошок задовольняє вимоги таблиць 1 і 2 то він повинен забезпечувати гасіння пожеж класу D (магнію, алюміній та їх сплавів).

1.2. Вимоги до сировини і матеріалів

1.2.1. Якість сировини і матеріалів повинна відповідати стандартам або технічним умовам на їх виготовлення і бути підтверджена відповідними документами (сертифікат або паспорт якості) підприємств-постачальників, сертифікатами походження або сертифікатами відповідності, висновком Державної санітарно-епідеміологічної служби України.

1.3. Маркування

1.3.1. На кожний мішок кріпиться етикетка, яка виготовляється по кресленню підприємства і містить такі дані, нанесенні методом друкування або іншим методом:

- найменування підприємства-виробника;
- найменування вогнегасного порошку;
- клас пожежі, для гасіння якого призначений вогнегасний порошок;
- позначення цих технічних умов;
- номер партії і дата виготовлення (число, місяць, рік);
- маса нетто, кг, з припуском на зважування (+/- 1 кг.);
- гарантійний термін зберігання.

Допускається нанесення вищезазначених даних безпосередньо на пакувальну тару (кожен мішок) методом друкування, згідно кліше підприємства.

У разі постачання вогнегасного порошку на експорт напис "Зроблено в Україні" на етикетці роблять англійською мовою або мовою країни-імпортера, яка вказана у контракті.

1.3.2. Маркування транспортної тари повинно відповідати ГОСТ 14192 та цим технічним умовам з нанесенням маніпуляційних знаків "Берегти від вологи".



1.4. Пакування

1.4.1. Пакування тари, яка використовується для фасування готової продукції, повинна відповідати вимогам відповідної нормативної документації.

1.4.2. Вогнегасний порошок пакують у поліетиленові мішки, які вкладають у чотири- або п'ятишарові мішки марок БМ чи ВМ ДСТУ 7796, або інші види упаковки які не впливають на зберігання та якість порошку.

Внутрішні (поліетиленові) мішки зав'язують з підгином, або фіксують за допомогою пластикового хомута, а зовнішні прошивають машинним способом. Маса нетто (25 ± 1) кг.

За узгодженням зі споживачем вогнегасний порошок може бути упакований у інші види пакування, які не впливають на зберігання та якість вогнегасного порошку.

1.4.3. Пакування вогнегасного порошку для поставки на експорт повинно відповідати вимогам контракту.

1.4.4. Партия порошку повинна супроводжуватись паспортом, що містить такі дані:

- найменування підприємства-виробника;
- найменування вогнегасного порошку;
- клас пожежі, для гасіння якого призначений вогнегасний порошок;
- позначення цих технічних умов;
- номер партії і дата виготовлення (число, місяць, рік);
- загальна маса нетто партії, кг, з припуском на зважування (+/- 1%.);
- гарантійний термін зберігання.



2. ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ

2.1 Загальні вимоги

2.1.1. Вхідний контроль сировини і матеріалів здійснюють відповідно до вимог ГОСТ 24297-87.

2.1.2. Для контролю якості й приймання вогнегасного порошку встановлюють такі категорії випробувань:

2.1.2.1. приймально-здавальні;

2.1.2.2. періодичні.

2.1.3. Для типової оцінки ефективності і доцільності внесення пропонуємих змін до складу виробляємої продукції, технології її виготовлення тощо проводять випробування за категорією типових випробувань.

2.1.4. Для сертифікаційних цілей продукції проводять сертифікаційні випробування у відповідності до вимог.

2.1.5. Засоби вимірювань та контролю, які використовуються під час випробувань та контролю вогнегасного порошку, повинні бути повірені, а випробувальне обладнання атестоване у встановленому порядку.

2.2. Приймання продукції

2.2.1. Приймання вогнегасного порошку проводить лаборант підприємства-виробника.

2.2.1.1. Вогнегасний порошок приймаються партіями.

Партією вважається кількість однорідної за своїми показниками продукції з однієї сировини, що виготовлена за однією й тією ж технологічною документацією, але не більше 25 тон.

2.2.2. Партія вогнегасного порошку постачається споживачу разом із супроводжувальним документом, які посвідчується його відповідність умовам і ДСТУ 3105 (ГОСТ 26952). Супровідний документ повинен містити:

- найменування підприємства-виробника і (або) його товарний знак (за його наявності);

- найменування вогнегасного порошку;



ТУ У 20.5-4003720005:2018

- номер партії вогнегасного порошку;
- дату виготовлення (день, місяць, рік);
- масу нетто (кг);
- позначення цих технічних умов;
- результати приймально-здавальних випробувань вогнегасного порошку, які підтверджують відповідність його якості вимогам цих технічних умов згідно табл. 1; 2.
- термін зберігання.



3. ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ

3.1. Вогнегасний порошок транспортують будь-яким видом транспорту в критичних засобах за температури від мінус 50°C до 50°C згідно з "Єдиними правилами перевезення вантажів".

3.2. Вогнегасний порошок у мішках транспортують у пакетах з використанням плоских піддонів типу 2П04-800x1200Д за ГОСТ 9078 вантажопідйомністю до однієї тони. Скрипіння пакету на піддоні у відповідності до вимог.

3.3. Під час транспортування та зберігання вогнегасного порошку повинні бути забезпечені відповідні умови для запобігання псування упаковки.

3.4. Вогнегасний порошок у споживача повинен зберігатися у зачинених сухих провітрюваних приміщеннях, захищених від атмосферних осадів, в умовах, що забезпечують цілісність упаковки, за температури від мінус 50°C до 50°C і відносній вологості не більше ніж 85 %.



ТУ У 20.5-4003720005:2018

4. ВКАЗІВКИ ЩОДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

4.1. Вогнегасний порошок повинен завантажуватися у сухі та чисті корпуси вогнегасників та установок порошкового пожежогасіння.

4.2. Під час роботи з вогнегасним порошком необхідно користуватися засобами індивідуального захисту.



5. ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА

5.1. Виробник гарантує відповідність показників якості вогнегасного порошку вимогам ДСТУ 3105 (ГОСТ 26952) і даних технічних умов за умови додержання споживачем умов транспортування, зберігання, експлуатації (застосування), що обумовлені даними технічними умовами.

5.2. Гарантійний термін зберігання в упаковці виробника 5 років з моменту виготовлення.

5.3. По закінченні гарантійного терміну зберігання вогнегасний порошок підлягає регенерації або утилізації. Процес регенерації полягає у відновленні властивостей порошку. Для регенерації він відправляється на завод виробник для відновлення його властивостей і характеристик. Порошок можна утилізувати в якості піскосумішей у зимовий період для посипання тротуарних доріжок.

