

У монографії підготовлено практичні рекомендації для використання пневматичної установки для дискретної подачі вогнегасних речовин. Проведені дослідження дозволили обґрунтувати необхідні фізико-механічні параметри контейнерів для дискретної доставки вогнегасної речовини, визначити тип вогнегасної речовини, що дозволяє ефективно локалізувати пожежу. Використання розробленої математичної моделі та створеної на її основі прикладної програми дозволяє вирішувати задачу розрахунку параметрів «обстрілу» мішені (віконного отвору) в залежності від відстані до будівлі та висоти поверху, на якому має місце пожежа, а також від швидкості вітру.

Монографія присвячена вирішенню актуальної теми підвищення ефективності пожежогасіння шляхом зменшення часу вільного розвитку пожежі класу А в багатоповерхових будівлях за рахунок дискретної подачі вогнегасної речовини в контейнерах (капсулах) до осередку пожежі.

Матеріали монографії можна успішно використовувати під час підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 261 Пожежна безпека за освітньо-професійними програмами: «Пожежна безпека», «Пожежогасіння та аварійно-рятувальні роботи».

Монографія орієнтована на наукових, науково-педагогічних та практичних працівників органів та підрозділів служби цивільного захисту, викладачів, ад'юнктів та здобувачів вищої освіти

ISBN 978-617-8688-39-4



9 786178 688394 >

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ЗА РАХУНОК ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

Поліванов Олександр Геннадійович
Калиновський Андрій Якович
Коваленко Роман Іванович

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ЗА РАХУНОК ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

Монографія



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

О. Г. Поліванов, А. Я. Калиновський, Р. І. Коваленко

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПОЖЕЖОГАСІННЯ ЗА РАХУНОК
ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ
ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН**

Монографія

Харків
2025

Рецензенти:

Левтеров Олександр Антонович, доктор технічних наук, професор, заступник начальника кафедри фізико-математичних дисциплін навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки полковник служби цивільного захисту;

Ключка Юрій Павлович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора навчально-наукового інституту будівництва і цивільної інженерії ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

*Рекомендовано до друку
вченою радою НУЦЗ України
(протокол від 30.10.2025 року № 3)*

ПЗ2 **Підвищення ефективності пожежогасіння за рахунок дискретної подачі вогнегасних речовин** / О. Г. Поліванов, А. Я. Калиновський, Р. І. Коваленко ; Держ. служба України з надзв. ситуацій ; Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків : «Диса Плюс», 2025. – 140 с.

ISBN 978-617-8688-39-4

У монографії підготовлено практичні рекомендації для використання пневматичної установки для дискретної подачі вогнегасних речовин. Проведені дослідження дозволили обґрунтувати необхідні фізико-механічні параметри контейнерів для дискретної доставки вогнегасної речовини, визначити тип вогнегасної речовини, що дозволяє ефективно локалізувати пожежу. Використання розробленої математичної моделі та створеної на її основі прикладної програми дозволяє вирішувати задачу розрахунку параметрів «обстрілу» мішені (віконного отвору) в залежності від відстані до будівлі та висоти поверху, на якому має місце пожежа, а також від швидкості вітру.

Монографія присвячена вирішенню актуальної теми підвищення ефективності пожежогасіння шляхом зменшення часу вільного розвитку пожежі класу А в багатоповерхових будівлях за рахунок дискретної подачі вогнегасної речовини в контейнерах (капсулах) до осередку пожежі.

Матеріали монографії можна успішно використовувати під час підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 261 Пожежна безпека за освітньо-професійними програмами: «Пожежна безпека», «Пожежогасіння та аварійно-рятувальні роботи».

Монографія орієнтована на наукових, науково-педагогічних та практичних працівників органів та підрозділів служби цивільного захисту, викладачів, ад'юнктів та здобувачів вищої освіти

УДК 614.84

© Поліванов О. Г., Калиновський А. Я.,
Коваленко Р. І. , 2025
© НУЦЗУ, 2025

ISBN 978-617-8688-39-4

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень.....	5
Вступ.....	7

РОЗДІЛ 1.

**АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І СПОСОБІВ
ПОЖЕЖОГАСІННЯ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ДОСТАВКУ
ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН.....**

1.1. Аналіз розвитку пожеж у багатоповерхових будівлях у містах України	15
1.2. Аналіз використання вогнегасних речовин та способів їх доставки для цілей пожежогасіння	26
1.3. Аналіз дальності доставки вогнегасних речовин, основи забезпечення безпеки та ефективності гасіння пожеж.....	33
1.4. Аналіз ефективності застосування технічних засобів пожежогасіння та способів доставки вогнегасних речовин	39
1.5 Висновки до розділу I.....	41

РОЗДІЛ 2.

**ОБґРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ
ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН.....**

2.1. Устаткування для дискретної подачі вогнегасних речовин.....	42
2.2. Дослідження критичних швидкостей та навантажень на контейнер для дискретної доставки вогнегасної речовини.....	50
2.2.1. Геометрична модель і скінчено-елементна модель контейнера	55
2.2.2. Граничні умови, властивості матеріалу	53
2.2.3. Результати дослідження на ударне навантаження	56
2.2.4. Імовірнісне моделювання руйнування контейнера у формі сфери.....	66
2.3. Дослідження процесу руйнації шибки.....	68
2.3.1. Побудова геометричної моделі шибки і її скінчено- елементна модель.....	69
2.3.2. Визначення початкових умов.....	70
2.3.3. Аналіз результатів розрахунків.....	73
2.4. Висновки за розділом 2.....	78

РОЗДІЛ 3.

ЕФЕКТИВНІСТЬ СПОСОБУ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ	81
3.1. Експериментальна перевірка ефективності використання методу локалізації пожежі класу А дискретною подачею вогнегасної речовини.....	81
3.2. Експериментальне визначення параметрів купності влучення контейнером у ціль.....	85
3.3. Оцінка ефективності устаткування для контейнерної доставки вогнегасної речовини	92
3.4. Висновки за розділом 3	99

РОЗДІЛ 4.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ СПОСОБУ ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ	101
4.1. Підхід до розрахунку зовнішньої балістики контейнера для дискретної доставки вогнегасної речовини	101
4.2. Побудова настільної і навісної траєкторій, які перетинаються в заданій точці вікна.....	102
4.3. Розрахунок доставки контейнера з мінімальною початковою швидкістю до вікна з пожежею.....	107
4.4. Розрахунок траєкторії доставки контейнера до вікна за двома відомими відстанями	110
4.5. Вплив бічного вітру на траєкторію доставки контейнера.....	116
4.6. Практичне застосування способу локалізації пожежі шляхом дискретної доставки вогнегасної речовини.....	121
4.7. Висновки за розділом 4.....	123
Висновки	125
Список використаних джерел	127

Перелік умовних позначень та скорочень

$\ddot{u}$	– компоненти вузлового прискорення ($i = 1, 2, 3$);
F_i	– це сили, що діють на вузлові точки;
b_i	– компоненти прискорення тіла;
m	– маса, що приписується вузлу;
Δt	– приріст часу;
f	– коефіцієнт часу стабільності;
h	– характерний розмір елемента;
c	– місцевий матеріал, що використовується в елементі;
C_f	– безрозмірний коефіцієнт опору форми;
F_o	– сила опору, (в ньтонах);
ρ	– щільність середовища, ($\text{кг}/\text{м}^3$);
v	– швидкість потоку (або тіла в потоці), ($\text{м}/\text{с}$);
S	– характерна площа перпендикулярно потоку, (м^2);
t	– час;
v	– швидкість;
g	– прискорення вільного падіння, ($\text{м}/\text{с}^2$);
Q_{SR}	– середнє значення витрати вогнегасної речовини на гасіння пожежі, що забезпечується технічним засобом, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;
S_{MAX}	– максимальне значення вогнегасної здатності, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$;
I	– оптимальне значення інтенсивності подачі вогнегасної речовини при гасінні, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$;
m_b	– маса всього запасу вогнегасної речовини, кг ;
μ та γ	– є параметрами логарифмічного нормального низького рівня;
$\sigma(v)$	– залежність виникаючих напружень від швидкості падіння;
$\bar{v}_0$	– швидкість тіла в момент кидка;
P	– імовірність влучання контейнером;
v_0	– початкова швидкість вильоту контейнера, ($\text{м}/\text{с}$);
α	– кут вильоту контейнера;
L	– від установки дискретної подачі вогнегасної речовини до стіни;
H	– висота положення вікна від рівня землі;
W_y	– швидкість бічного вітру, ($\text{м}/\text{с}$);

<i>T</i>	– тривалість руху контейнера, (с);
<i>x</i>	– горизонтальна дальність руху контейнера (м);
<i>V</i>	– вектор швидкості контейнера;
<i>УДПВР</i>	– установка дискретної (капсульної) подачі вогнегасних речовин;
<i>КВР</i>	– контейнер (капсула) з вогнегасною речовиною;
<i>ВР</i>	– вогнегасна речовина;
<i>ВП</i>	– вогнегасний порошок.

Вступ

Пожежа – це стихія, яка не терпить зволікань. Кожна втрачена хвилина від моменту її виникнення до початку гасіння обертається стрімким зростанням осередку, збільшенням матеріальних збитків і загрози для життя людей, особливо на верхніх поверхах багатоповерхівок. Сучасні виклики, пов'язані з гасінням пожеж у висотних будівлях громадської забудови, вимагають інноваційних рішень, які б дозволили скоротити час реагування та мінімізувати руйнівні наслідки вогню.

Відомо, що найбільш ефективною є боротьба з пожежею на початковому етапі її розвитку. Втрата кожної хвилини від моменту виникнення пожежі до початку її гасіння призводить до нелінійного збільшення площі осередку, зростанню матеріальних збитків і загроз здоров'ю і життю мешканців осель або робітників установ, особливо верхніх поверхів багатоповерхових будівель, а також необхідності залучення більших матеріальних і людських ресурсів для локалізації і ліквідації пожежі.

Існує велика кількість наукових праць, спрямованих саме на розвиток цього напрямку. Це роботи Гасанова Х. Ш., Song L. Z., Wang K., Arewa A. O., Tapscott R. E., Товарянський В. І., Кузик А. Д., Басманов О. Є., Кустов О. О., Ніжник В. В., Коваленко, В. В., Карвацька м.Я., Михалічко Б. М.

У той же час, гасіння пожеж у будівлях громадської забудови (пожеж класу А), які не оснащені сучасними конструкційними рішеннями, досі здебільш відбувається водою, що транспортується за допомогою пожежних рукавів, які підключаються або до систем внутрішнього водопостачання, або до зовнішніх джерел води. Оперативне розгортання пожежно-рятувальних підрозділів при гасінні пожеж в багатоповерхових будівлях потребує часу тим більшого, чим вище знаходиться осередок пожежі, і може складати 5–25 хвилин. Необхідність підйому пожежно-рятувального відділення в повному екіпіруванні на верхні поверхи пішки сходовими маршами призводить до значного зниження працездатності особового складу ще до початку ними процесу пожежогасіння.

Зменшити інтервал часу від моменту прибуття пожежного розрахунку до моменту початку локалізації («час введення першого ствола») можна за рахунок застосування альтернативних методів пожежогасіння, що мають значно менший час оперативного розгортання, і хоча можуть і не ліквідувати пожежу, але спрямовані на пригнічення осередку (тобто знижують швидкість зростання її площі та температури). Застосування таких більш оперативних способів пожежогасіння призводить до меншої площі пожежі, меншому тепловиділенню й меншій температурі в осередку пожежі в момент початку основної локалізації пожежно-рятувальними розрахунком.

До наукових досліджень у цьому напрямку можна віднести роботи Дубініна Д. П., Коритченко, А. А., Кіреєва О. О., Остапова К. М., Wang, Q., Takahashi F., Кодрика А. І.

Також слід зазначити, що існують дистанційні методи боротьби з вогнем, які дозволяють уникнути безпосереднього контакту особового складу пожежно-рятувальних підрозділів із вражаючими факторами пожежі (прикладом якої може бути скидання вогнегасної речовини з літаків або гелікоптерів, а також використання так званих «пожежних бомб» при гасінні пожеж в екосистемах).

У той же час застосування дистанційних методів впливу на пожежі в громадській забудові не набуло відповідного розвитку.

Одним із таких дистанційних методів, що характеризується значно меншим часом оперативного розгортання (не більше 2 хвилин), може бути запропоновано метод доставки капсульованої вогнегасної речовини, або інакше – метод дискретної подачі. При цьому подача відбувається шляхом «обстрілу» осередку пожежі крізь віконний отвір палаючої будівлі контейнерами, що наповнені вогнегасною речовиною, з компактною пневмо-імпульсною установки, яка доставляється пожежним розрахунком і встановлюється на поверхні землі біля будівлі, де має місце пожежа, або монтується на пожежному автомобілі по аналогії з лафетним стволом. Дана установка мусить бути штатним озброєнням пожежно-рятувального розрахунку, має бути простою в експлуатації і не потребувати складного технічного обслуговування.

На даний момент відсутні подібні наукові розробки, не існує обґрунтувань характеристик балістики й параметрів контейнерів для подачі вогнегасної речовини, не досліджена ефективність застосування даного способу боротьби з пожежами. А отже, питання підвищення ефективності пожежогасіння за рахунок дискретної подачі вогнегасних речовин є актуальною науково-прикладною задачею.

Монографія присвячена вирішенню актуальної теми підвищення ефективності пожежогасіння шляхом зменшення часу вільного розвитку пожежі класу А в багатоповерхових будівлях за рахунок дискретної подачі вогнегасної речовини в контейнерах (капсулах) до осередку пожежі.

У монографії викладено результати розв'язання комплексу задач фундаментального та прикладного характеру:

- обґрунтовано тип устаткування для дискретної подачі вогнегасної речовини та параметри контейнера для подачі вогнегасних речовин;
- отримано методами комп'ютерного моделювання опис процесу руйнації контейнера під час зіткнення з твердою поверхнею та процес руйнації віконного скла для випадків наповнення контейнера рідкою вогнегасною речовиною та вогнегасним порошком;
- експериментально підтверджено ефективність пожежогасіння за рахунок зменшення часу вільного розвитку пожежі при дискретній подачі вогнегасної речовини в контейнерах;
- отримано математичні моделі зовнішньої балістики контейнера при дискретній подачі вогнегасної речовини;
- розроблено практичні рекомендації використання устаткування для дискретної подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі багатоповерхової будівлі.

У монографії використано комплексний метод досліджень, що включає аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень із питань аналізу статистичних даних параметрів пожеж у багатоповерхових будівлях; застосовувалось математичне моделювання параметрів балістики з використанням апарату диференціальних рівнянь; методами комп'ютерного моделювання отримано опис процесу руйнації контейнера під час зіткнення з твердою поверхнею

та процес руйнації скла віконного отвору при попаданні в нього контейнера; методи теорії ймовірностей застосовувались для отримання параметрів купчастості влучності контейнера в ціль та оцінки ймовірностей влучення у віконний отвір. Під час проведення експериментальних досліджень застосовувалися метрологічно атестовані засоби вимірювальної техніки та дослідні зразки власного виробництва. Результати теоретичних та експериментальних досліджень оброблялися з використанням програмного забезпечення з використанням комп'ютерної техніки.

У монографії вперше запропоновано устаткування для дискретної (капсульованої) подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі та експериментально отримано параметри влучання.

Вперше запропоновано й експериментально підтверджено ефективне застосування контейнерів (капсул), споряджених вогнегасним порошком, для дистанційної локалізації осередків пожеж класу А в багатоповерхових будівлях.

Удосконалено теоретичний опис зовнішньої балістики контейнера (капсули) для доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі на верхні поверхи багатоповерхових будівель.

У монографії підготовлено практичні рекомендації для використання пневматичної установки для дискретної подачі вогнегасних речовин. Проведені дослідження дозволили обґрунтувати необхідні фізико-механічні параметри контейнерів для дискретної доставки вогнегасної речовини, визначити тип вогнегасної речовини, що дозволяє ефективно локалізувати пожежу. Використання розробленої математичної моделі та створеної на її основі прикладної програми дозволяє вирішувати задачу розрахунку параметрів «обстрілу» мішені (віконного отвору) в залежності від відстані до будівлі та висоти поверху, на якому має місце пожежа, а також від швидкості вітру.

Наукові результати, викладені в монографії, особисто отримані авторами на основі експериментальних та теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності пожежогасіння за рахунок дискретної подачі вогнегасних речовин. Автори особисто брали участь у підготовці та проведенні всіх експериментальних досліджень.

Отримані результати висвітлено в наступних наукових працях: [1] розроблено геометричну модель нового способу доставки в осередок пожежі вогнегасної речовини; [2] визначено ймовірності руйнування залежно від випадкових значень властивостей матеріалу та критичних навантажень при руйнуванні контейнера (капсули) з різним типом вогнегасного наповнення при ударному навантаженні методами комп'ютерного моделювання; [3] проведено аналіз вогнегасних речовин, які широко застосовуються підрозділами державної служби з надзвичайних ситуацій України, проаналізовано способи їх застосування та методи подачі вогнегасних речовин; [4] розроблено спосіб моделювання переміщення в межах вертикальної площини контейнера з вогнегасною речовиною; [5] наведено геометричне моделювання руху контейнера з вогнегасною речовиною; [6, 14] проаналізовано статистичні дані, які були отримані від оперативно-координаційних центрів ДСНС України в містах Київ, Харків, Полтава, Бердянськ, що характеризують процес гасіння пожеж, а саме час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до місця пожежі, час локалізації пожежі та площу пожежі; [7] розроблено спосіб розрахунку траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікна пожежі на верхніх поверхах будинків, коли в якості засобу доставки використовується УДПВР; [8] отримано патент України на корисну модель способу доставки вогнегасного елемента в осередок пожежі; [9] отримано патент України на корисну модель способу гасіння пожежі; [10] наведені основні способи руйнування контейнера з вогнегасною речовиною; [11] наведені проблеми гасіння пожеж у висотних будівлях та запропоновано використовувати УДПВР; [12, 16, 17] проведено дослідження руйнування скла в момент зіткнення контейнера для дискретної доставки вогнегасної речовини; [13] наведено основні аспекти дослідження дискретної доставки вогнегасних речовин у контейнері; [15] досліджено матеріал, з якого виготовляється контейнер із вогнегасною речовиною; [18] розроблено спосіб розрахунку траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до внутрішньої території, закритої будівлями; [19] досліджено спосіб розрахунку траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до заданого вікна на верхніх поверхах будинків, де виникла пожежа;

[20] розроблено комп'ютерну програму, яка дозволила скласти таблицю кутів вильоту контейнера з вогнегасною речовиною залежно від висоти поверху; [21] наведено спосіб розрахунку траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до багатопверхових будівель, де виникла пожежа; [22, 23, 24] складено *maple* – програму побудови траєкторії за умови, що відомі висота розташування «палаючого» вікна й відстань від УДПВР до стіни, розв'язана задача моделювання доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа; [25] проведені експериментальні досліджень дискретної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі.

Монографія може бути рекомендована для викладачів, ад'юнктів, аспірантів та здобувачів вищих навчальних закладів під час вивчення навчальних дисциплін за напрямками: «Цивільний захист», «Пожежна безпека», а також для науково практичних працівників і фахівців зазначених напрямів.

Розділ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І СПОСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ДОСТАВКУ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

Відповідно до статистичних даних [26–30] ситуація, пов'язана з виникненням надзвичайних ситуацій внаслідок пожеж, за період із 2018 по 2022 рік в Україні залишалася складною (рис. 1.1).

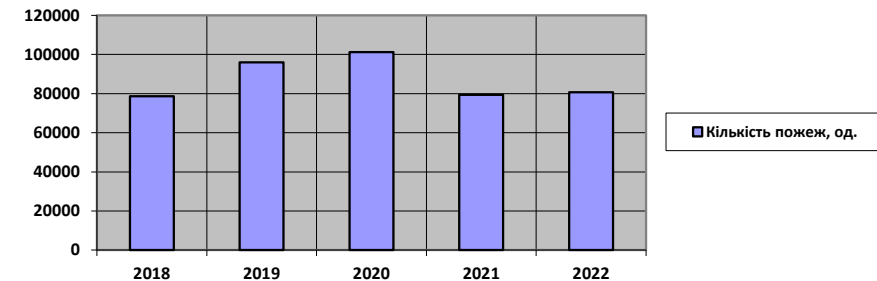


Рис. 1.1. Кількість пожеж в Україні за період 2018–2022 рр.

Останні п'ять років, відбулося збільшення виділених коштів у забезпечення пожежної безпеки, зниження кількості пожеж у 2021 році проти 2020 року становило трохи більше 21%, а у 2022 році знову спостерігається зростання цього показника на 1,5% у порівнянні із попереднім роком. Зниження кількості пожеж не призвело до зменшення обсягів завданих матеріальних збитків. Більше того, спостерігається динаміка збільшення матеріальних збитків та втрат (рис. 1.2). Це говорить, з одного боку, про збільшення кількості складних і особливо складних пожеж за період, що розглядається, а з іншого – про недостатню ефективність сучасної протипожежної техніки для їх ліквідації.

Останні п'ять років матеріальні втрати від пожеж щорічно збільшувалися в середньому на 10% за рік, а у 2022 році матеріальні втрати проти 2021 року збільшилися в 7,4 рази – це пов'язано з повномасштабним вторгненням російської федерації в Україну.

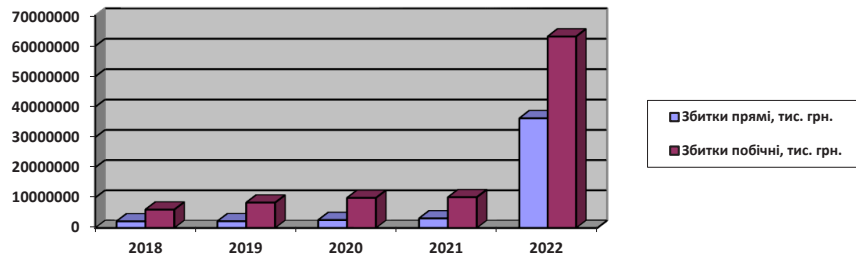


Рис. 1.2. Матеріальні втрати від пожеж у 2018–2022 роках

Кількість загиблих під час пожеж людей знизилася за період із 2018 по 2022 р. на 16,2% (рис. 1.3), що може характеризувати виникнення великих пожеж на різних об'єктах, складах, ландшафтних територіях, місцях із перебуванням невеликої кількості людей.

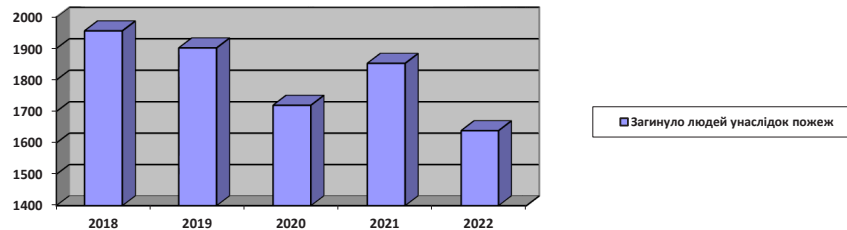


Рис. 1.3. Кількість загиблих від пожеж людей за 2018–2022 роки

При цьому за кількістю загиблих на сто пожеж Україна посідає одинадцяте місце у світі, за кількістю загиблих на сто тисяч населення Україна посідає третє місце у світі (попередю лише росія та білорусь) [31].

Найбільш характерними причинами складної обстановки забезпечення пожежної безпеки є мала ефективність існуючої протипожежної

техніки та технічних засобів доставки вогнегасних речовин, зниження показників оперативного реагування на пожежі, що виникають; велике «зношування» пожежної техніки; погіршення обстановки на дорогах, що ускладнює проїзд пожежної техніки; зростаюча пожежна небезпека в промисловості, будівництві, на об'єктах енергетики, зв'язку, транспорту, видобутку та переробки корисних копалин, використання значної кількості пожежонебезпечних речовин і сполук, прогресуючий знос обладнання (у ряді галузей знос основних фондів досягає 70–90%) [32–33].

Великі пожежі, що відбулися за останні п'ять років [29], показали, що необхідно переоснащення пожежно-рятувальних служб та підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту якісно новою технікою, що дозволяє застосовувати перспективні вогнегасні засоби та подавати вогнегасні речовини на віддалену відстань і велику висоту. Необхідно розробляти зразки технічних засобів доставки на віддалену відстань, застосовуючи нові технології та способи пожежогасіння.

1.1. Аналіз розвитку пожеж у багатоповерхових будівлях у містах України

Проблема гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях є однією з найбільш актуальних для пожежно-рятувальних підрозділів у мегаполісах. Зазначені будівлі мають підвищений ступінь потенційної небезпеки, у порівнянні зі звичайними будівлями, сили й засоби залучаються за підвищеним номером виклику [34–37].

Ступінь пожежної безпеки будівель і споруд залежить від їх конструкції, планування, технічного оснащення й особливо від ступеня горючості самих конструкційних і оздоблювальних матеріалів, використовуваних при будівництві. На жаль, повністю відмовитися від застосування горючих (або різного ступеня горючості й пожежної небезпеки) матеріалів майже неможливо. У більшості випадків забудовники нехтують правилами та використовують горючі, токсичні

матеріали при будівництві, що призводить до загибелі людей внаслідок пожеж.

Деякі речовини на пожежі згорають (окислюються) повністю, інші частково. Не повністю згорілі утворюють складні хімічні сполуки: спирти, альдегіди, кетони, кислоти та інші. Вони здатні горіти тривалий час. Продукти неповного горіння створюють отруйний, їдкий дим. Повітря, насичене горючими речовинами, стає вибухонебезпечним. Ситуація ускладнюється наявністю високих температур, які прискорюють хімічні процеси.

Рідкі й тверді частинки продуктів горіння обмежують проходження сонячного світла. Велика їх концентрація унеможливорює евакуацію людей із палаючих будівель, приміщень. Обмеження видимості не дозволяє орієнтуватися в незнайомому місці. Така ситуація може супроводжуватися панікою. Прямой загрози життю людей від обмеження видимості немає, але під час хаотичного руху натовпу вони можуть загинути або покалічитися.

Для висотних будівель характерні швидкий розвиток пожежі по вертикалі й інтенсивне задимлення евакуаційних шляхів, ліфтових шахт, сходових клітин (найбільш інтенсивно відбувається задимлення верхніх поверхів). Пожежі, що відбуваються у висотних будівлях, часто призводять до численних людських жертв через велику складність забезпечення безпечної евакуації та проведення рятувальних робіт. При пожежі можливий вихід із ладу ліфтового обладнання та систем протипожежного захисту.

Для введення вогнегасних речовин в осередок пожежі потрібен значний час, а це впливає на розміри пожежі. Зазвичай, у зв'язку із щільним паркуванням автомашин, відсутня можливість оперативного розгортання автодрабин та колінчатих автопідйомників, що призводить до збільшення часу вільного розвитку пожежі. При зовнішній пожежі таких будівель на висоті вище 10–12-го поверху може скластися зовсім катастрофічна ситуація.

По-перше, тому, що переважна більшість пожежних автодрабин розрахована на висоту будівлі до 10-го поверху. По-друге, за законами гідравліки та типу пожежно-технічного озброєння пожежно-рятуваль-

них підрозділів, по робочому тиску пожежних насосів подача води без проміжних насосів-підвищувачів тиску або мотопомп на висоту вище 12–15 поверхів надзвичайно складна. Потрібно заборонити застосування в будівництві висотних будівель в якості зовнішньої теплоізоляційної захисту всі види горючих, слабогорючих і важкогорючих теплозахисних матеріалів.

Подача води на зовнішню поверхню стіни висотного будинку висотою 50–60 метрів та ще в умовах щільної міської забудови – завдання практично нерозв'язне, а на велику висоту 100–150 метрів більше – взагалі нездійсненна.

Вирішувати проблеми пожежогасіння тільки за рахунок оснащення пожежно-рятувальних підрозділів дорогими автоколінчатими підіймачами вже недоцільно, так як їх застосування на висоті 60 м не ефективно.

Масштабні пожежі, що сталися в останні роки, довели необхідність переозброєння оперативного-рятувальних підрозділів новою технікою та засобами пожежогасіння.

Тобто є необхідність розроблення нового способу доставки вогнегасних речовин до осередку пожежі, який дозволить знизити час локалізації пожежі. Відомо, що чим більша площа пожежі, тим більше необхідно засобів пожежогасіння для успішної локалізації та ліквідації горіння. Отже, невирішеною частиною проблеми гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях є встановлення зв'язку між такими параметрами, як площа горіння, поверхом будівлі, де відбулось загорання, та часом локалізації пожежі [7].

У роботах [38] метою дослідження є підвищення ефективності ліквідації пожеж за рахунок скорочення часу виявлення осередку пожежі при використанні тепловізорів. Визначено час розвитку пожежі, також було проведено аналіз значень часу прибуття підрозділів до місця пожежі, час ліквідації пожеж, але поза увагою авторів залишилися дослідження площі пожеж.

Дослідниками [39] проаналізовано умови пожежного захисту висотних будівель, наведено приклади розподілу будівель на відсіки, запропоновано комплекси розрахунків для забезпечення пожежної безпеки.

Слід зауважити, що авторами не виявлено закономірності між поверхом будівлі, де виникла пожежа, площею пожежі та часом локалізації.

У роботі [40] запропонована система пожежогасіння LY100 береться як приклад, щоб представити застосування пожежного дрона для контролю пожежі у висотних будинках. Недоліками даного способу пожежогасіння є: дорога вартість дрону, складність управління, потребується додаткове навчання оператора дрона, також постає питання доставки дрона до місця пожежі.

Мета авторів [41] цього дослідження полягала в тому, щоб забезпечити обізнаність і розуміння того, як пожежно-рятувальні служби використовують тактику гасіння пожеж у висотних будівлях. У дослідженні також були розглянуті три приклади пожеж у висотних будівлях двох країн. У роботі [42] проведено параметричне дослідження стратегій евакуації в 32-поверховій типовій офісній будівлі під час різних сценаріїв впливу пожежі. Імітується рух пасажирів з усвідомленням ситуації та без нього. Оцінюється вплив таких критичних параметрів, як: кількість поверхів, ширина шляхів виходу, розташування та кількість виходів на процес евакуації. Час, потрібний мешканцям для евакуації з будівлі, оцінюється за звичайних умов (щоб імітувати вправу евакуації при пожежі) і за реалістичного впливу пожежі.

Дослідниками [43] оцінюється пожежне навантаження та розвиток пожежі для сучасних житлових квартир, використовуючи результати обстеження 50 багатоповерхових будинків у Стамбулі, Туреччина. Основу дослідження складає пожежне навантаження в житлових кімнатах, спальнях і кухнях.

У дослідженні [44] проаналізовано час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до місця пожеж у висотні будівлі, запропоновано, щоб мінімальна вимога була такою: «принаймні одна пожежна машина з водою та одна автодрабина повинні прибути на місце пожежі висотної будівлі протягом 4 хвилин (240 с)».

Авторами роботи [45] розроблено підхід до моделювання реалістичної випадкової швидкості виділення тепла (HRR), створеного за допомогою процесу Гауса.

У роботі [46] авторами проведені дослідження в надвисокій лікарні (17 поверхів) у 2018–2019 роках. Проект було поділено на два етапи: 1) підготовка 3D-моделі лікарні за допомогою програмного забезпечення для моделювання 3D CAD; 2) техніка обчислювальної гідродинаміки (CFD) використовується для прогнозування динаміки пожежі (поширення диму, розподіл температури, швидкість виділення тепла та загальна енергія) у лікарні за допомогою Fire Dynamic Simulator (FDS).

У роботі [47] мета дослідження полягала в тому, щоб розробити систему індексів протипожежного захисту для вимірювання відповідності висотних житлових будинків протипожежним вимогам в еміраті Шарджа, а також розробити систему індексів для вимірювання ефективності реагування на пожежу, яка пов'язує два індекси, і чим вищий рівень відповідності, тим більше шансів на успішне реагування.

Отже, у результаті огляду літературних джерел [38–47] були виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, а саме взаємозв'язок між такими параметрами, як площа пожежі, поверх, де вона виникла, та час локалізації такої пожежі. [6, 25]. Є необхідність обробки статистичних даних щодо виникнення пожеж у багатоповерхових будівлях міст на прикладі України та встановлення зв'язку між площею горіння, поверхом будівлі та часом локалізації пожежі.

Міста можуть значно відрізнятися по чисельності населення та площі території, що впливає на кількість викликів підрозділів та час виконання окремих оперативних робіт. Враховуючи це, необхідно провести поділ міських населених пунктів на відповідні групи за чисельністю населення та площею території. Вказане дослідження проводилося на прикладі міських населених пунктів України. Загалом були зібрані статистичні дані про чисельність населення міських населених пунктів та площу їх територій. Вказані статистичні дані були отримані з офіційних сайтів Головних управлінь статистики в областях та офіційних сайтів міських рад. Загалом для дослідження були відібрані дані про 176 міських населених пунктів України. Поділ населених пунктів на групи проводився з використанням методів кластерного аналізу. Через те, що статистичні дані для проведення аналізу мали різні розмірності,

на першому етапі було проведено нормування даних. Наступний етап досліджень передбачав проведення ієрархічного кластерного аналізу з побудовою вертикальної дендрограми. В якості міри відстані для ознак кластеризації було обрано евклідову метрику, а з метою побудови ієрархічної структури був використаний метод Варда. За принципом наочності кластеризації за дендрограмою нами було визначено кількість кластерів. Їх кількість склала чотири. На третьому етапі досліджень було проведено перевірку точності отриманих за результатами ієрархічного кластерного аналізу результатів шляхом виконання повторного аналізу з використанням ітеративного методу групування *k*-середніх. Мірою відстані для ознак кластеризації під час використання вказаного методу групування була також евклідова метрика. У результаті проведення цього аналізу було виконано групування міських населених пунктів України на чотири групи за чисельністю населення та площею території. Різниця між визначеними кластерами за критерієм евклідової відстані наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Евклідова відстань між кластерами

Номер кластеру	1	2	3	4
1	0	42,54474	74,99847	68,18812
2	6,522633	0	4,88304	3,63132
3	8,660166	2,20976	0	0,23931
4	8,257609	1,90560	0,48919	0

Чисельність населених пунктів по визначеним групам та середні значення й середнє квадратичне відхилення показників, за якими проводилося групування, наведені в табл. 1.2.

У склад першого кластеру увійшло тільки одне місто – Київ. У другий кластер увійшли міські населені пункти із чисельністю населення від 316492 до 1048958 чоловік та площею від 248,2 до 484,4 км². До цих міст належать, наприклад: Харків, Одеса, Львів, Луганськ,

Донецьк, Дніпро та ін. Третій кластер складають міські населені пункти із чисельністю населення від 50085 до 110329 чоловік та площею від 70,7 до 115,1 км². До цієї групи міст увійшли: Бахмут, Бердянськ, Довжанськ, Ірпінь, Лисичанськ, Селидове, Покров та ін. Четвертий кластер складають міські населені пункти із чисельністю населення від 220363 до 340367 чоловік та площею від 59,6 до 130,8 км². Міськими населеними пунктами, які увійшли до цього кластеру, наприклад є: Вінниця, Житомир, Івано-Франківськ, Кременчук, Рівне, Полтава, Маріуполь, Суми, Чернігів та ін.

Таблиця 1.2.

Результати проведення кластерного аналізу ітераційним методом *k*-середніх

Номер кластеру	Кількість населених пунктів, які входять у групу	Середня чисельність населення міст, чоловік	Середнє квадратичне відхилення показника чисельності населення міст, чоловік	Середня площа міст, км ²	Середнє квадратичне відхилення показника площі міст, км ²
1	1	2965255	–	836	–
2	12	682725	366233	366,3	118,1
3	15	80207	30122	92,9	22,2
4	16	280365	60002	95,2	35,6

Наступним кроком було опрацювання статистичних даних, які характеризують процес гасіння пожеж аварійно-рятувальними формуваннями міст. Дані були взяті з електронної системи ведення обліку пожеж та їх наслідків, яка використовується ДСНС України. З кожної групи міст було відібрано по одному населеному пункту й далі по ним опрацьовані дані щодо пожеж за період 2020 року. Для проведення досліджень були відібрані наступні міські населені пункти: Київ (1-й

кластер), Харків (2-й кластер), Бердянськ (3-й кластер), Полтава (4-й кластер). У табл. 1.3 вказані дані щодо поверхів, де виникла пожежа, площі пожежі та часу ліквідації.

Таблиця 1.3.

Результати обробки статистичних даних.

Харків			Київ		
Поверх	Час (хв.) локалізації	Площа (м. ²) пожежі	Поверх	Час (хв.) локалізації	Площа (м. ²) пожежі
1	10,2	5,86	1	6,2	4,3
2	11,2	10,07	2	7,2	6,16
3	14,3	9,97	3	8,1	6,54
4	14,8	10,3	4	8,6	9,9
5	15,3	13	5	9,5	11,2
6	23,7	15,79	6	13,4	15,4
7	24,3	16,2	7	16,2	17,2
8	26,1	17,3	8	19,3	21,3
9	27,3	20,1	9	23,4	25,4
Бердянськ			Полтава		
Поверх	Час (хв.) локалізації	Площа (м. ²) пожежі	Поверх	Час (хв.) локалізації	Площа (м. ²) пожежі
1	6	3,3	1	10	6,25
2	5	5,2	2	12,25	8,1
3	8,5	11	3	13,5	9,3
4	9,75	11,2	4	15,6	11,2
5	11,1	13,2	5	17	14,1
6	23	16,3	6	20,2	16,4
7	28	20,5	7	24	18,1
8	29	22	8	24,5	19,2
9	27,2	20	9	25	22,1

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Харкові подано на рисунку 1.4.

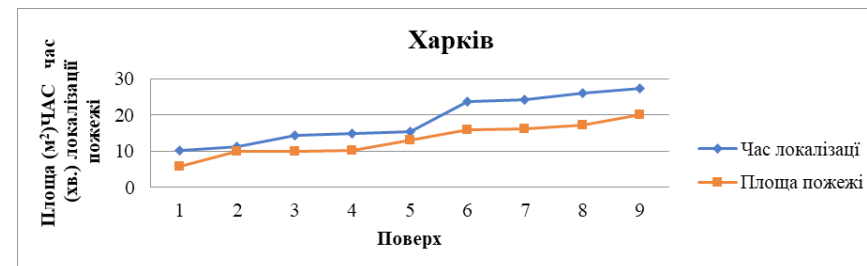


Рис. 1.4. Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху, де вона виникла, м. Харків.

Аналізуючи графічну залежність, яка подана на рисунку 1.4, встановлено, що для м. Харків характерне збільшення часу локалізації пожежі та відповідно збільшення її площі при підвищенні поверху будівлі. Час локалізації при виникненні на 1 поверсі будівлі становить близько 10 хвилин, а площа пожежі приблизно 6 м². У разі виникнення пожежі на 9 поверсі час локалізації та площа пожежі збільшується майже в 3 рази та становить 27 хвилин. Площа пожежі відповідно збільшується приблизно в 3,5 рази та становить майже 20 м². Отже, результати свідчать, що при підвищенні висоти (поверху) зростає час локалізації і площа.

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Київ подано на рисунку 1.5

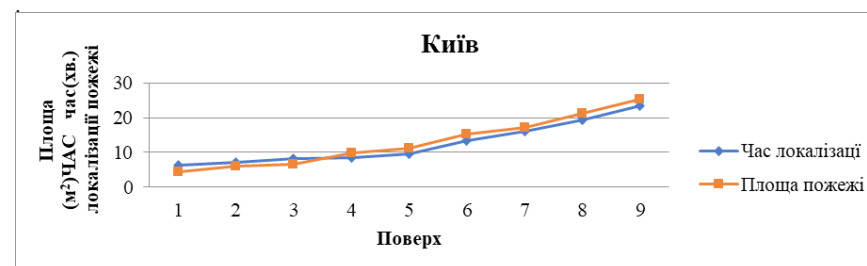


Рис. 1.5. Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху де вона виникла, м. Київ

Графік на рисунку 1.5 свідчить, що час локалізації та площа пожежі мають характерність збільшуватися при підвищенні рівня (поверху) де виникла пожежа. Встановлено, що найбільший час локалізації спостерігається при виникненні пожежі на 9 поверсі та становить майже 24 хвилини, площа пожежі відповідно складає $25,4 \text{ м}^2$. При зниженні рівня (поверху) виникнення пожежі, час локалізації зменшується в 4 рази та становить 6 хвилин. Площа пожежі знижується в 6 разів, відповідно від 25 м^2 до $4,3 \text{ м}^2$.

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Бердянськ подано на рисунку 1.6.

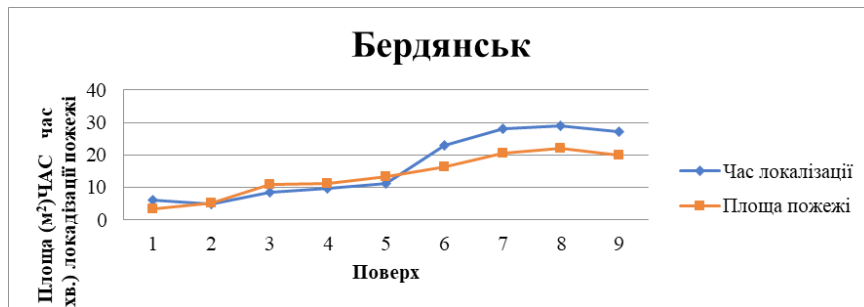


Рис. 1.6. Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху, де вона виникла, м. Бердянськ.

Обробка статистичних даних у м. Бердянськ (рис. 1.6) дозволила встановити – з підвищення поверху, де виникає пожежа, зростають також і час локалізації пожежі та її площа. Відповідно час локалізації при виникненні на 1 поверсі будівлі становить близько 6 хвилин, а площа пожежі приблизно 3 м^2 . У разі виникнення пожежі на 8 поверсі час локалізації та площа пожежі збільшується майже в 4 рази та становить 27 хвилин. Площа пожежі відповідно збільшується майже в 7 разів та становить 22 м^2 .

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Полтава подано на рисунку 1.7.

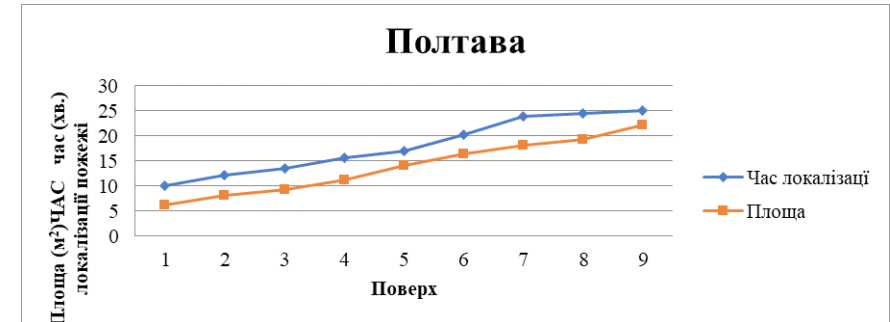


Рис. 1.7 Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху, де вона виникла, м. Полтава.

У м. Полтава (рисунк 1.7) також спостерігається збільшення часу локалізації пожежі та площі горіння при підвищенні рівня (поверху), де виникла пожежа. Таким чином найменша площа горіння та найнижчий час локалізації спостерігається на 1 поверсі, відповідно $6,25 \text{ м}^2$ та 10 хвилин. У разі виникнення пожежі на 9 поверсі час локалізації становить 25 хвилин, що у 2,5 рази більше ніж на 1 поверсі. Стосовно площі горіння, вона відповідно збільшилась в 3,5 рази та становить майже $22,1 \text{ м}^2$.

Під час дослідження нами було проведено поділ міських населених пунктів на відповідні групи за чисельністю населення та площею території із використанням методів кластерного аналізу. Опрацьовано статистичні дані, які характеризують процес гасіння пожеж аварійно-рятувальними формуваннями міст. З кожної групи міст було відібрано по одному населеному пункту й далі по ним опрацьовані дані щодо пожеж за період 2020 року. Для проведення досліджень були відібрані наступні міські населені пункти: Київ (1-й кластер), Харків (2-й кластер), Бердянськ (3-й кластер), Полтава (4-й кластер).

Встановлено взаємозв'язок зв'язку наступних параметрів: площа горіння, поверх будівлі, час локалізації пожежі.

Для кожного з міст, що були оброблені, спостерігається зростаюча динаміка стосовно площі пожежі та часу локалізації при підвищенні

рівня (поверху), де виникла пожежа. Отримані статичні дані свідчать, що площа пожежі та час локалізації збільшується в середньому від 3,5 до 6 разів, що зумовлює необхідність зменшення часу локалізації за рахунок подачі вогнегасних речовин у контейнерах (капсулах) зовні будівель.

1.2. Аналіз використання вогнегасних речовин та способів їх доставки для цілей пожежогасіння

Один із напрямків щодо зменшення збитків та вірогідності травмування та загибелі людей – це застосування універсальних вогнегасних речовин та способів їх подачі в осередок пожежі. У сучасних умовах гасіння пожеж різних класів відрізняється одне від одного. У кожному конкретному випадку необхідно застосовувати технічні засоби, які дають найбільший ефект гасіння.

Сьогодні вогнегасні речовини за домінуючим принципом припинення горіння поділяються на чотири групи (табл. 1.4).

Таблиця 1.4.

Вогнегасні речовини за домінуючим принципом припинення горіння

Охолоджувальної дії	Ізольуючої дії	Діють переважно за рахунок розведення газового горючого середовища	Інгібувальної дії
вода, водні розчини, діоксин вуглецю у твердому стані	повітряно-механічна піна, вогнегасні порошки, негорючі сипкі матеріали (пісок, земля, флюси, графіт), листові матеріали (азбестові, брезентові покривала, щити тощо)	водяна пара, тонко розпилена вода, хімічно малоактивні гази	галогеновані органічні сполуки, вогнегасні порошки, аерозолі вогнегасні речовини

Окрім них існує низка вогнегасних речовин складного компонентного складу. Вони використовуються як заряди до вогнегасників і стаціонарних систем пожежогасіння [48–52].

У літературі з пожежної справи досить повно досліджені питання пожежогасіння за допомогою подавання розпиленних струменів води в осередок пожежі за допомогою ручних стволів [53–61]. Як недолік можна відмітити, що невисока кінематична в'язкість води обумовлює її швидке стікання з поверхонь, що горять, у результаті чого на саме гасіння витрачається не більше 4–6% всієї поданої води, а решта її проливається марно, призводячи до псування негорючих приміщень, будівель, споруд, майна, техніки тощо. Для усунення цього недоліку застосовуються водні розчини (піноутворювач, гелеутворюючі сполуки [62–68], солі калію) [69–84].

Результати досліджень в області порошкового пожежогасіння [85–92] показують, що вогнегасна здатність порошків значною мірою залежить від способу їх подавання на осередок пожежі. У цих роботах було розглянуто ефективність застосування порошкових сумішей та способів їх подання в осередок пожежі.

У роботах [93–96] авторами розглянуто варіант гасіння пожеж у важкодоступних місцях шляхом використання серій ударних хвиль. Як недолік можна відмітити складність виготовлення установки та доставки її до місця пожежі.

Для гасіння пожеж методом розведення застосовуються гази-розріджувачі [97–99]. Можна виділити три способи подачі газів. У повітряну зону – застосовується для припинення горіння в закритих технологічних апаратах і закритих приміщень малих і середніх об'ємів. Газ розріджувач змішується з повітрям і конвекційними потоками доставляється в зону реакції горіння. Крім того, цей метод може використовуватися для запобігання вибухів в якості флегматизаторів. У зону горіння – застосовується для гасіння речовин і матеріалів, що горять на відкритому просторі. У горючу речовину – для зниження інтенсивності горіння речовини й зниження температури його горіння при підготуванні гасіння іншим методом або для запобігання запалення. До переваг газового пожежогасіння можна віднести: мінімальний збиток при впливі на матеріали,

що захищаються, й обладнання, оперативність при використанні, можливість тривалої експлуатації в автоматичному режимі, зниженні вимоги до профілактики при обслуговуванні, можна використати при гасінні пожеж різних класів у початковій стадії розвитку. Особливо ефективне застосування інертних газів при захисті музейних цінностей, архівів, бібліотек, обчислювальних центрів і інших особливо важливих об'єктів, де найбільш пріоритетним завданням є максимально можливе збереження матеріальних цінностей. Недоліки об'ємного гасіння інертними вогнегасними засобами: сумарна витрата газу приблизно дорівнює двократному об'єму приміщення, тому він використовується для приміщень з обмеженим об'ємом, для гасіння потрібна велика кількість балонів, отже, великі витрати на їх обслуговування (можуть застосовуватися скраплені гази), вогнегасна концентрація в 3–5 раз вище, ніж небезпечні для людей концентрації, тому необхідна сигналізація й витяжна вентиляція. Сполуки на основі галоїдвуглеводнів ефективно гасять полум'яне горіння різних вуглеводнів. Їх можна застосовувати як засіб об'ємного, так і локального гасіння. Найбільше застосування хладони знайшли в автоматичних стаціонарних установках пожежогасіння, що забезпечують об'ємне гасіння в приміщеннях, що захищаються, об'єм яких не перевищує 6000 м³. Ці речовини, на перший погляд, здаються нешкідливими для людини та навколишнього середовища та є дуже ефективним засобом об'ємного пожежогасіння. Але нарівні з позитивними якостями сполуки на основі хладонів мають ряд недоліків. При високих температурах можливе самозаймання хладона й виділення галогенів і галогеноводню, що впливає на стан людини. Ці речовини мають токсичні властивості, особливо продукти їх термічного розкладання та газоподібні продукти горіння [97].

Ефективність використання різних вогнегасних речовин буде залежати від класу пожежі. Саме класи пожеж, тобто види горючих речовин, визначають необхідність використання тих чи інших конкретних вогнегасних засобів або їх комбінацій.

Кожна вогнегасна речовина має свою сферу застосування. Вони використовуються в якості зарядів для переносних (пересувних)

вогнегасників, модульних, автономних, стаціонарних систем пожежогасіння.

З метою пожежогасіння використовується широкий спектр технічних засобів, розроблених як для захисту будівель, споруд, так і для доставки необхідного спеціального обладнання, інструменту, засобів захисту оперативних розрахунків пожежно-рятувальних підрозділів. Щоб можна було швидко й ефективно загасити пожежу, важливо правильно підібрати вогнегасний склад і забезпечити його швидку доставку в осередок пожежі. Вибір суміші для боротьби з пожежею на конкретному об'єкті визначається їх фізичними й хімічними характеристиками.



Рис. 1.8. Загальна класифікація технічних засобів доставки вогнегасних речовин для гасіння пожеж

До технічних засобів пожежогасіння належать системи, установки, автоматичні системи пожежогасіння, первинні, мобільні засоби пожежогасіння, пожежне обладнання, ручний, механізований інструмент.

Підручними засобами пожежогасіння є багри, ломы, лопати, відра, ящики з піском, ємності з водою, кошма, хлопавки та інше.

У підрозділах ДСНС найбільше розповсюдження отримали мобільні засоби пожежогасіння, до яких відносяться всі типи основних та спеціальних пожежних автомобілів, спеціальна авіатехніка, пожежні вертольоти, літаки, пожежні поїзди, судна, пристосована з метою пожежогасіння техніка, танки, трактори, тягачі, автоцистерни, причеми зі спеціальним обладнанням, пожежні мотопомпи.

Відповідно до загальної класифікації існує широкий спектр технічних засобів доставки вогнегасних речовин для гасіння пожеж, рис. 1.8.

На оснащенні підрозділів ДСНС України знаходиться техніка, яка не є достатньо ефективною для гасіння складних пожеж і не вирішує проблему доставки сучасних ефективних вогнегасних речовин (аерозолеутворюючих речовин, вогнегасних порошкових сполук, екологічно чистих хладонів, твердого двоокису вуглецю й металоорганічних сполук) на відстань понад 100 м. Тому сьогодні гостро стоїть проблема вдосконалення наявного парку пожежної техніки, створення технічних засобів пожежогасіння нових поколінь.

За способом утворення енергії викиду вогнегасних речовин та подачі їх до осередку пожежі існують:

- доставка вогнегасних речовин без використання порохових зарядів;
- доставка з використанням порохових зарядів;
- доставка з використанням твердих та рідких палив.

Ці способи визначають дальність доставки вогнегасної речовини. Кожен із способів доставки працює у відповідному діапазоні дальності доставки та видів вогнегасних речовин, що застосовуються.

Технічні засоби пожежогасіння реалізують різні способи доставки різних видів вогнегасних речовин. Гасіння пожеж за допомогою ручних і лафетних стволів, пожежних автопідіймачів, автодрабин здійснюється із застосуванням води й піни.

До найбільш застосованих способів доставки вогнегасної речовини можливо віднести способи, що забезпечують безперервну подачу потоком у вигляді суцільної маси вогнегасної речовини: методи подачі води, пінних розчинів, газу, порошкових складів [48]. Дані способи реалізуються із застосуванням таких технічних засобів доставки, як ручні та лафетні стволи, водопінні установки та установки типу «Пурга», автодрабини, автопідіймачі та інші. Але, як правило, розглянуті засоби служать для доставки води або піни, виключаючи застосування та доставку інших видів вогнегасних речовин.

Спосіб «кидання» забезпечується в основному ручним вогнегасником, що закидається, начиненим порошковими вогнегасними зарядами [99].

Найбільш широке застосування знайшли технічні засоби та способи [53], що не використовують порохові заряди для доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі. Технічні засоби з використанням порохових зарядів, твердих і рідких палив висувають високі вимоги щодо їх зберігання, транспортування, застосування та є коштовними.

Найбільш ефективним за універсальністю доставки вогнегасних речовин є контейнерний (капсульний) спосіб доставки. Він має широкий спектр різних видів вогнегасних речовин, які можуть доставлятися. При цьому контейнерний спосіб охоплює найбільшу кількість доставки різних видів вогнегасних речовин, що існують у даний час.

Перспективними технічними засобами пожежогасіння є стволові установки, такі як дискретної подачі вогнегасних речовин (далі УДПВР). Ці установки є принципово новими технічними засобами пожежогасіння, їх дослідження й розробка актуальна для розвитку сучасних способів пожежогасіння. Використання цих установок дозволить ефективно вирішувати завдання доставки різних вогнегасних речовин на відстань понад 100 м за рахунок метання в контейнерах (капсулах) під час гасіння пожеж різних класів на особливо небезпечних об'єктах, забезпечуючи при цьому безпеку особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України.

У роботі пропонується розробка безпечного для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України способу доставки різних вогнегасних речовин у залежності від класів пожеж (рис. 1.9)

та конструкцію контейнера (капсули) з вогнегасною речовиною (далі КВР) (рис. 1.10).

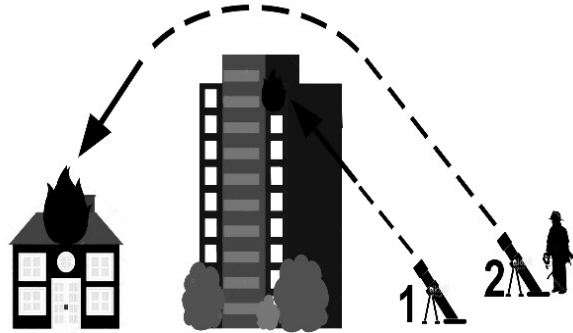


Рис. 1.9. Схематичне зображення подачі з безпечної відстані за допомогою УДПВР контейнера (капсули) з вогнегасною речовиною (КВР). 1. Доставка КВР у вікно багатоповерхівки в осередок пожежі. 2. Доставка КВР на значну відстань для гасіння складних пожеж.

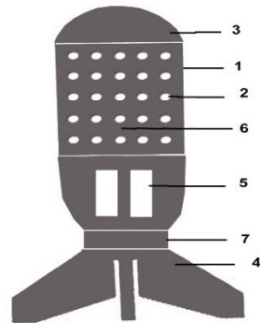


Рис. 1.10. Схема КВР для УДПВР. 1. Корпус. 2.Отвори для розпилу вогнегасної речовини із заглушками. 3. Головна частина корпусу. 4. Хвостовик. 5. Піропатрон або ємність із стисненим повітрям. 6. Ємність із вогнегасною речовиною. 7. Бікфордів шнур

Проведений аналіз свідчить про те, що розроблено багато різних видів вогнегасних речовин, але універсальної вогнегасної речовини, яка б задовольняла вимог економічності, екологічної безпеки та вогнегасної ефективності, а головне для гасіння усіх класів пожеж не розроблено.

Тому модернізація способів подачі цих вогнегасних речовин є перспективним та актуальним завданням подальшого наукового пошуку.

Сучасні способи гасіння пожеж шляхом подачі вогнегасних речовин не завжди є безпечними для життя пожежних-рятувальників, тому вважаємо, що застосування способів та пристроїв для подачі вогнегасних речовин із безпечної відстані є пріоритетним напрямком розвитку пожежогасіння.

Як один із напрямків вирішення питання щодо гасіння пожеж різних класів із безпечної відстані запропоновано використовувати УДПВР.

1.3. Аналіз дальності доставки вогнегасних речовин, основи забезпечення безпеки та ефективності гасіння пожеж

Велику роль успішної ліквідації пожежі грає безпека особового складу підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту з організацією оперативних дій під час гасіння пожеж [100–103]. Даний фактор забезпечується показниками дальності доставки вогнегасної речовини. Поняття віддаленої відстані доставки визначається як відстань, на якій необхідно гасити складні та особливо складні пожежі за допомогою розташованих на землі технічних засобів доставки. Це відстань понад 100 метрів, із робочим діапазоном доставки вогнегасних речовин 100–250 метрів. Діапазон 250 і більше метрів для засобів пожежогасіння наземного розташування можна розглядати як діапазон доставки на далекі відстані вогнегасних речовин. Відстань доставки до 100 метрів сприймається як ближня. Подача вогнегасних речовин із віддаленої відстані та на далеких відстанях дозволяє запобігти вражаючій дії небезпечних

факторів пожежі та їх вторинних проявів на особовий склад. Особливо це важливо при гасінні пожеж на великих об'єктах підвищеної вибухо- та пожежонебезпечності: ємності, резервуари з нафтопродуктами та пально-мастильними матеріалами; об'єкти нафтогазодобування; гасіння пожеж на свердловинах нафтових та газових родовищ; об'єкти нафтохімії та об'єкти хімічних виробництв; склади та сховища; ліси, лісові насадження, природоохоронні об'єкти; вибухопожежонебезпечні об'єкти; радарні та астрофізичні об'єкти, висотні об'єкти; склади та сховища заводів та підприємств із горючими, отруйними, хімічнонебезпечними та вибухонебезпечними речовинами установки; обладнання атомних електростанцій; об'єкти аеродромів; гасіння пожеж аеродромів, ангарів при авіаційних катастрофах; енергетичні установки тощо.

Максимальну дальність доставки вогнегасних речовин нині здатні забезпечити технічні засоби наземного розташування, що використовують реактивний снарядний метод із використанням твердих та рідких палив. Так, наприклад, у Франції використовується самохідна протипожежна батарея реактивних снарядів при гасінні лісів, чагарників та зернових культур у місцях, де необхідно швидко обмежити поширення пожежі. Реактивні снаряди працюють на твердому паливі й мають дальність польоту 200–1500 м. При ударі снаряда о землю вогнегасна речовина, що міститься в головній частині снаряда, покриває площу гасіння.

Переважає більшість пожежної техніки, котра використовується на теперішній час у територіальних підрозділах ДСНС України, не дозволяє доставляти вогнегасні речовини (ВР) на відстань більше 100 м. Наявні в Україні різні типи пожежних автоцистерн, із різним набором технічних засобів пожежогасіння, здатні з використанням лафетних стволів доставити воду на відстань до 70 м, максимальна відстань подачі розчинів вогнегасних пін низької та середньої кратності, з використанням установок комбінованого гасіння пожеж типу «Пурга», складає до 100 м. При використанні пожежних автомобілів порошкового пожежогасіння максимальна дальність подачі вогнегасних порошоків складає до 70 м.

Перевагами імпульсного пожежогасіння є підвищення ефективності гасіння за рахунок збільшення дисперсності потоку, збільшення дальності подачі вогнегасної речовини й підвищена мобільність установок

гасіння [105–107]. Гасіння пожежі здійснюється за рахунок інгібуючої дії на факел вогнегасного порошку, викид якого здійснюється енергією стисненого повітря або порохового заряду. У зоні горіння фонтану протягом короткого часу ($1\div 2$ с) імпульсно створюється концентрація вогнегасного порошку шляхом спрямованого залпового викиду установкою. В Україні розроблені та активно застосовуються пневматичні порошкові полум'яподавлювачі ППП-200, що містять 200 кг вогнегасного порошку, що викидаються за один постріл [108]. Відомі розробки [109, 110], в яких використані стаціонарно встановлені імпульсні порошкові установки пожежогасіння, що автоматично спрацьовують при виникненні пожежі, що визначається інфрачервоними випромінювачами або тепловізорами.



Рис. 1.11. Гусенична броньована пожежна машина «Імпульс-3» в пожежній частині Чорнобиля, 2015 рік

Із числа наявних у розпорядженні ДСНС України зразків пожежної техніки, найбільшу дальність подачі вогнегасних речовин забезпечує

імпульсна багатостволова установка «Імпульс-3» рис. 1.11 [111, 112]. Даний тип ствольних установок був створений на Київському танко-ремонтному заводі на базі шасі танків Т-62. Машини мають 50 стволів (Імпульс-1-40), кожен з яких заряджається по 30 кг порошку. «Імпульс-Шторм» здатний доставити в осередок пожежі за 4 с. 1,5 т вогнегасного порошку. Це дозволяє створити потужну вогнегасну дію відразу й одночасно по всій площі або об'єму. Основною відмінністю даної установки є потужна ударна дія на осередок пожежі в поєднанні з вогнегасними ефектами, що створюються спеціальними порошковими складами. Дальність ефективного гасіння становить до 50 м.

Найбільш безпечною вогнегасною речовиною, з точки зору впливу на людину та навколишнє середовище, є вода. Застосування для гасіння в імпульсному режимі подачі реалізовано фірмою iFEX у вигляді установок залпового водяного пожежогасіння, встановлених на шасі позашляховика (рис. 1.12), гелікоптера або танка Leopard 1 [113, 114]. Найбільш вражаючим пристроєм із перерахованих є Fire Commander (рис. 1.13) з баштовою двоствольною пневмо-імпульсною водяною «гарматою» фірми «iFEX-3000», що робить постріл залпом із двох стволів по 40 літрів води, утворюючи шквал тонкодисперсної води дальністю до 40–50 метрів, при реальній дальності гасіння до 15 метрів. На шасі розташована цистерна з 10 тонн води, насос подачі води в канали стволів, компресор високого тиску.



а)



б)

Рис. 1.12. Мобільні пневматичні установки імпульсного пожежогасіння
а) IFEX FireHunter, б) IFEX Helicopter



Рис. 1.13. Пожежний танк IFEX

На сьогодні створені різні типи нових вогнегасних речовин і їх сумішей, вогнегасна здатність яких по багатьом параметрам перевершує водні розчини та піни, такі як: аерозолеутворюючі склади, вогнегасні порошки (ВП) різних рецептур, екологічно чисті хладони, твердий двоокис вуглецю й металоорганічні сполуки, при цьому на озброєнні протипожежних підрозділів на даний час відсутні технічні засоби та пожежна техніка здатна забезпечити їх ефективну високоточну подачу до осередку пожежі на відстань більше 100 м [115–120].

Тому в даний час гостро стоїть проблема створення принципово нових технічних засобів пожежогасіння та розробка нових способів доставки вогнегасних речовин на віддалену відстань при гасінні складних пожеж. Найбільш раціональним розв'язанням цієї проблеми є використання УДПВР – у КВР, що забезпечує високоточну контейнерну (капсульну) доставку різного виду вогнегасних речовин безпосередньо в зону горіння. В якості УДПВР може бути використаний один з існуючих типів пневматичної установки пожежогасіння (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Імпульсні ранцеві пневматичні установки пожежогасіння
а) Тайфун-1-10; б) Витязь УПТ 10/1(0,4) – 2; в) IFEX 3000

Використання УДПВР дозволить ефективно вирішувати завдання віддаленої доставки різних вогнегасних речовин і сумішей методом метання в контейнерах при гасінні складних пожеж у багатоповерхових будівлях та на особливо небезпечних об'єктах (зони хімічного зараження, території мінних загороджень, пожежі на арсеналах і т.п.), забезпечуючи при цьому безпеку особового складу пожежно-рятувальних підрозділів.

Максимальна дальність доставки вогнегасних речовин від 50 до 250 м можуть мати технічні засоби контейнерного методу доставки із числа технічних засобів наземного розташування й такі, що не використовують порохові заряди.

Вогнегасна речовина міститься в контейнер у вигляді капсули, яка має обтічну форму, що дозволяє досягти максимальної дальності метання контейнера.

За контейнерним способом дальності доставки з обмеженим набором вогнегасних речовин (води, піни) слідує потоковий спосіб.

З їх використанням можливо досягти дальності доставки води й піни, як правило, у межах до 100 м, порошкових вогнегасних складів – до 70 м. Найменшу дальність доставки вогнегасних речовин

здатний забезпечити імпульсний спосіб – до 30 м. Порівняно невелика дальність польоту вогнегасних речовин пояснюється їх розпорошенням після вильоту з установки. Однак сильне розпилення вогнегасного заряду в зоні горіння відіграє позитивну роль в успішному придушенні процесу горіння із застосуванням імпульсного методу при гасінні пожеж на невеликих до 30 метрів відстанях. До того ж установки, що використовують імпульсний метод доставки вогнегасних речовин, здатні викидати велику кількість вогнегасної речовини в одиницю часу. Велика кількість вогнегасної речовини, що подається в одиницю часу на одиницю площі, є основним фактором для швидкої локалізації та успішного гасіння пожежі.

1.4 Аналіз ефективності застосування технічних засобів пожежогасіння та способів доставки вогнегасних речовин

Для порошкових складів коефіцієнт ефективності використання вогнегасної речовини протипожежною технікою можна оцінити із співвідношення [121, 122]

$$K_{ef} = \frac{Q_{SR}}{S_{MAX} \cdot I \cdot m} \quad (1.1)$$

де Q_{SR} – середнє значення витрати вогнегасної речовини на гасіння пожежі, що забезпечується технічним засобом, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

S_{MAX} – максимальне значення вогнегасної здатності, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$;

I – оптимальне значення інтенсивності подачі вогнегасної речовини при гасінні, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

m_i – маса всього запасу вогнегасної речовини, кг .

Технічних засобів, що подають порошкові вогнегасні склади наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5.

**Характеристики технічних засобів, що подають порошкові
вогнегасні склади**

Технічний засіб	Запас ВР, кг	Максимальна витрата ПС, кг · с ⁻¹	Коефіцієнт вико- ристання вогне- гасної речовини
Поточний метод			
АП-5 мод. 196 АЗ «Пожмашина» (м. Прилуки, Україна), 1982 г.	6000	50	0,05
АП-4 мод. 222 ПО «Пожмашина» (м. Прилуки, Україна), 1991 г.	4000	115	0,16
ГроЛФ 5000 (Німеччина)	5000	50	0,06
Біокарбо 6000 (Франція)	6000	66	0,06
Імпульсний метод			
Імпульсна пожежна установка «Імпульс Шторм»	3000	300	0,57

Проаналізувавши характеристики технічних засобів, що подають порошкові склади, можемо зазначити, що максимально ефективно використання порошкових складів можна досягти із застосуванням імпульсних та контейнерних методів. Так у імпульсній пожежній установці «Імпульс Шторм» коефіцієнт становить 0,57 за рахунок великої витрати вогнегасної речовини (300 кг · с⁻¹). Однак велика витрата призводить до швидкоплинності роботи та зобов'язує за п'ять залпів забезпечити ефективний процес гасіння (для витрати 300 кг · с⁻¹ – 5 секунд). Так як загальна маса порошкового складу, що вистрілюється за п'ять залпів, становить 1500 кг, а маса порошкового складу, що вивозить установка, становить 3000 кг, то запасу вогнегасної речовини вистачає на десять залпів. При цьому потрібен значний час для перезарядки після п'яти залпів та здійснення нових залпів – 15 хвилин.

Висновки до розділу 1

1. У результаті дослідження було проведено поділ міських населених пунктів на відповідні групи за чисельністю населення та площею території із використанням методів кластерного аналізу. Опрацьовано статистичні дані, які характеризують процес гасіння пожеж аварійно-рятувальними формуваннями міст. З кожної групи міст було відібрано по одному населеному пункту й далі по ним опрацьовані дані щодо пожеж за період 2020 року. Для проведення досліджень були відібрані наступні міські населені пункти: Київ (1-й кластер), Харків (2-й кластер), Бердянськ (3-й кластер), Полтава (4-й кластер). Встановлено взаємозв'язок наступних параметрів: площа горіння, поверх будівлі, на якому виникла пожежа, та час локалізації пожежі. Для кожного з міст, що були оброблені, спостерігається зростаюча динаміка стосовно площі пожежі та часу локалізації при підвищенні рівня (поверху), де виникла пожежа. Отримані статичні дані свідчать, що площа пожежі та час локалізації збільшується в середньому від 3,5 до 6 разів (для 8–9 поверхів порівняно з першим), що зумовлює необхідність зменшення часу локалізації за рахунок зменшення часу вільного розвитку пожежі шляхом подачі вогнегасних речовин у контейнерах (капсулах) зовні будівель.

2. Проведено аналіз методів пожежогасіння та виявлено, що найкращим для гасіння пожеж із віддаленої відстані є контейнерний спосіб, що реалізується установкою дискретної подачі контейнера (капсули).

3. Проведено аналіз існуючих засобів пожежогасіння, які мають спільні риси з дискретним контейнерним способом подачі вогнегасних речовин. Встановлено більш високі можливості при гасінні пожеж УДПВР у порівнянні з існуючими способами імпульсної подачі вогнегасних речовин.

4. Запропоновано, як один із напрямків вирішення питання, щодо гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях використовувати УДПВР різних сумішей вогнегасних речовин у контейнерах (капсулах) в осередок пожежі за рахунок пневматично-імпульсного способу.

Розділ 2

ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

2.1 Устаткування для дискретної подачі вогнегасних речовин

У роботі запропоновано використовувати в якості засобу для дискретної подачі вогнегасної речовини установку імпульсного пожежогасіння Тайфун [8, 9].

Універсальні високоефективні імпульсні установки пожежогасіння «ТАЙФУН-1-10», «ТАЙФУН-1-20», «ТАЙФУН 60» були розроблені та випускалися Северодонецьким ВАТ «Хімавтоматика» Луганська область Україна (рис.2.1).

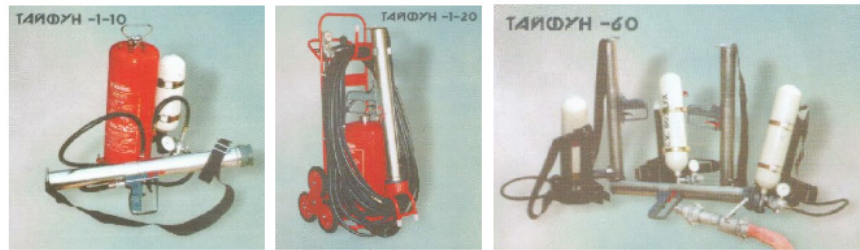


Рис. 2.1. Імпульсі установки Тайфун –10,20,60

Установки імпульсного пожежогасіння (ТУ У 046 812 827004–96) захищені патентами України та успішно пройшли сертифікаційні випробування в системі УкрСЕПРО та отримали високу оцінку провідних

фахівців та схвалення на найвищому державному рівні та були закуплені й поставлені на озброєння в пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України. Головною особливістю установок «Тайфун» є те, що подача вогнегасної речовини в осередок пожежі здійснюється не постійним потоком, а імпульсними високошвидкісними пострілами зі спеціального ствола. При цьому вогнегасна речовина розпорошується на дрібні частинки, створюючи хмару водяного туману.

Установки «ТАЙФУН» мають ряд переваг у порівнянні з найкращими закордонними аналогами.

Установки «ТАЙФУН» мають:

- високу швидкодію;
- мобільність – швидка доставка до місця пожежі та швидка підготовка до роботи;
- безпека для людей та екологічна безпека;

Основні характеристики імпульсних установок Тайфун наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Характеристики імпульсних установок Тайфун

Найменування показників	Тайфун-1-10	Тайфун-1-20	Тайфун-60
1. Місткість, л: – для води	10	23,5	Автономний
– балона для повітря	2	4	4х3
2. Кількість імпульсних викидів вогнегасної речовини	10	20	60
3. Вогнегасна здатність за 150/DUS7165E	2А	4А	4Ах3
4. Довжина шлангів, м		15	15
5. Повна маса, кг не більше	30	70	18х3
6. Кількість рятувальників для використання	1	1	3

Головним недоліком установки є її «близкодія».

Зважаючи на ряд переваг імпульсної установки Тайфун-10, було прийнято рішення використати її як прототип і переробити в УДПВР у КВР.

Балон із водою та шланги до ствола від балона були демонтовані для зменшення ваги й компактності установки. Був збільшений об'єм балона зі стисненим повітрям для збільшення кількості імпульсних пострілів (викидів) контейнера з вогнегасною речовиною. Балон приєднується через перехідне з'єднання, яке виготовляється безпосередньо під тип балонів. У роботі використовувався балон DRAGER (рис. 2.2).

Зазначимо, що балони зі стисненим повітрям стоять на озброєнні аварійно-рятувальних підрозділів.



Рис.2.2. Балон Drager для УДПВР у КВР

Технічні характеристики балона [123] для стисненого повітря на 300 бар:

- об'єм 6 літрів;
- вага балона не більше 4,4 кілограм;
- вентиль різьблення внутрішнє 5/8;
- виробник Drager США;
- матеріал – алюміній.

Для зниження, регулювання та автоматичного підтримання постійного заданого робочого тиску встановлений редуктор рис. 2.3. Редуктор

дозволяє зменшувати початкову швидкість контейнера з вогнегасною речовиною, що збільшує кількість імпульсних пострілів.



Рис. 2.3. Редуктор ДОНМЕТ БАЗО-150 ДМ

Основні характеристики редуктора БАЗО-150 ДМ [124]:

- виробник ДОНМЕТ;
- тип редуктора азотний (підходить для повітря);
- використовується для балона з азотом або повітрям;
- макс. пропускна здатність 100,0 м³ / год;
- макс. тиск на вході 20 МПа;
- макс. робочий тиск 3,0 МПа;
- прохід РТ рукава 6 мм 9 мм;
- вага 1,6 кг;
- країна торгової марки Україна.

Редуктор розрахований на велику пропускну спроможність – до 100 м³/год. Різьба на вході – G3/4, на виході – M16x1,5. Надійний латунний корпус і кришка, точне підтримання тиску, зносостійкий редуційний клапан зі вставкою з поліуретану, зручний маховик з ударостійкого

пластику. Для зручної роботи – запірний вентиль на виході з редуктора, що дозволяє перекривати подавання повітря до «ствола», не закриваючи вентиль на балоні; вхідна та вихідна різьба стандартна для країн СНД. Манометри з гумовим захистом для запобігання пошкодженням від легких ударів.

Був виготовлений насадок зі сталі внутрішнім діаметром 70 мм, із різьбою в нижній частині для з'єднання із верхньою частиною ствола. На рис. 2.4 загальне фото дослідного зразка ствола для дискретної доставки вогнегасних речовин, схематичне зображення дослідного зразка конструкції ствола (рис. 2.5), основні конструктивні елементи дослідного зразка ствола (рис. 2.6) Насадок виготовлявся довжиною 150 мм для проведення експериментальних досліджень із контейнерами різної форми (рис. 2.7).



Рис. 2.4. Фото дослідного зразка ствола дискретної подачі вогнегасних речовин: 1. Ремінь для перенесення ствола. 2. Камера для стиснутого повітря. 3. Камера для рідини. 4. Насадок для контейнера з вогнегасною речовиною. 5. Повітряний шланг. 6. Штуцер із «системою швидкого з'єднання». 7. Рукоятка для тримання. 8. Спусковий курок. 9. Запобіжник від помилкового натискання на гачок. 10. Штуцер для підводу рідини. 11. Рукоять обертаюча відкриття клапану для заповнення рідиною

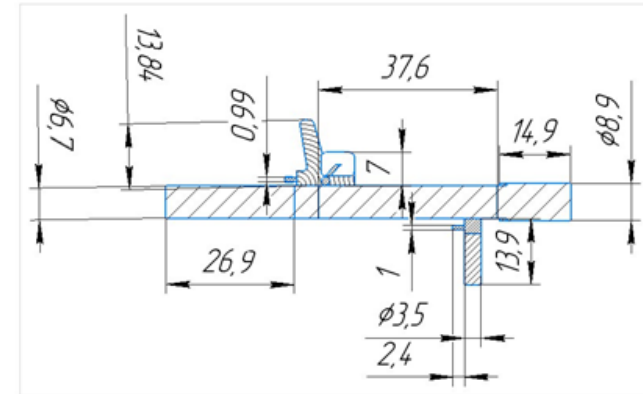


Рис. 2.5. Схематичне зображення дослідного зразка конструкції ствола

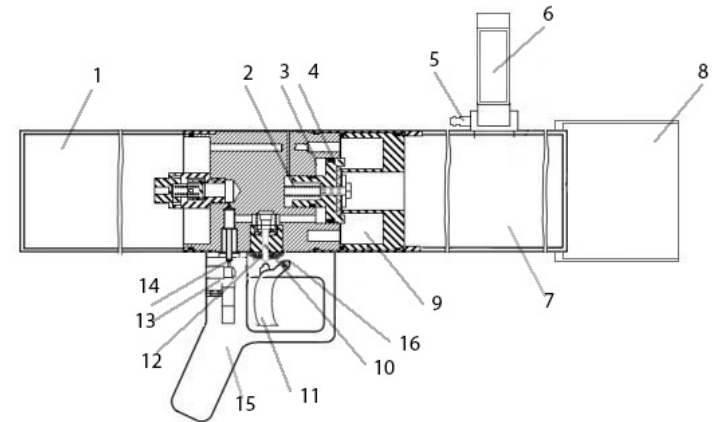


Рис. 2.6. Основні конструктивні елементи дослідного зразка ствола для дискретної доставки вогнегасних речовин. 1. Камера для стиснутого повітря. 2. Пружина. 3. Розвантажувальна порожнина. 4. Швидкодіючий клапан. 5. Штуцер для підводу рідини. 6. Рукоять обертаюча відкриття клапану для заповнення рідиною. 7. Камера для рідини. 8. Насадок для контейнера з вогнегасною речовиною. 9. Порожнина. 10. Зворотній клапан. 11. Спусковий гачок. 12. Розвантажуючі канали. 13. Повітряний штуцер. 14. Дросель. 15. Рукоять. 16. Запобіжник від помилкового натискання на гачок.



Рис. 2.7. Насадок на ствол для дискретної подачі вогнегасних речовин

Загальний вигляд дослідної установки для дискретної доставки вогнегасних речовин у контейнері наведено на рис 2.8.

Дана установка при проведенні натурних випробувань продемонструвала високу ефективність при дискретній подачі вогнегасної речовини, спорядженої в контейнери.

Основні переваги застосування УДПВР у контейнері:

1. Компактність установки (не займає багато місця при транспортуванні) й оперативність її доставки призводять до незалежності умов її розгортання від стану під'їзних шляхів до будівлі й існування різноманітних перепон безпосередньо на подвір'ї перед будинком.

2. Для подачі вогнегасних речовин у віконний отвір багатоповерхової будівлі з моменту прибуття пожежно-рятувальних підрозділів потрібно не більше 2–3 хвилин, що призводить до зменшення часу

вільного розвитку й локалізації пожежі, у той час коли ланка газодимозахисників збирає необхідне пожежно-рятувальне обладнання, робить оперативну перевірку апаратів на стиснутому повітрі та підіймається по маршовим сходам, прокладаючи рукавну лінію всередині будівлі.



Рис. 2.8. Дослідна установка для дискретної подачі вогнегасних речовин у контейнері. Елементи: 1. Балон із стисненим повітрям. 2. Лафет для фіксування та зміни кута нахилу пневматичної гармати. 3. Ствол пневматичної гармати (імпульсної дії). 4. Насадок для контейнерів із вогнегасною речовиною. 5. Скоба фіксації ствола. 6. Регулююча планка по вертикалі кут нахилу ствола. 7. Вертикальна опора, по якій переміщається регулююча планка. 8. Упорна регулююча основа зміни кута нахилу ствола по горизонталі. 9. Повітряний шланг. 10. Редуктор регулювання тиску в повітряній камері ствола.

3. Точність доставки контейнерів і відсутність втрат вогнегасної речовини при подачі в осередок пожежі.

4. Безпечність матеріалу, з якого виготовлені контейнери.

5. Варіація вогнегасної речовини, яка знаходиться в контейнері для дискретної подачі.

6. Необхідним є лише один пожежний-рятувальник в якості оператора УДПВР на початковій стадії локалізації пожежі.

2.2. Дослідження критичних швидкостей та навантажень на контейнер для дискретної доставки вогнегасної речовини

Іншим елементом УДПВР для дискретної подачі є контейнер, що представляє собою капсулу – сфери, порожнина якої заповнюється вогнегасною речовиною.

Оскільки спосіб дискретної доставки передбачає руйнацію контейнера при ударі о тверду поверхню й розпорошення вогнегасної речовини, то важливим є розрахунок фізико-механічних характеристик контейнера.

Методами комп'ютерного моделювання було проведене [2] визначення критичних швидкостей та навантажень для руйнування контейнера з різним типом вогнегасного наповнення при ударному навантаженні.

2.2.1. Геометрична модель і скінчено-елементна модель контейнера

Для дослідження впливу ударного навантаження на контейнер (капсулу) була створена геометрична модель сфери, що має наступні параметри. В якості площини для удару було створено прямокутну пластину. На рис. 2.9 зображена повна геометрична модель сфери та площі удару, а на рис. 2.10 геометрична модель сфери та площі удару в перерізі.

2.2. Дослідження критичних швидкостей та навантажень на контейнер...

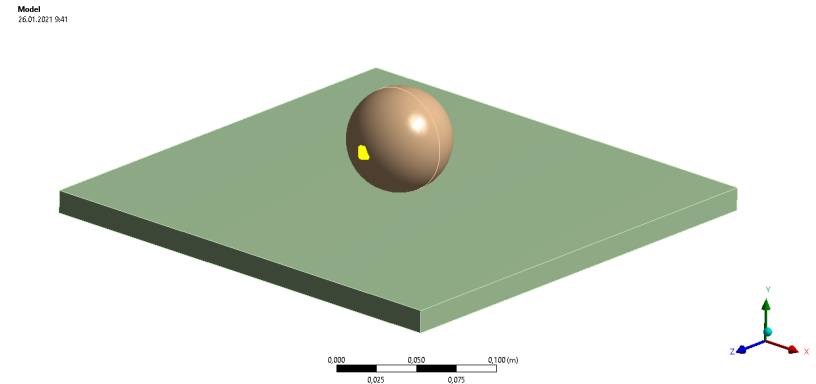


Рис. 2.9. Повна геометрична модель сфери та площі удару

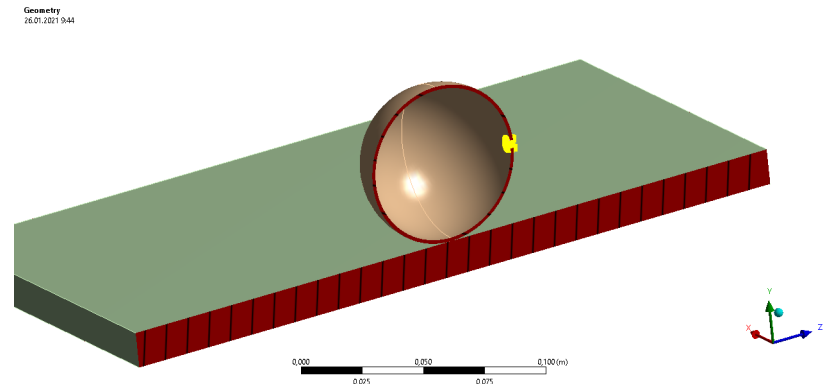


Рис. 2.10. Геометрична модель сфери та площі удару в перерізі

Геометрично модель сфери має такі параметри: радіус, що дорівнює 35 мм, та товщину, що дорівнює 3 мм. Площина для удару моделювалась у формі паралелепіпеду з наступними розмірами: довжина 300 мм, ширина 200 мм, товщина 15 мм.

У роботі для створення СЕ-сітки використовувався твердотільний елемент, який зображений на рис. 2.11.

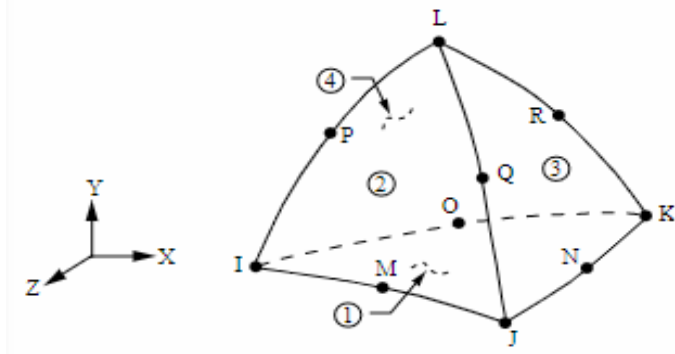


Рис. 2.11 Скінчений елемент SOLID187

Елемент SOLID187 – це 3D, 10-вузловий елемент високого порядку. Елемент має поведінку квадратичного переміщення й добре підходить для моделювання нерегулярних сіток.

Елемент визначається 10 вузлами, що мають три ступені свободи на кожному вузлі: переклади у вузлових напрямках x , y та z . Функції форм, що описують поведінку елемента мають наступний вигляд.

$$u = u_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + u_j \cdot (2 \cdot L_2 - 1) \cdot L_2 + u_k \cdot (2 \cdot L_3 - 1) \cdot L_3 + u_l \cdot (2 \cdot L_4 - 1) \cdot L_4 + \\ + 4 \cdot u_m \cdot L_1 \cdot L_2 + 4 \cdot u_n \cdot L_2 \cdot L_3 + 4 \cdot u_o \cdot L_1 \cdot L_3 + 4 \cdot u_p \cdot L_1 \cdot L_4 + 4 \cdot u_q \cdot L_2 \cdot L_4 + \\ + 4 \cdot u_r \cdot L_3 \cdot L_4$$

$$v = v_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + \dots + 4 \cdot v_r \cdot L_3 \cdot L_4$$

$$v = v_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + \dots + 4 \cdot v_r \cdot L_3 \cdot L_4$$

$$w = w_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + \dots + 4 \cdot T_r \cdot L_3 \cdot L_4 \quad (2.1)$$

$$T = T_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + \dots + 4 \cdot T_r \cdot L_3 \cdot L_4$$

$$V = V_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + \dots + 4 \cdot V_r \cdot L_3 \cdot L_4$$

$$V = V_1 \cdot (2 \cdot L_1 - 1) \cdot L_1 + \dots + 4 \cdot V_r \cdot L_3 \cdot L_4$$

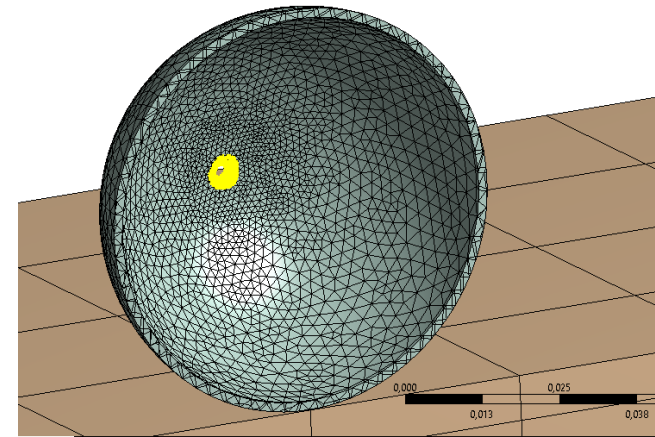


Рис. 2.12. Скінчена елементна модель сфери та площі удару

Була побудована скінчена елементна модель сфери та площі удару рис. 2.12. У зоні біля отвору густина сітки була збільшена, щоб уникнути штучних концентрацій напружень.

2.2.2. Граничні умови, властивості матеріалу

Матеріалом сфери, прототип якої був створений шляхом 3D друку, є пластик типу PLA. PLA-пластик (поліактід) – біорозкладаний пластик для 3D-друку методом пошарового наплавлення. Основу матеріалу складають натуральні інгредієнти: кукурудза, цукровий очерет, крохмаль, целюлоза. У натуральному вигляді PLA-пластик є прозорим. Його можна фарбувати в будь-який колір, при бажанні – зі збереженням прозорості.

По міцності PLA не поступається іншим пластикам такого типу, але він більш жорсткий, що призводить до крихкості. Механічні характеристики PLA-пластику наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Механічні характеристики PLA-пластику

Щільність матеріалу	1,25 г/см ³
Границя текучості при розтягуванні	53–70 МПа
Границя міцності при розтягуванні	10–60 МПа
Границя міцності на розрив	40 МПа
Модуль пружності при розтягуванні	350–2800 МПа
Відносне подовження при розтягуванні	1,5–380%
Руйнівне напруження при згині	88–119 МПа
Модуль пружності при згині	0,89–1,03 МПа
Температура розм'якшення	52–165 °C
Температура плавлення	165–195 °C
Усадка	-

Закріплення площини удару було виконано методом закріплення жорсткого тіла. Закріплення жорсткого тіла спрощує представлення моделі, зменшуючи її до контактних областей та центроїда моделі. Іншими словами, коли деталь визначається як тверде тіло, сітка знає, як зчепити лише ділянки контакту та створити єдиний елемент маси в центроїді моделі. (Центроїд представлений інерційною системою координат.)

Міцне закріплення корпусу може використовуватися як для 2D, так і для 3D контакту. Для 2D-моделей лише краї твердої поверхні, що контактує, є сітчастими, оскільки сітка поверхні не потрібна для аналізу. Подібним чином, для тривимірних моделей лише грані твердого тіла, що контактують, є сітчастими, оскільки об'ємна сітка не потрібна.

При вирішенні задачі впливу ударного навантаження на сферу, параметр, що впливає на значення виникаючих напружень, є швидкість.

Задача динаміки вирішувалась явно з використанням схеми інтеграції центральної різниці часу. Алгоритм вирішення наступний: розраховуються сили у вузлах сітки (що виникають внаслідок внутрішнього напруження, контакту або граничних умов), вузлові прискорення отримуються при прирівнянні прискорення до сили, поділеної на масу.

Тому прискорення визначається як

$$\ddot{u} = \frac{F_i}{m} + b_i, \quad (2.2)$$

де $\ddot{u}$ – компоненти вузлових прискорення ($i = 1, 2, 3$),
 F_i – це сили, що діють на вузлові точки,
 b_i – компоненти прискорення тіла,
 m – маса, що приписується вузлу.

При визначенні прискорень у момент часу n , швидкості в момент часу $n + 1/2$ знаходять з

$$\dot{u}^{n-1/2} = \dot{u}^{n-1/2} + \ddot{u}_i^n \cdot \Delta t^n, \quad (2.3)$$

і, нарешті, положення оновлюються до часу $n+1$ шляхом інтегрування швидкостей

$$u_i^n = u_i^n + \dot{u}_i^{n+1/2} \cdot \Delta t^{n+1/2}, \quad (2.4)$$

Щоб забезпечити стабільність і точність рішення, розмір кроку часу, що використовується в явному інтегруванні часу, обмежується умовою Куранта-Фрідрікса-Леві. Ця умова означає, що крок часу повинен бути обмежений таким чином, що збурення (хвиля напруження) не може рухатися далі, ніж найменший характерний розмір елемента в сітці за один крок часу. Таким чином, критерієм часу для стабільності рішення є

$$\Delta t \leq f \left[\frac{h}{c} \right]_{\min}, \quad (2.5)$$

де Δt – приріст часу;

f – коефіцієнт часу стабільності (приймається 0,9);

h – характерний розмір елемента;

c – місцевий матеріал, що використовується у елементі.

Характерний розмір тетраедричного елемента (h), обчислюється як мінімальна відстань будь-якого вузла елемента до його протилежної грані елемента.

2.2.3. Результати дослідження на ударне навантаження

При вирішенні задачі впливу ударного навантаження на сферу, параметр, що впливає на значення виникаючих напружень, є швидкість. У даному випадку швидкість змінювалась у межах від 10 м/с до 30 м/с, що обумовлено тактико-технічними характеристиками устаткування.

Розрахунки проводились для трьох випадків ненаповненої, наповненої водою та наповненою порошком конструкцій. При проведенні серії розрахунків були отримані переміщення, що виникають при ударному навантаженні при різних швидкостях. Розподілення переміщень у елементах конструкції зображено на рис. 2.13. – 2.15.

Розподілення переміщень в обох випадках має хвильовий характер. Зона максимальних переміщень виділена червоним кольором та розповсюджується по огинаючій по конструкції.

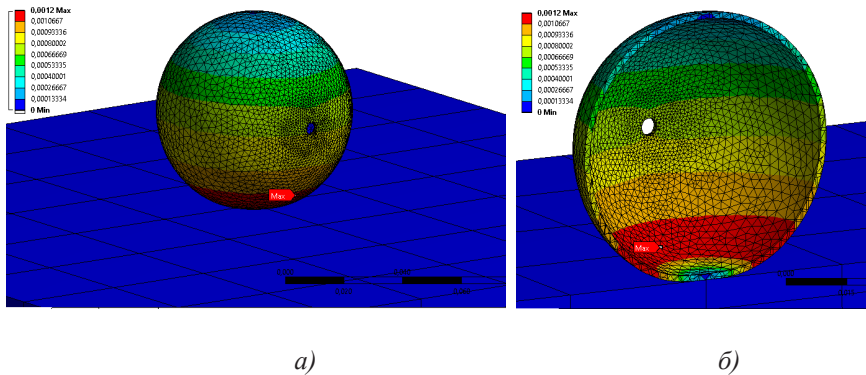


Рис. 2.13. Переміщення у сфері при ударі наповненого водою:
а) повна модель; б) у перерізі.

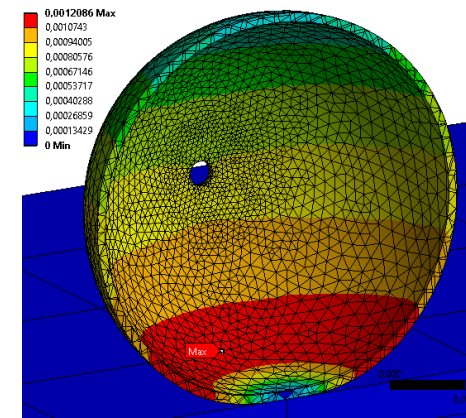


Рис. 2.14. Переміщення у сфері заповненому порошком при ударі в перерізі

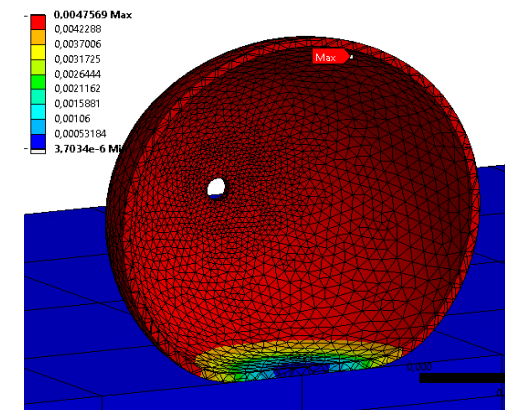


Рис. 2.15. Переміщення в незаповненому сфері при ударі в перерізі

При порівнянні переміщень результатів розрахунків видно, що значення максимальних виникаючих переміщень у конструкції при заповненні водою зменшується майже в 4 рази. Це свідчить про те, що наповненість кулі зменшує інтенсивність руйнування конструкції, а в нашому випадку збільшує значення критичної швидкості падіння.

При дослідженні впливу ударного навантаження визначено параметри деформованого стану після зіткнення з твердою поверхнею сфери. При аналізі руйнування у випадку дослідження крихкого матеріалу в першу чергу треба визначити максимальні розтягуючі напруження, що виникають у конструкції, та порівняти їх із границею міцності. Якщо значення виникаючих напружень перевищують границю міцності це вважається руйнуванням.

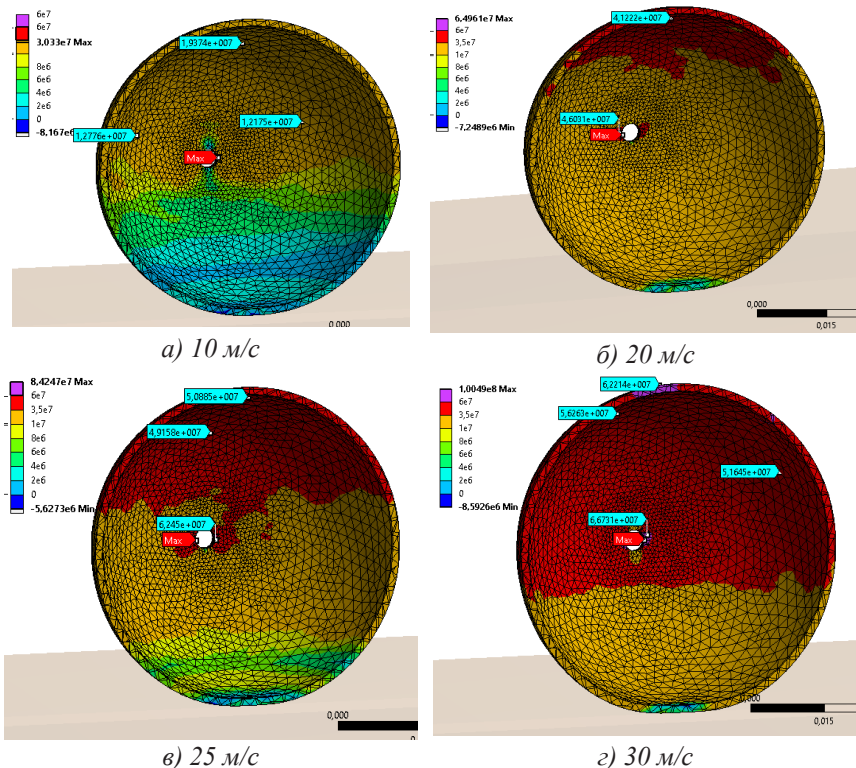


Рис. 2.16. Максимальні нормальні розтягуючі напруження з наповненням водою

Для PLA-пластику, що є матеріалом сфери границя міцності змінюється від 10 МПа до 60 МПа в залежності від способу виготовлення

конструкції. У роботі реальна модель створювалась за допомогою 3D принтера, тому значення границі міцності достеменно не відомо. Отже, при аналізі розглядався весь проміжок.

На рис. 2.16–2.18 зображено характер розподілення максимальних розтягуючих напружень у сфері при різних швидкостях та з урахуванням заповнення водою (рис. 2.16), вогнегасним порошком (рис. 2.17) та без заповнення (рис. 2.18).

Помаранчева та червона зона – це зони напружень, що перевищують мінімально допустимі значення величиною 10 МПа та досягають максимально допустимі значення – 60 МПа. Фіолетова зона – це зона напружень, що перевищують максимально допустимі значення – 60 МПа.

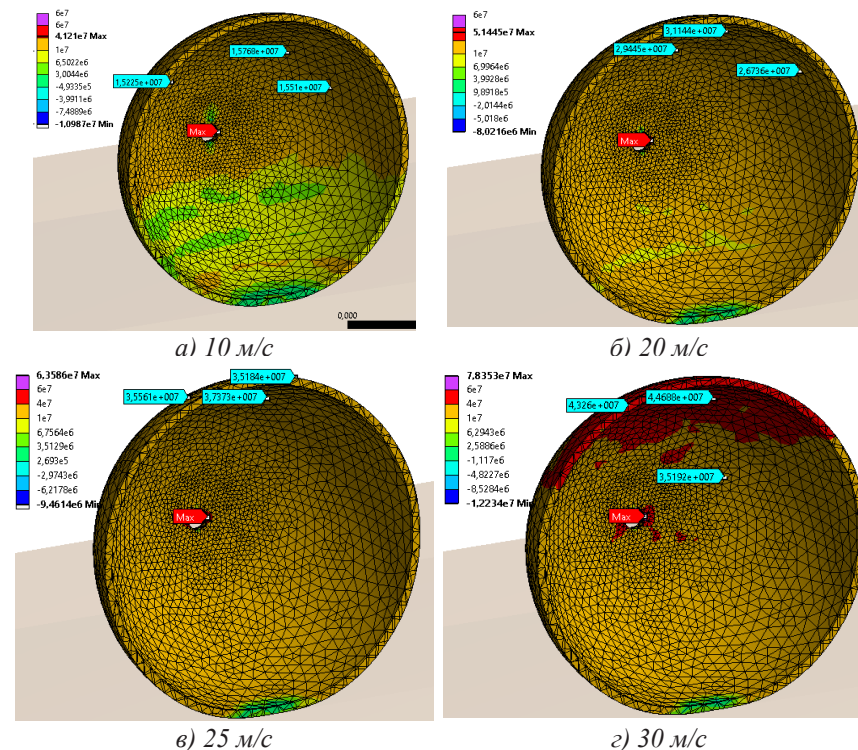


Рис. 2.17. Максимальні нормальні розтягуючі напруження з наповненням порошком

Характер розподілення напружень при наповненості сфери та у випадку, коли вона порожня, різні. У випадку, коли сфера наповнена рис. 2.16–2.17) зона максимальних напружень знаходиться у верхній частині сфери. А коли сфера без наповнення (рис. 2.18), зона максимальних напружень з'являється в нижній частині конструкції.

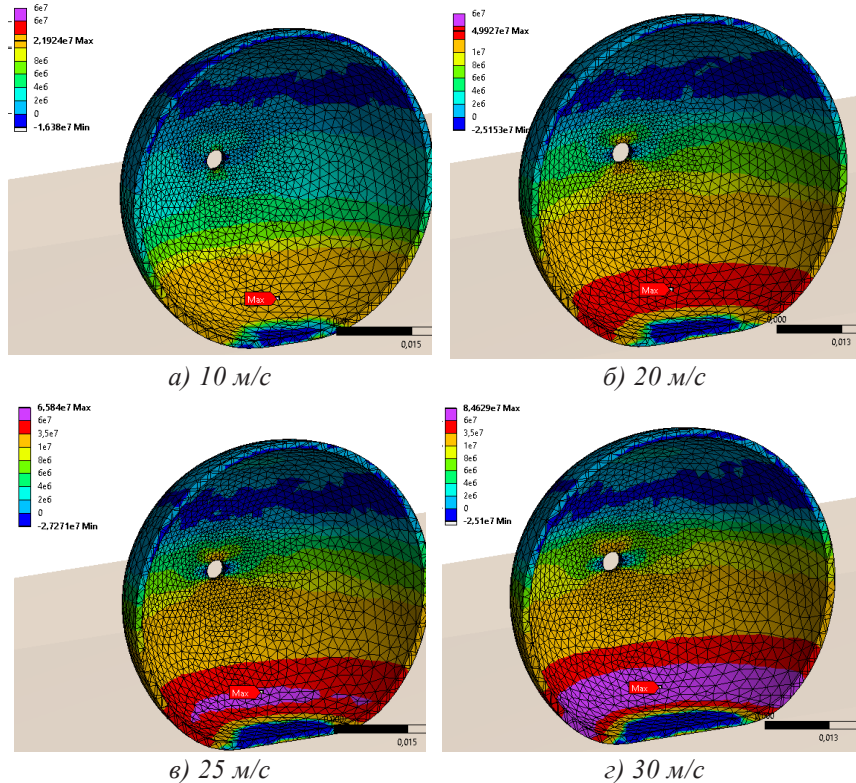


Рис. 2.18. Максимальні нормальні розтягуючі напруження без заповнення

Критична швидкість, при якій руйнування кулі можна вважати повним, для випадку, коли куля заповнена водою, дорівнює 30 м/с

(рис. 2.17, г), як і у випадку, коли куля заповнена вогнегасним порошком. У цих випадках майже в усій конструкції виникають максимальні розтягуючі навантаження перевищують границю міцності в межах від 10 МПа до 60 МПа (рис. 2.17). З розподілення напружень видно, що зона концентрації напружень є біля отвору (рис. 2.17). Але після збільшення швидкості падіння зона біля отвору не розширюється та з'являється додаткова зона червоного кольору відповідно до характеру розподілення напружень в обох випадках.

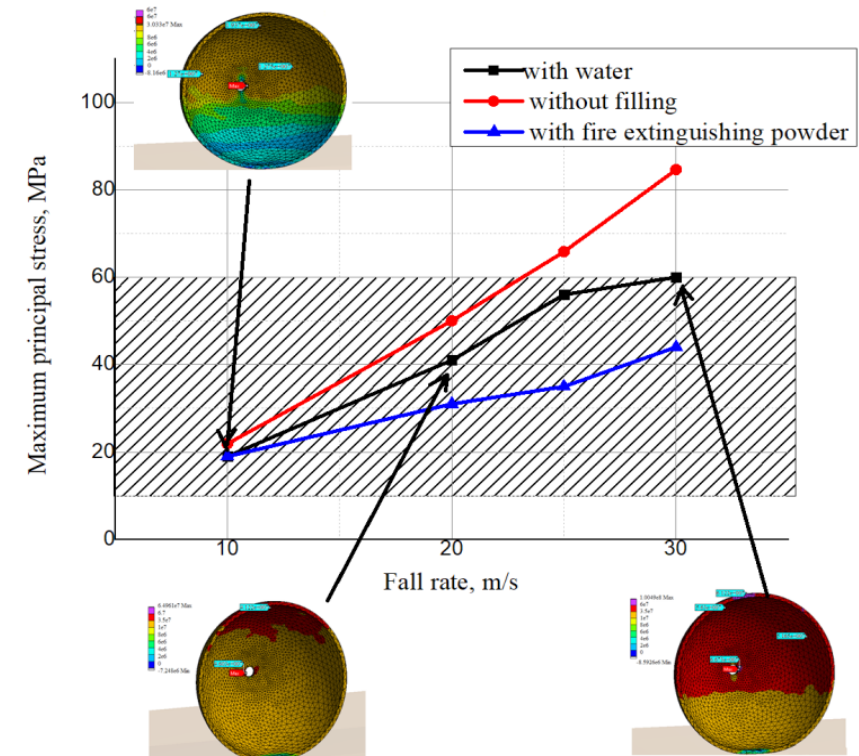


Рис. 2.19. Графік зміни максимальних нормальних розтягуючих напружень у залежності від швидкості зіткнення

У випадку, коли сфера не наповнена та швидкість зіткнення більше за 20 м/с по усій огибаючій на сфері виникають напруження, що перевищують границю міцності на 5% (рис. 2.18, в) та 30% (рис. 2.18, г), що теж є ознакою повного руйнування. Після збільшення швидкості зіткнення зона максимальних напружень біля отвору не розширюється, а з'являється додаткова зона червоного кольору в місці контакту сфери з площиною удару. За розподіленням максимальних розтягуючих напружень можна зробити висновок, що при наповненні сфери, водою або вогнегасним порошком, повне руйнування буде відбуватися при більшій швидкості падіння, а саме 30 м/с.

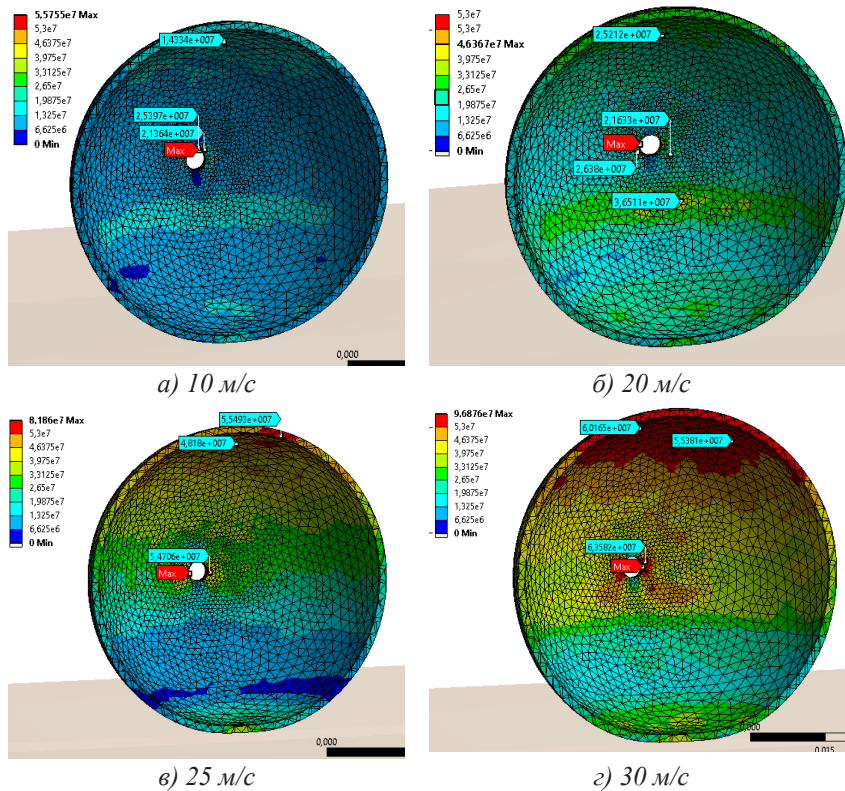


Рис. 2.20. Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу з наповненням водою

Графік зміни значень максимальних розтягуючих навантажень у залежності від швидкості зіткнення зображено на рис. 2.19.

На рис. 2.19 рідким штрихуванням виділено проміжок значень границі міцності від 10 МПа до 60 МПа, значення, що знаходяться вище цього проміжку, перевищують максимально допустимі значення границі міцності.

На рис. 2.20–2.22 зображено розподіл еквівалентних напружень по Мізесу в залежності від швидкості падіння та заповнення сфери.

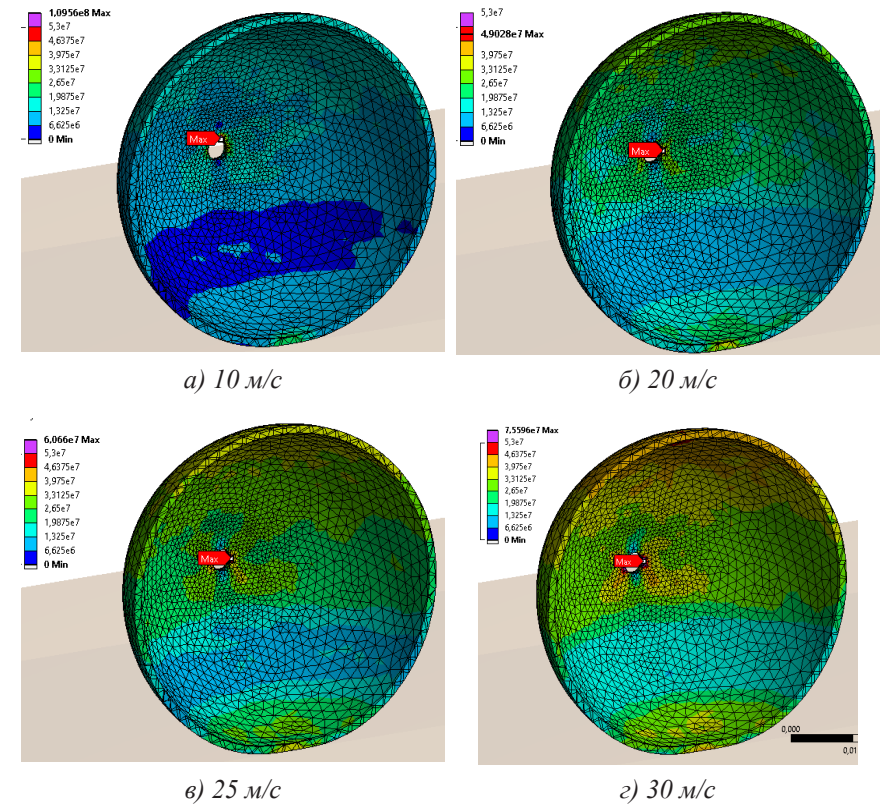


Рис. 2.21. Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу з наповненням порошком

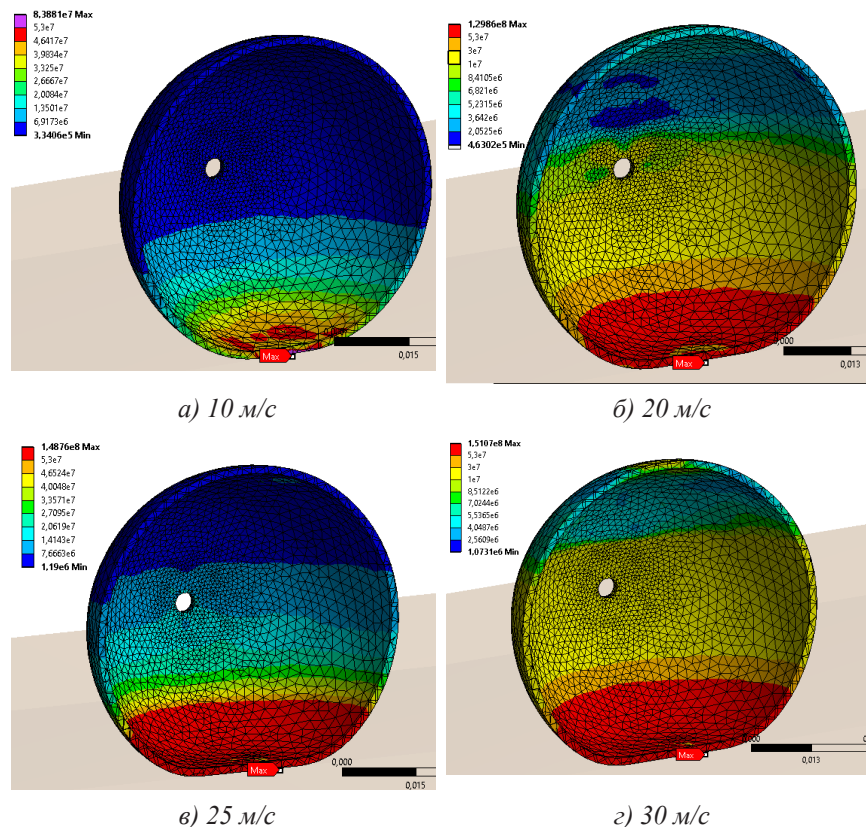


Рис. 2.22. Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу без наповнення

На рис. 2.23 показані максимальні значення виникаючих еквівалентних напружень у конструкції в залежності від швидкості зіткнення. Чорна горизонтальна лінія відокремлює випадки, коли максимальні еквівалентні напруження перевищують межу плинності, що свідчить про виникнення пластичних деформацій, які теж можуть призвести до руйнування.

При аналізі виникаючих еквівалентних напружень можна зробити висновок, що при зіткненні ненаповненої водою сфери в ній будуть ви-

никати пластичні деформації навіть при швидкості 10 м/с. Зона, в якій виникають такі напруження при швидкості 10 м/с (рис. 2.20) не велика, тому це скоріш свідчить про появу тріщини в конструкції. У випадку, коли сфера наповнена водою, пластичні деформації в конструкції виникають при зіткненні зі швидкістю більше 25 м/с. Але, як і у випадку при зіткненні пустої сфери зі швидкістю 10 м/с, зона розповсюдження достатньо мала, тому це свідчить про появу тріщини, але не про повне руйнування.

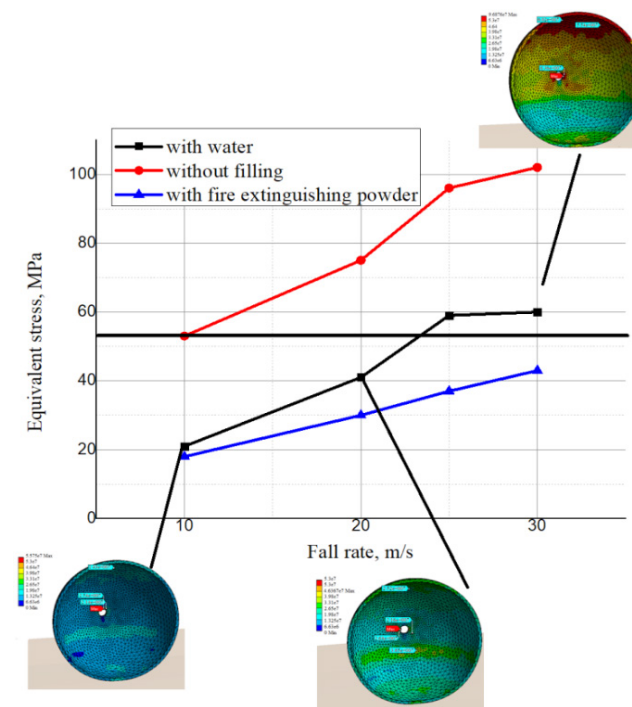


Рис. 2.23. Графік зміни максимальних еквівалентних напружень у залежності від швидкості зіткнення

Таким чином проведені дослідження з визначення критичних швидкостей та навантажень руйнування контейнера (капсули) без на-

повнення вогнегасною речовиною при ударному навантаженні. Встановлено, що при ударному навантаженні в незаповненому контейнері переміщення склали 0,00476 м. Максимальні нормальні розтягуючі напруження, при швидкості падіння від 10 до 30 м/с, склали від 21,92 МПа до 84,46 МПа відповідно. Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу, при швидкості падіння від 10 до 30 м/с, склали від 83,88 МПа до 151,07 МПа відповідно.

Проведені дослідження з визначення критичних швидкостей та навантажень для руйнування контейнера (капсули), наповненого водою, при ударному навантаженні. Встановлено, що при ударному навантаженні в контейнері, наповненого водою, переміщення склали 0,0012 м. Максимальні нормальні розтягуючі напруження при швидкості падіння від 10 до 30 м/с, склали від 30,33 МПа до 100,49 МПа відповідно. Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу, при швидкості падіння від 10 до 30 м/с, склали від 55,75 МПа до 96,88 МПа відповідно.

Проведено дослідження з визначення критичних швидкостей та навантажень для руйнування контейнера (капсули), наповненого вогнегасним порошком, при ударному навантаженні. Встановлено, що при ударному навантаженні в контейнера, наповненого водою, переміщення склали 0,00121 м. Максимальні нормальні розтягуючі напруження при швидкості падіння від 10 до 30 м/с, склали від 41,21 МПа до 78,35 МПа відповідно. Максимальні еквівалентні напруження швидкості зіткнення від 10 до 30 м/с склали від 22,5 МПа до 75,59 МПа відповідно.

2.2.4. Імовірнісне моделювання руйнування контейнера у формі сфери

Властивості нового матеріалу іноді важко точно визначити. У літературі відомо, що розкид межі розтягування для PLA-пластику знаходиться в межах від 10 МПа до 60 МПа. Тому цей параметр ми можемо розглядати як випадкову величину. З інших дослідників відомо, що властивості матеріалу підкоряються логарифмічно нормальному мінімуму розподілу:

$$f_{\sigma_T}(\sigma_T) = \frac{1}{\sigma_T \cdot \gamma \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\left[\frac{(\ln(\sigma_T) - \mu)^2}{2 \cdot \gamma^2} \right]}, \quad (2.6)$$

де μ та γ є параметрами логарифмічного нормального низького рівня.

Для оцінки ймовірності відмови розглядають її з точки зору проблеми надійності. Імовірність руйнування F у цьому випадку становить

$$P_r[F] = P_r[\sigma_T \leq \sigma] \quad (2.7)$$

Таким чином, ймовірність руйнування буде розраховуватися наступним інтегралом:

$$Q = P_r[F] = \int_0^{\sigma(v)} f_{\sigma_T}(\sigma_T) d\sigma_T, \quad (2.8)$$

де $\sigma(v)$ – залежність виникаючих напружень від швидкості падіння.

$$\sigma(v) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3, \quad (2.9)$$

Дані напружень для трьох випадків були апроксимовані поліномом другого ступеня. Значення коефіцієнтів наведено в таблиці 2.3

Таблиця 2.3.

Параметри апроксимації

	P_1	P_2	P_3
Ненаповнений	0.035	1.725	1.2
З водою	0.013	1.835	0.2
З вогнегасним порошком	0.0236	0.769	5.1

Імовірність руйнування показана на рис. 2.24.

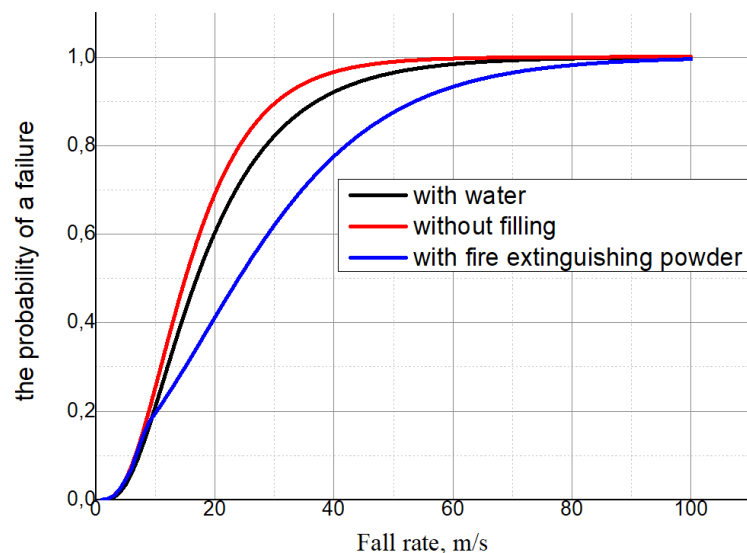


Рис. 2.24. Ймовірність руйнування сфери в різних випадках

Після аналізу результату можна зробити висновок, що при наповненні контейнера рідиною ймовірність руйнування в цьому випадку вище, ніж при наповненні вогнегасним порошком (синя лінія) (рис. 2.24).

2.3. Дослідження процесу руйнації шибки

Оскільки дискретна доставка вогнегасної речовини відбувається скрізь віконний отвір, то необхідно здійснити оцінку параметрів руйнування шибки вікна при влучанні в нього контейнера, що було зроблено в роботах [12, 16, 17].

Для визначення впливу дії імпульсного навантаження на скло, що викликано ударом від контейнера з PLA-пластику, наповненого вогнегасною речовиною, здійснено серію варіативних розрахунків при зміні таких параметрів:

- товщина скла;

- відстань між двома елементами скла;
- початкова швидкість.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні етапи:

- побудова параметричної геометричної моделі;
- створення скінчено-елементної сітки;
- визначення швидкості, при якій відбувається удар контейнера зі склом;
- проведення розрахунків при різних геометричних та фізичних параметрах.

2.3.1. Побудова геометричної моделі шибки і її скінчено-елементна модель

Геометрична модель складається з пакету скла, контейнера у формі шару та рідни всередині нього. Розмір скла задавався 300x300 мм. Товщина скла задавалася 3 мм, 5 мм та 6 мм. Відстань між двома пластинами змінювалась відповідно 0,6 мм, 1 мм, 2 мм, 2,5 мм.

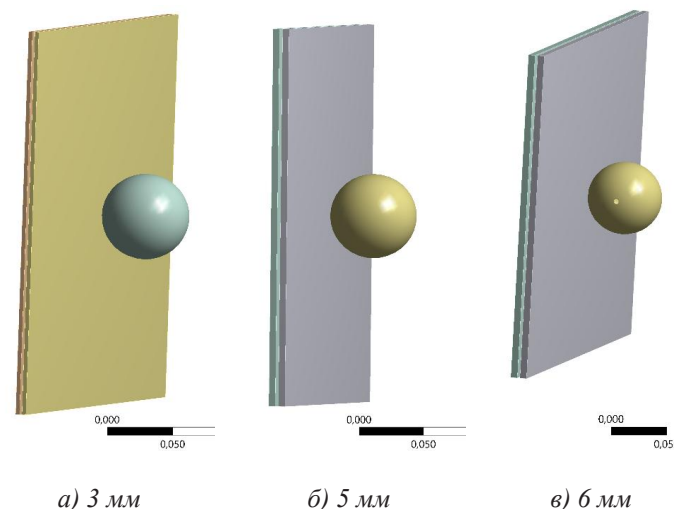


Рис. 2.25. Геометрична модель конструкції при різних товщинах скла

Контейнер знаходиться на відстані 0,1 мм від скла. Геометричні параметри контейнера: радіус $R=35$ мм; товщина $\delta=3$ мм.

Для проведення розрахунків необхідно створити скінчено-елементну модель. При вирішенні задачі було використано тривимірний елемент із трьома степенями свободи у вузлі. Для скла було створено регулярну сітку, розмір елемента дорівнює 1 мм, та по товщині було задано 2 елемента.

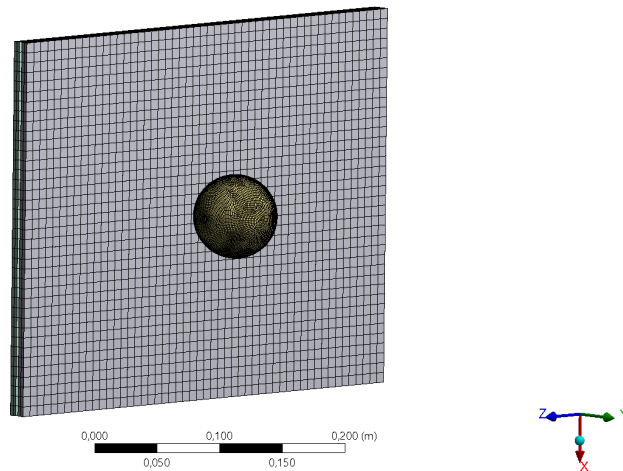


Рис. 2.26. Геометрична модель конструкції при товщині скла 6 мм

2.3.2. Визначення початкових умов

З експерименту відомо, що початкова швидкість контейнера становить до 50 м/с. У даному випадку передбачається, що початковий кут дорівнює 54 градуси, а відстань до удару 15 м. Для визначення кінцевої швидкості розглянемо рух тіла в полі тяжкості Землі, опір повітря враховувати не будемо. Нехай початкова швидкість кинутого тіла спрямована під кутом горизонту α (у нашому випадку 54 градуса) (рис. 2.27). Тіло кинуте з висоти $y=h_0$; $x_0 = 0$:

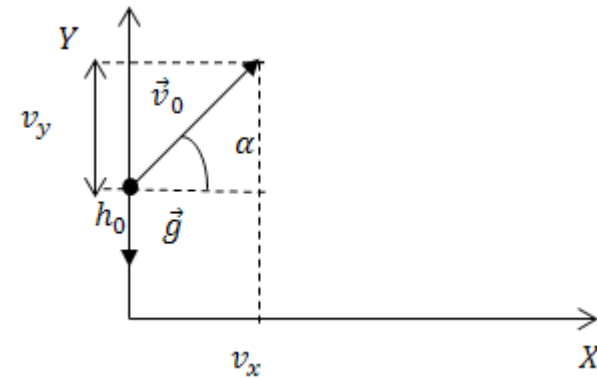


Рис. 2.27. Схема руху тіла під кутом

Тоді в початковий момент часу тіло має горизонтальну (v_x) та вертикальну (v_y) складові швидкості. Проекції швидкості на осі координат при $t=0$ дорівнюють:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (2.10)$$

Прискорення тіла дорівнює прискоренню вільного падіння й постійно спрямоване вниз:

$$\bar{a} = \bar{g} \quad (2.11)$$

Отже, проекція прискорення на вісь X дорівнює нулю, але у вісь Y дорівнює $a_y = g$. Оскільки по осі X складова прискорення дорівнює нулю, швидкість руху тіла в цьому напрямку є постійною величиною і дорівнює проекції початкової швидкості на вісь X (рис. 2.27). Рух тіла по осі X рівномірний. При ситуації, зображеній на рис.2.27, тіло по осі Y буде рухатися спочатку вгору, а потім вниз. При цьому прискорення руху тіла в обох випадках дорівнює прискоренню. На проходження шляху вгору від довільної висоти $y=h_0$ до максимальної висоти підйому (h) тіло витрачає стільки ж часу, скільки падіння вниз від

h до $y=h_0$. Отже, симетричні точки щодо вершини підйому тіла лежать на однаковій висоті. Виходить, що траєкторія руху тіла симетрична щодо точки-вершини підйому – це парабола. Задані початкові умови на контейнер (рис.2.28).

Швидкість руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, можна виразити формулою:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \vec{g} \cdot t, \quad (2.12)$$

де $\vec{v}_0$ – швидкість тіла в момент кидка.

Формулу (2.12) можна вважати як результат складання швидкостей двох незалежних рухів за прямими лініями, в яких бере участь тіло. Вирази для проекції швидкості на осі набувають вигляду:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha - g \cdot t' \end{cases} \quad (2.13)$$

Відповідно до розрахунків (2.13) було досліджено удар при трьох початкових швидкостях (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4.

Швидкість контейнера

	40 м/с	45 м/с	50 м/с
x	5,94 (м/с)	6,75 (м/с)	7,45 (м/с)
y	5,614 (м/с)	6,84 (м/с)	7,96 (м/с)

При розрахунках враховувались властивості матеріалів. Відповідні властивості показані в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5.

Властивості матеріалу скла та контейнера

	Модуль пружності, Па	Коефіцієнт Пуассона	Щільність, кг/м ³	Границя міцності, МПа
Скло	$7 \cdot 10^{10}$	0,2	2560	60
Пластик PLA	$3,3 \cdot 10^{10}$	0,35	1230	20

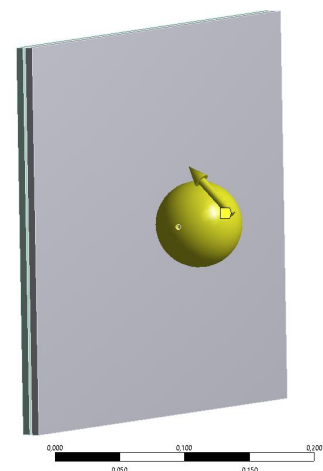


Рис. 2.28 Задані початкові умови на контейнер

2.3.3. Аналіз результатів розрахунків

Розглянемо найбільш несприятливий випадок: швидкість 40 м/с, товщина скла 6 мм, відстань між склом 2,5 мм. На рисунках показано переміщення, інтенсивність напружень та максимальні головні напруження.

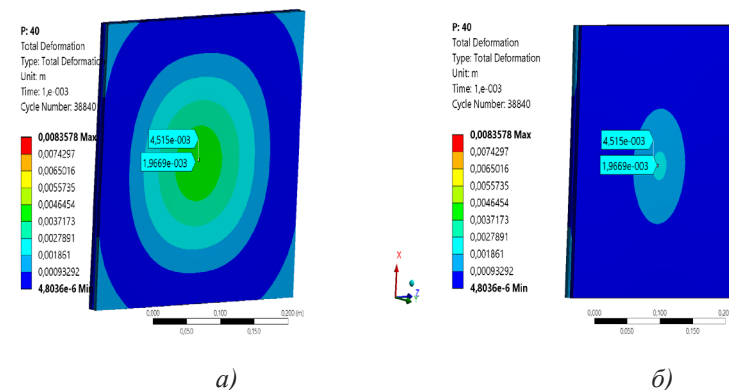


Рис. 2.29. Переміщення у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

Переміщення в місці контакту дорівнюють у склі 1–4,5 мм (75% від товщини скла), склі 2–2 мм (33% від товщини скла) (рис.2.29).

Також визначено інтенсивність напружень та максимальні головні напруження у склі (рис.2.30).

Фіолетовим кольором зображено місця, в яких напруження перевищують границю міцності для скла. З результатів видно, що при заданих параметрах скло буде зруйноване.

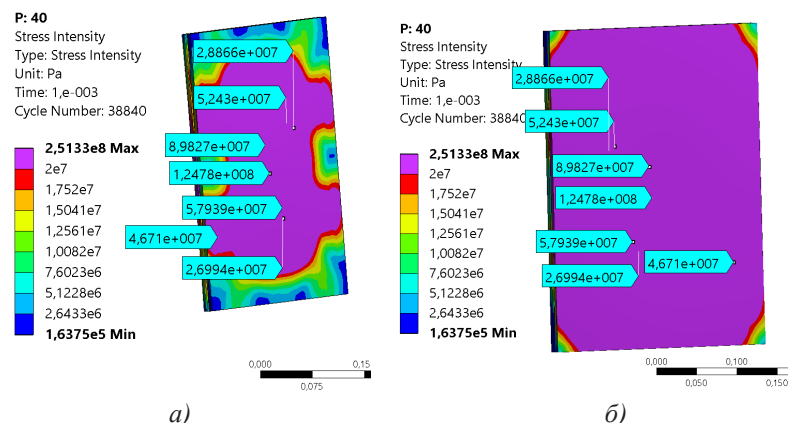


Рис. 2.30. Інтенсивність напружень у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

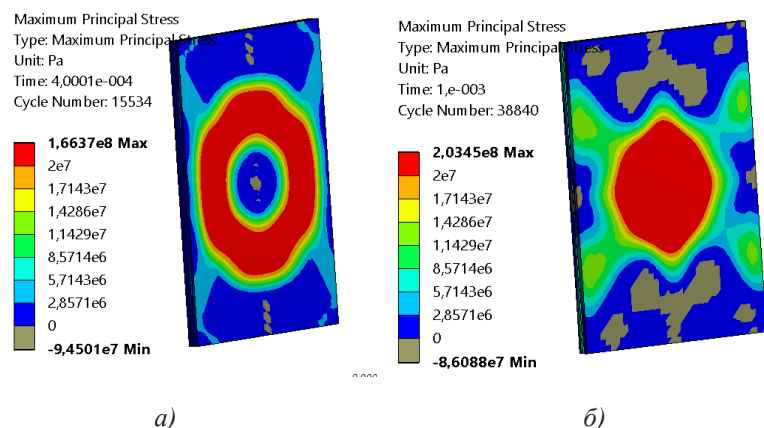


Рис. 2.31. Максимальні головні напруження у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

На рис. 2.31 червоним кольором зображено зони, в яких максимальні головні напруження перевищують границю міцності скла. Характер розподілення напружень по пластині скла має хвилювий характер, тому зони максимальних напружень змінюються в процесі руху контейнера.

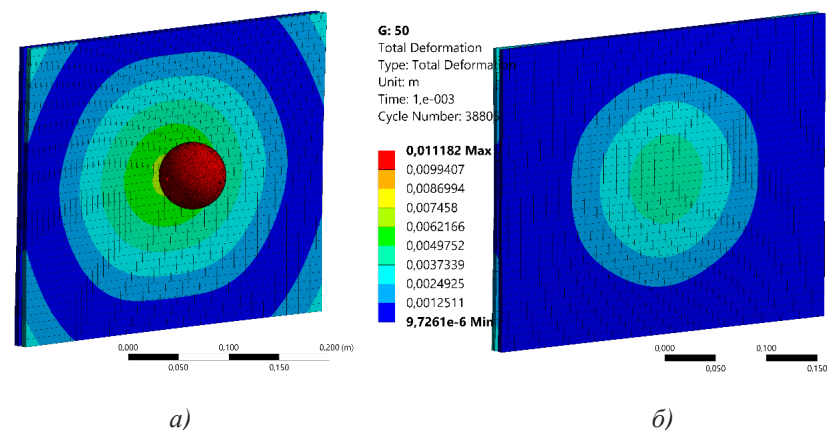


Рис. 2.32. Переміщення у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

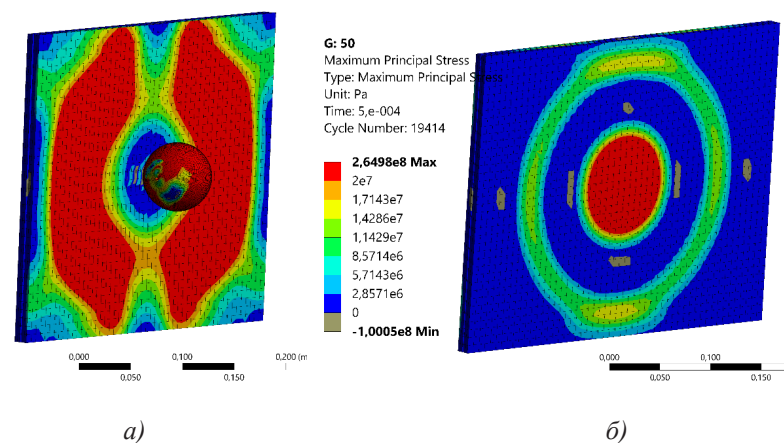


Рис. 2.33. Максимальні головні напруження у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

У той же час напруження, що виникають у контейнері, також перевищують границю міцності пластику. Максимальна інтенсивність напружень дорівнює 250 МПа, а максимальних головних напружень 200 МПа, що дозволяє зробити висновок, що контейнер руйнує скло та також буде зруйнованим при заданих вхідних параметрах.

При збільшенні швидкості характер розподілення переміщень та напружень залишається. Нижче наведено рис. 2.32–2.33 результати розрахунків при швидкості 50 м/с.

Розглянемо випадок при наступних вхідних параметрах: товщина скла 5 мм, відстань між склом 2,5 мм, початкова швидкість 40–45 м/с.

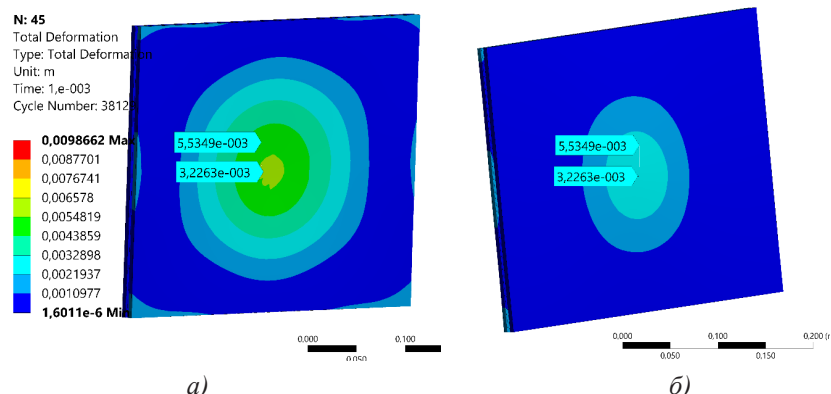


Рис. 2.34. Переміщення у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

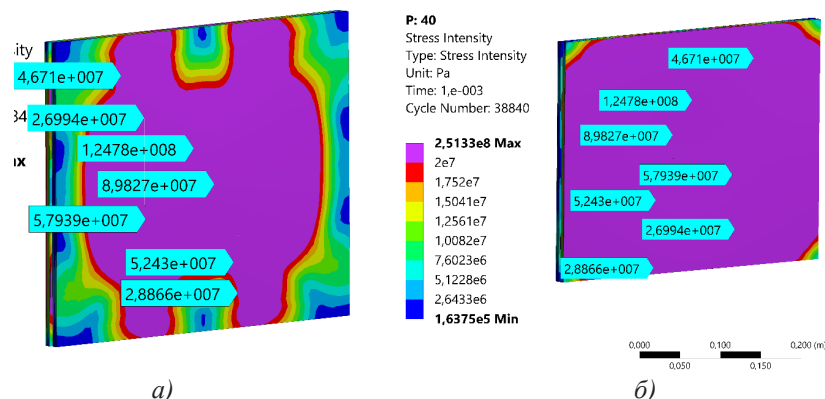


Рис. 2.35. Інтенсивність напружень у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

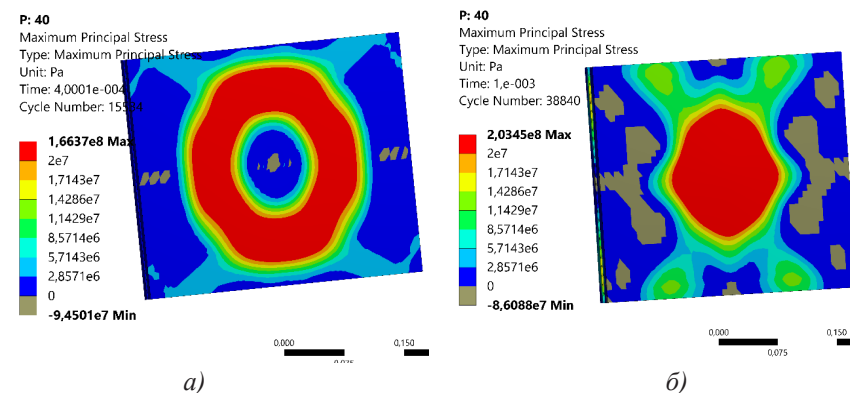


Рис. 2.36. Максимальні головні напруження у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

Аналізуючи отримані результати на рис. 2.34–2.36 при товщині скла 5 мм, можна зробити висновок, що при початковій швидкості в 40 м/с скло буде зруйноване, так як максимальні головні напруження та інтенсивність напружень перевищує границю міцності.

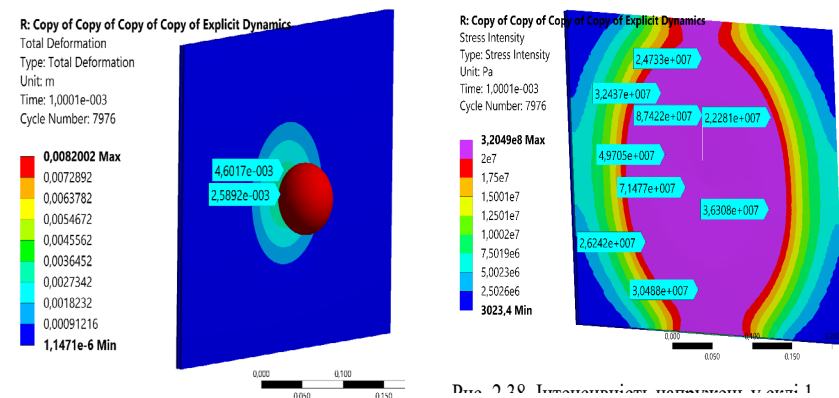


Рис. 2.37. Переміщення у склі 1

Рис. 2.38. Інтенсивність напружень у склі 1

Розглянуто усі варіації вхідних параметрів (товщина скла, відстань між склом та початкова швидкість). Переміщення (рис. 2.37), що виникають при різних варіаціях вхідних параметрів, однакові при відповідній відстані між склом та швидкості в незалежності від товщини скла. Розповсюдження максимальних головних напружень (рис. 2.38–2.39) має хвильовий характер.

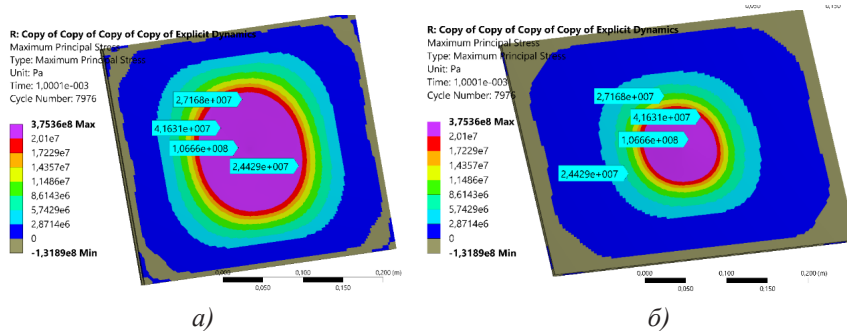


Рис. 2.39. Максимальні головні напруження у склі 1 (а) та у склі 2 (б)

При аналізі отриманих результатів можна зробити висновок, що при ударі наповненого рідиною контейнера в склі, товщиною 6 мм та відстанню між склом 2,5 мм, будуть виникати напруження, що перевищують границю міцності навіть при початковій швидкості 40 м/с. Зона, в якій виникають такі напруження при швидкості 40 м/с велика (перевищує діаметр контейнера) та з'являються по всій товщині скла, що свідчить про руйнування конструкції. Такі результати свідчать про те, що при збільшенні початкової швидкості напруження будуть збільшуватись та характер їх розповсюдження буде той самий.

2.4. Висновки за розділом 2

1. Здійснено дослідження впливу ударного навантаження, визначено критичні рівні швидкостей падіння контейнера, при якому відбувається руйнування. Для визначення параметрів виникаючого

напруженого стану було проведено динамічний аналіз явним чином за допомогою МСЕ. Для цього було побудовано геометричну та СЕ модель конструкції та площу падіння. Проаналізовано стан контейнера при падінні з різною швидкістю. Розглядалися три розрахункові моделі з урахуванням заповнення контейнера водою, порошком та без наповнення. Швидкість падіння варіювалась між 10 м/с та 30 м/с.

2. Отримані значення переміщень у момент падіння контейнера. Для визначення критичної швидкості, при якій відбувається повне руйнування, використовувались два критерії: 1) коли максимальні розтягуючі напруження перевищують границю міцності, 2) коли максимальні еквівалентні напруження перевищують границю плинності.

3. Визначено, що при швидкості падіння 30 м/с наповненої конструкції (як із водою, так і з порошком) зона виникаючих максимальних розтягуючих напружень, що перевищує границю міцності, дорівнює майже половині площі конструкції, що призводить до повного руйнування контейнера. Зона максимальних еквівалентних напружень, що перевищують границю плинності, досягає треті площі конструкції у випадку, коли контейнер наповнено водою.

4. При падінні контейнера зі швидкістю 25 м/с, зони з максимальними напруженнями мають меншу площу, але також призведуть до руйнування конструкції. У випадку, коли швидкість падіння менша за 20 м/с, зона максимальних напружень локалізується зблизу отвору. Значення виникаючих напружень перевищують границю міцності та плинності, але зона їх розповсюдження достатньо мала. У даному випадку це призводить до виникнення тріщини.

5. При аналізі стану контейнера без наповнення визначено, що критична швидкість падіння менша та дорівнює за максимальними розтягуючими напруженнями 25 м/с, а за еквівалентними напруженнями 20 м/с.

6. З отриманих розрахунків можна зробити висновок, що при наповненні контейнера зона максимальних напружень локалізується на верхній поверхні конструкції, на відміну від випадку, коли він не наповнений. Руйнування конструкції відбувається при падінні зі швидкістю 30 м/с, але у випадку наповненні водою зона максимальних напружень більша.

7. Проведено дослідження руйнації шибки при влученні в неї контейнера. Показано, що при ударі наповненого контейнера в склі, товщиною 6 мм та відстанню між склом 2,5 мм, будуть виникати напруження, що перевищують границю міцності навіть при початковій швидкості 40 м/с. Зона, в якій виникають такі напруження при швидкості 40 м/с велика (перевищує діаметр контейнера) та з'являються по всій товщині скла, що свідчить про руйнування конструкції. Такі результати свідчать про те, що при збільшенні початкової швидкості напруження будуть збільшуватись та характер їх розповсюдження буде той самий.

Розділ 3

ЕФЕКТИВНІСТЬ СПОСОБУ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ

Запропонований метод дистанційної подачі вогнегасної речовини має ряд переваг перед існуючими методами. Враховуючи це, ми провели експериментальну оцінку даних переваг, кількісно.

3.1. Експериментальна перевірка ефективності використання методу локалізації пожежі класу А дискретною подачею вогнегасної речовини

Метою проведення експериментальних досліджень щодо перевірки ефективності використання методу локалізації пожежі класу А дискретною подачею є виявлення ефекту зниження температури пожежі під час доставки вогнегасних речовин (вогнегасного порошку) [25].

Для цього був обраний вогневий модуль контейнерного типу. Він являє собою металевий контейнер, в якому проводяться навчання з гасіння пожеж. У вогневий модуль розміщено пожежне навантаження 45 кг/м² із соснової деревини, вологістю деревини 14% (середнє значення пожежного навантаження для багатоповерхових будівель 40 кг/м²). Після цього ця деревина була підпалена, за 10 хвилин вільного розвитку (середній час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до місця пожежі) подавалась вогнегасна речовина за допомогою установки для дискретної доставки вогнегасних речовин.

Згідно довідника [48] орієнтовна температура в осередку пожежі 900 °С під час горіння деревини соснової в огороженні при пожежі

ному навантаженні 50 кг/м². Температура полум'я під час горіння деревини складає 700–1000 °C [48]. Для визначення температури в осередку пожежі використовується тепловізор FLIR K33 (рис.3.1) [125]. На тепловізорі максимальна температура відображається 800 °C на 10-ту хвилину вільного розвитку пожежі у вогневому модулі (рис. 3.3).



Рис. 3.1. Тепловізор FLIR K33

Вогнегасна речовина: АВС-порошок (фосфорноамонійні солі та технологічні добавки), який використовується для гасіння пожеж класу А,В,С, а також електрообладнання під напругою. Вогнегасний порошок був розміщений у контейнер (рис. 3.2, в.), вага наповненої сфери порошком складає 145 гр. Матеріалом контейнера, прототип якого був створений шляхом 3D друку, є пластик типу PLA (рис. 3.2, а), вага пустого контейнера складає 44 гр. (рис. 3.2, б). PLA-пластик (поліактід) – біорозкладний пластик для 3D-друку методом пошарового наплавлення. Основу матеріалу складають натуральні інгредієнти: ку-

курудза, цукровий очерет, крохмаль, целюлоза. У натуральному вигляді PLA-пластик є прозорим.



Рис. 3.22. а) 3D друк контейнера для доставки ВР; б) пустий контейнер для доставки ВР; в) з вогнегасним порошком для доставки в осередок пожежі

Двадцять дев'ять контейнерів із вогнегасним порошком (загальною масою 2 кг 900 грамів), які були подано на гасіння пожежі, протягом 145 секунд. Температура за цей час знизилась із 800 °C до 130 °C (рис. 3.4). Інтенсивність подачі – 1 сфера за 5 секунд (101 грам вогнегасного порошку (далі ВП)).



Рис. 3.3. а) температура в осередку пожежі на 10-ту хвилину вільного розвитку

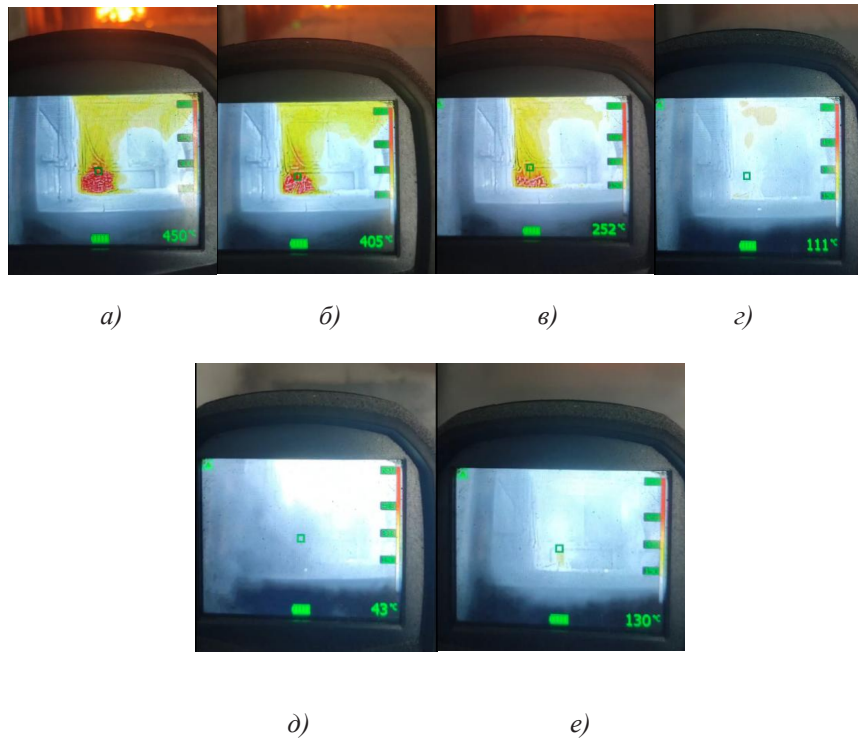


Рис. 3.4. Температура в осередку пожежі

- а) після 30-ї секунди початку гасіння сферами з ВП;
 б) після 60-ї секунди початку гасіння сферами з ВП;
 в) після 90-ї секунди початку гасіння сферами з ВП;
 г) після 110-ї секунди початку гасіння сферами з ВП;
 д) після 135-ї секунди початку гасіння сферами з ВП;
 е) після 145-ї секунди початку гасіння сферами з ВП

Обробивши результати експерименту, отримано графік залежності часу гасіння на температуру при дискретній доставці вогнегасних речовин (рис. 3.5).

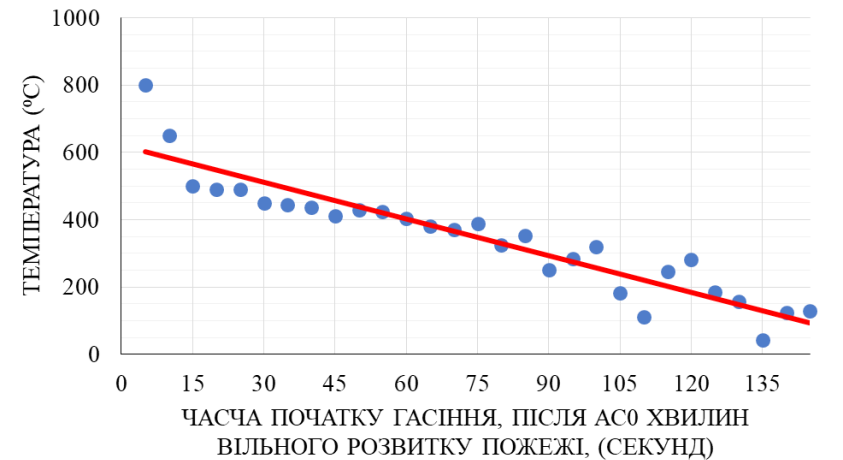


Рис. 3.5. Графік залежності часу гасіння на температуру при дискретній доставці вогнегасної речовини в контейнері

Таким чином, продовж 2,5 хвилин відбулося суттєве зниження температури в осередку пожежі, що показує пригнічення розвитку горіння й може трактуватися як локалізація пожежі. За цей час сили пожежогасіння мусять провести повноцінне оперативне розгортання й приступити до остаточної ліквідації пожежі.

3.2. Експериментальне визначення параметрів купності влучення контейнером у ціль

Доставка КВР в осередок пожежі можлива при задовільній купності влучання контейнером у віконний отвір.

Для експериментальних досліджень купності потрапляння КВР в умовну мішень був виготовлений спеціальний лафет (див. рис. 2.8),

який дозволив закріпити дослідну УДПВР і варіювати кут ствола відносно землі в інтервалі від 10° до 80°.

Для врахування швидкості вітру використовувався анемометр BENETECH цифровий (GM816) (рис. 3.6) з характеристиками: діапазон вимірювання швидкості повітряного потоку 0.1~30м/с; похибка при вимірюванні швидкості повітряного потоку $\pm 5\%$; роздільна здатність 0.1 м/с).



Рис. 3.6. Анемометр BENETECH цифровий (GM816)

Для визначення куту нахилу ствола до горизонту використовувався інклінометр (рис. 3.7) – цифровий кутомір із роздільною здатністю вимірювання $\pm 0,01^\circ$. Він має дві функції: REF (обнуління вимірювання до еталонного значення) і HOLD (заморожування показань). РК-дисплей і вбудований в основу магніт полегшують роботу. Вимірювання можуть проводитися в чотирьох одиницях: $^\circ$ градусах, %, мм/м або IN/FT. Дивиться від двох батарейок 1,5V AAA.

Проводились експериментальні дослідження купності попадання контейнера за допомогою дослідної УДПВР у вікно 4 поверху навчальної пожежної вежі (11 метрів 65 см до центру мішені по вертикалі від поверхні землі). Мішень розміром 1x1 м (рис. 3.8) (кола з відстанню

в 10 см від центру) виготовлена з пінопласту, обмотана поліетиленовою стрічкою та прикріплена до дерев'яного щита (рис.3.8), який потім встановлювався у вікно навчальної пожежної вежі. Відстань від проекції зрізу ствола до основи вежі міряли геодезичною рулеткою по поверхні землі.



Рис. 3.7. Цифровий інклінометр NEO TOOLS

Експериментальне дослідження проводилося в три етапи – мінялась дальність розміщення ствола по відношенню до пожежної вежі. У першому випадку дальність відповідно склала 9 метрів, у другому 12 метрів, у третьому 15 метрів. Після здійснення серії обстрілів мішень знімалась і по характерним ушкодженням мішені відмічалися центри влучань, після чого знаходились їх декартові координати в системі координат, пов'язаної із центром мішені. Отримані результати приведено на рис. 3.9–3.10 і в табл. 3.1.

При проведенні експерименту з купності влучання із ціллю запобігання руйнування контейнерів, використовувався цільний імітатор контейнера, який мав ті ж самі масо-габаритні параметри, що й оригінальний контейнер (вага 155 г). Спочатку було проведено пробне випробування з відстані 9 метрів, результат якого наведено на рис. 3.4.



Рис. 3.8. Мішень із пінопласту для експериментальних досліджень прикріплена до деревного щита за допомогою стрічки поліетиленової

Була проведена серія з 27 пострілів при відстані 9 метрів до навчальної пожежної вежі від проекції краю ствола, кут нахилу ствола 50 градусів. Швидкість повітряних мас коливалась в межах 1,5 м/с – 2,5 м/с в сторону вежі.

Друга серія з 37 пострілів була здійснена з відстані 12 метрів від навчальної пожежної вежі до краю ствола дослідної установки, кут нахилу ствола 46 градусів. Швидкість повітряних мас коливалась у межах 1,5 м/с – 2,5 м/с, температура навколишнього середовища 18 °С, вітер у сторону вежі.

Третя серія з відстані 15 метрів від навчальної пожежної вежі складалась із 35 пострілів. Швидкість повітряних мас коливалась у межах 2 м/с – 5 м/с, температура навколишнього середовища 16°С, вітер у сторону вежі. Кут нахилу ствола становив 40 градусів.



Рис. 3.9. Експериментальне дослідження купності дискретної подачі вогнегасних речовин, 9 метрів до мішені (пробне випробування)



Рис. 3.10. Експериментальне дослідження купності дослідної установки дискретної подачі вогнегасних речовин у контейнерах, 12 метрів до мішені

Для всіх трьох серій була проведена фіксація координат центрів влучань табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Координати центрів влучань при обстрілі мішені

№	9 метрів		12 метрів		15 метрів	
	х	у	х	у	х	у
1	-20	11,8	-57	59,7	-62,3	-66
2	-22	0	0	57,3	-61,7	62
3	-6,8	8	14,7	58	-55	31,7
4	-2,8	8,8	34	50,7	-18,7	67,7
5	-6,3	12,7	48,7	48,7	9,3	67,3
6	-1,8	13,8	53,3	15,3	-0,3	57,7
7	-16,5	-13,7	52	4	14,3	53,7
8	-20,8	-29,8	44	-53	41	38,7
9	-6,2	-22,7	-34	-51,3	56,7	0
10	-1	-25,3	-52	-49	53,7	-36
11	-9,3	-29,2	24	55,7	28,7	-55,7
12	-13,8	-38,8	24	-39,3	11	-56,3
13	5	-36,3	36,7	-35,7	14	-63,3
14	10,5	-17,2	-16,7	-11,3	0	-63,7
15	15,2	-7,8	-16,7	-6,3	-4,7	-63,3
16	31,3	2,3	-2,7	0	-27,7	-63
17	36	2	1	9,3	8,3	44,7
18	39,7	0,7	20	41	-18,3	29,3
19	33,2	-4	28,7	40,7	-46,3	-7,3
20	35,5	-22	36,3	20	-23,3	-25
21	29	-41,7	0	23	18	14
22	15,5	-50	0	32,3	11,7	9,3
23	15	-55,7	0,7	44,7	11,7	3,7
24	19,8	-54,2	-30,3	2,7	-15,7	4,3

№	9 метрів		12 метрів		15 метрів	
	х	у	х	у	х	у
25	-16,8	-49,5	-34	4	16	-17,7
26	-17,2	-52	-8,7	7,7	38	-26,7
27	-17,5	-55,7	-11,7	10,7	10,3	-46,3
28	-	-	-23,3	20	-20,3	-21,3
29	-	-	-43	21	-18,7	1
30	-	-	-33,3	31,7	-38,3	-12,7
31	-	-	-15,3	32,3	24,7	31,7
32	-	-	-9,3	44,7	19,7	21,3
33	-	-	-12	44,3	1	-1,7
34	-	-	-12	47,3	12	-38,7
35	-	-	-15,3	46,7	32,7	-38,7
36	-	-	-18,3	45,3		
37	-	-	-47	7,3		

Результати влучань для трьох етапів експериментальних досліджень наведено на рисунках 3.11–3.13.

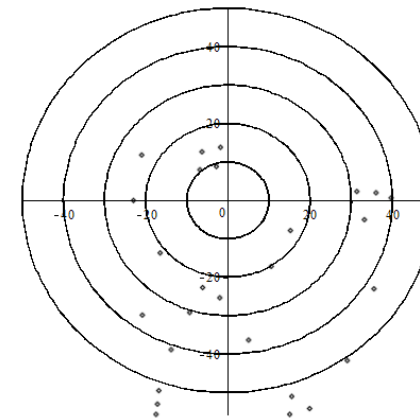


Рис. 3.11. Результати влучань у мішень із відстані 9 метрів

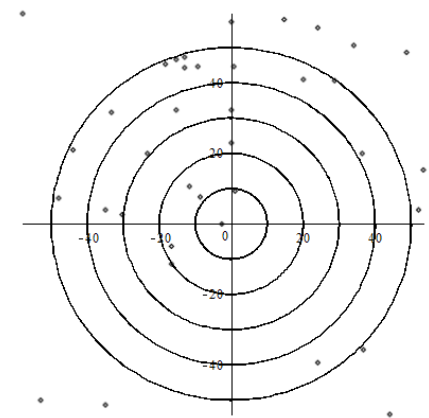


Рис. 3.12. Результати влучань із відстані 12 метрів

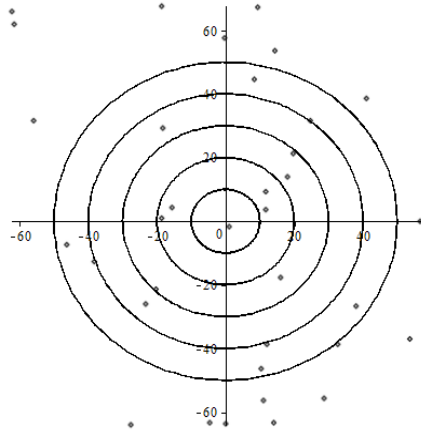


Рис. 3.13. Результати влучань у мішень із відстані 15 метрів

Порівняння рис. 3.11–3.13 підтверджує очевидне твердження, що збільшення відстані призводить до зменшення крупності.

3.3. Оцінка ефективності устаткування для контейнерної доставки вогнегасної речовини

Отримані результати узагальнювались у вигляді математичної моделі купності влучення.

З теорії пострілу відомо [126, 127], що функція щільності імовірності купності описується нормальним двовимірним розподілом, тому за основу моделі для кожного з трьох випадків ($j=1,2,3$, $N_1 = 27$, $N_1 = 37$, $N_1 = 3$) взято формулу

$$f_j(x, y) = \frac{e^{-\frac{(x-Mx_j)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(y-My_j)^2}{\sigma_y^2}}}{\pi \cdot \sigma x_j \cdot \sigma y_j}, \quad (3.1)$$

де математичні сподівання й дисперсія задаються відомими формулами

$$Mx_j = \sum_{i=1}^{N_j} x_{ij}, \quad My_j = \sum_{i=1}^{N_j} y_{ij}, \quad \sigma x_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} x_{ij}^2}{N_j} - Mx_j^2, \\ \sigma y_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} y_{ij}^2}{N_j} - My_j^2. \quad (3.2)$$

Для кожної серії дослідів отримано значення параметрів, які наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Значення параметрів для серії дослідів

	Mx_j , см	My_j , см	σx_j^2 , см ²	σy_j^2 , см ²
j=1	3,8	-20,3	402	558
j=2	-2,2	18,3	906	1020
j=3	0,6	-1,0	896	1770

З аналізу таблиці видно, що по прицільності має місце похибка – математичне сподівання значно відрізняється від 0 (по вертикалі), тобто необхідно підвищувати прицільність за рахунок додаткового удосконалення обладнання (забезпечувати засобами лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів та далекоміром), а також за рахунок додаткового навчання оператора даного устаткування.

Перевірка статистичної гіпотези щодо нормального розподілу здійснювалась згідно стандартної процедури [128, 129].

Приклад графіку функції розподілу $f(x, y)$ наведено на рис. 3.14.

Отримані математичні моделі купності дозволили оцінити імовірність влучення у віконний отвір. Оцінимо імовірність влучення в незв'язну область θ , що захищена шибкою.

Зрозуміло, що залежно від вибору точки прицілювання (x_0, y_0) імовірність P влучання контейнером в область буде змінюватися, тобто необхідно отримати функцію розподілу $P(x_0, y_0)$.

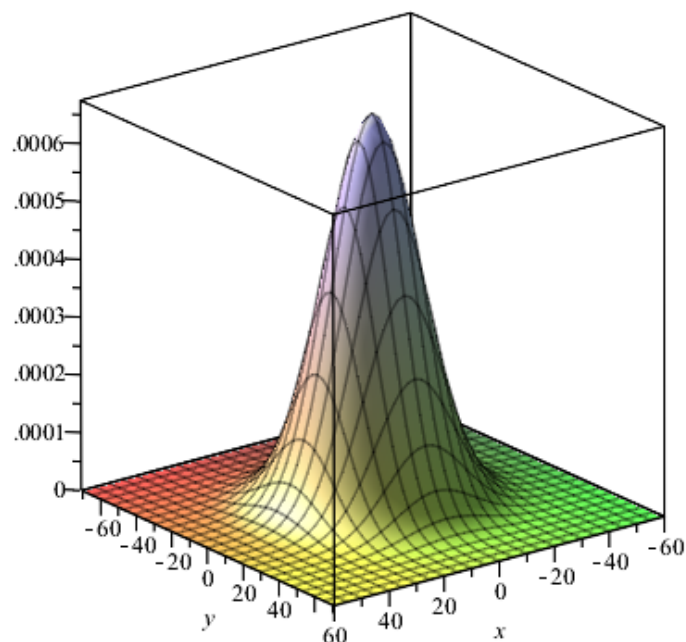


Рис. 3.14. Графік щільності розподілу купності для влучання з відстані 9 м

Імовірність обчислювалась чисельно на решітці, варіюючи місцеположення точки прицілювання (x_0, y_0) на прямокутній області інтегрування $\tilde{\Omega}$ такої, що $\theta \subset \tilde{\Omega}$, згідно формули

$$P(x_0, y_0) = \iint_{\tilde{\Omega}} \frac{e^{-\frac{(x-Mx_j-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(y-My_j-y_0)^2}{\sigma_y^2}}}{\pi \sigma x_j \cdot \sigma y_j} dx dy. \quad (3.3)$$

Залежно від місцеположення точки прицілювання, згідно виразу (3.3), розраховано значення ймовірності влучення у віконний отвір (область θ) (для розподілу, заснованого на параметрах першої серії експериментальних обстрілів), що проілюстровано у вигляді тонової заливки на рис. 3.15–3.16.

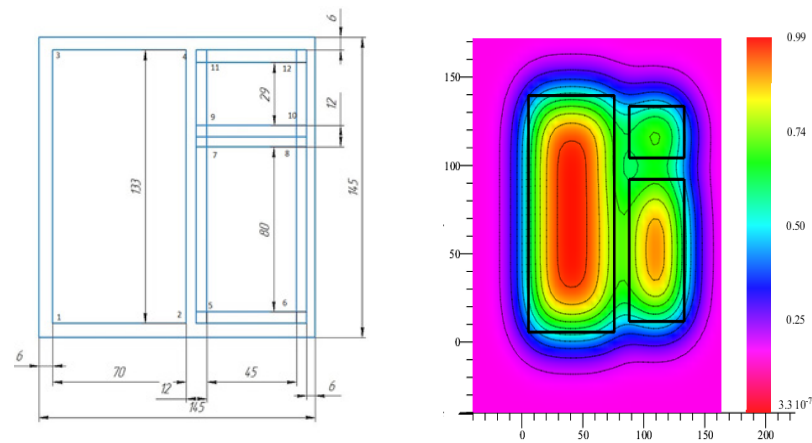


Рис. 3.15. Приклад обчислення ймовірності влучання в типовий віконний отвір

Видно, що ймовірність влучення в шибку при прицілюванні в центр шибки є дуже високою, сягає до 0,99. Таким чином, запропонований спосіб доставки контейнерів із вогнегасною речовиною демонструє свою ефективність із точки зору доставки вогнегасної речовини.

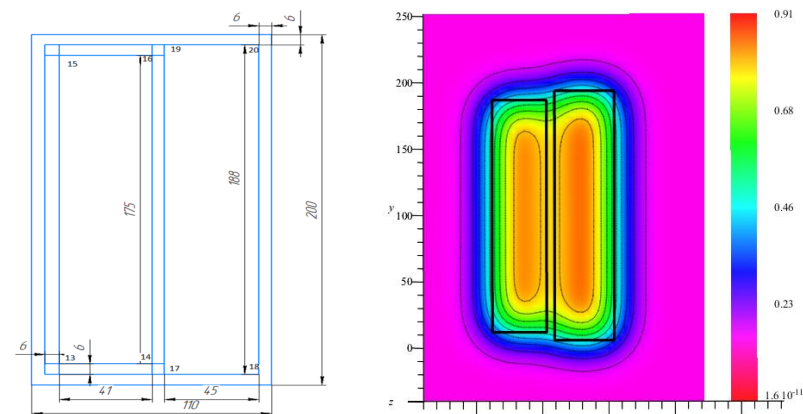


Рис. 3.16. Приклад обчислення ймовірності влучання в типовий віконний отвір

Крім того, для одного й того ж віконного отвору було проведено розрахунки влучання в нього при купності, яка отримана для кожної з трьох серій експериментів, що проілюстровано на рис. 3.17.

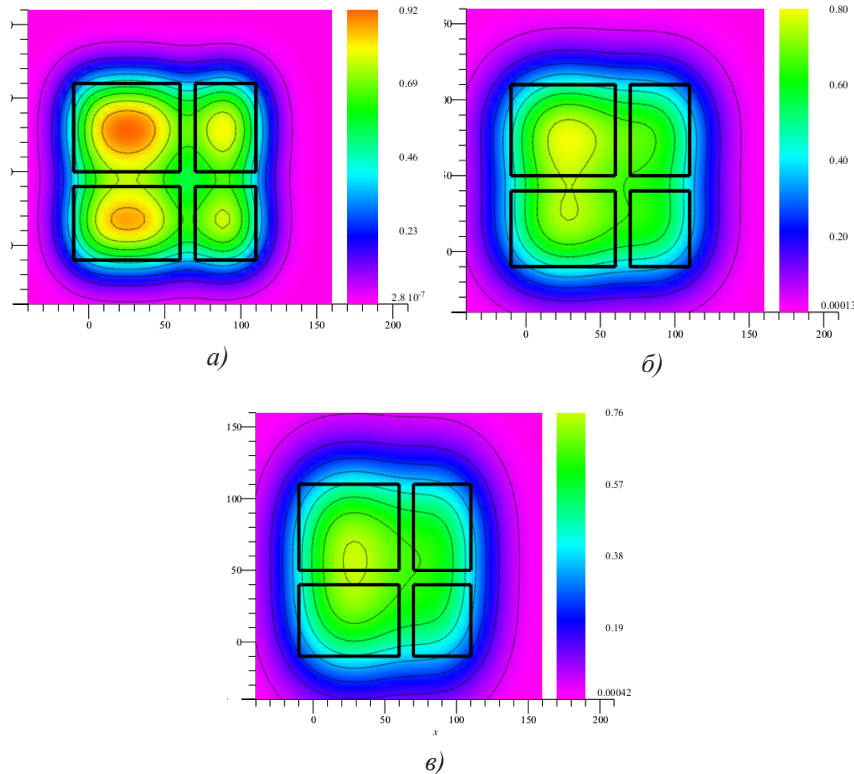


Рис. 3.17. Імовірність влучення у віконний отвір для параметрів купності:

а) перша серія експериментів; б) друга серія; в) третя серія

Видно, що при зростанні відстані до ствола імовірність влучання у віконний отвір знижується. Крім того стає зрозумілим, що при малій відстані від ствола до вікна має сенс цілити в центр окремої (краще – найбільшої) шибки, а при зростанні відстані необхідно цілити в центр вікна.

Оскільки імовірність влучення у віконний отвір зі зростанням відстані знижується, то, відповідно, збільшується імовірність влучення за межами вікна. Важливим є отримання відповіді на питання обчислення імовірності небажаного влучання в сусіднє вікно при прицілюванні саме у вікно, за яким має місце осередок пожежі, щоб не нанести збитки сусідній оселі, де пожежі немає.

Розглянемо прямокутне вікно, за яким має місце пожежа, і розміри якого $L \times H$, помістивши його центр у початок системи координат. Тоді область вікна буде задаватися нерівністю

$$W(x; y) = \begin{cases} -L/2 \leq x \leq L/2; \\ -H/2 \leq y \leq H/2. \end{cases} \quad (3.4)$$

Зауважимо, що $W \subset \theta$ – область, що зайнята шибками, є частиною області вікна, і тому імовірність влучення в область вікна буде суттєво вищою ніж в область шибок (оскільки для шибок не враховується рама вікна). Відповідно, імовірність попасти за межі вікна буде нижчою, ніж імовірність не попасти в шибку.

Функція щільності розподілу випадкової величини для координати точки влучання буде задаватися як

$$f(x; y) = \frac{e^{-\frac{(x-Mx)^2}{\sigma_x^2}} \cdot e^{-\frac{(y-My)^2}{\sigma_y^2}}}{\pi \sigma_x \cdot \sigma_y}. \quad (3.5)$$

Будемо цілитися при обстрілі в середину вікна, тобто

$$Mx = 0, My = 0. \quad (3.6)$$

Імовірність влучення в область вікна дорівнює

$$P_w = \iint_w f(x, y) dx dy. \quad (3.7)$$

Задамо навколо вікна область змінної ширини

$$\omega(X; Y) = \begin{cases} -L/2 - X \leq x \leq L/2 + X; \\ -H/2 - Y \leq y \leq H/2 + Y. \end{cases} \quad (3.8)$$

Оскільки $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x; y) dx dy = 1$, то

$$\iint_{\Omega/\omega} f(x; y) dx dy + \iint_{\omega} f(x; y) dx dy = 1, \quad (3.9)$$

$$\text{де } \Omega = \begin{cases} -\infty < x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{cases}$$

Звідки знаходимо імовірність потрапляння контейнера на відстань більшу ніж X і Y від краю вікна.

$$P(X; Y) = P\left(\begin{matrix} x < -L/2 - X; x > L/2 + X \\ Y < -H/2 - Y; y > H/2 + Y \end{matrix}\right) = \iint_{\Omega/\omega} f(x; y) dx dy = \quad (3.10)$$

$$= 1 - \iint_{\omega} f(x; y) dx dy = 1 - \int_{-L/2-Y}^{L/2+Y} \int_{-H/2-Y}^{H/2+Y} f(x; y) dx dy.$$

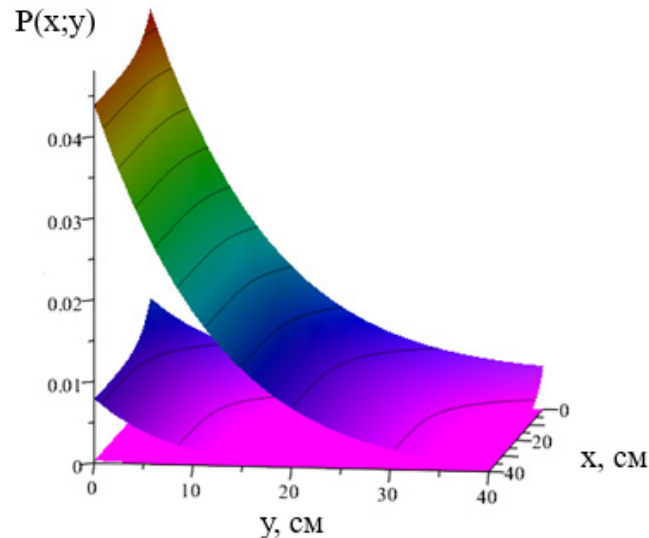


Рис. 3.18. Імовірність ушкодження сусіднього вікна залежно від відстані між вікнами для трьох варіантів купності

Даний інтеграл обчислювався подібно (3.3). На рис. 3.18 наведено графік залежності імовірності потрапляння контейнера на відстань не меншу ніж (x, y) назовні від краю вікна. Видно, що зі зростанням цієї відстані імовірність швидко знижується й вже на 40 см практично дорівнює 0. Таким чином, доставка у вікно, за яким зафіксовано пожежу, є безпечною для сусідніх вікон.

Таким чином показано, що запропонований метод дискретної доставки вогнегасної речовини характеризується високим ступенем точності влучання – імовірність потрапляння контейнером у границі вікна не менша 95%, при тому, що імовірність влучання поза вікном (і, відповідно, небажане влучання у вікно сусіднє) швидко спадає при зростанні відстані від вікна й на відстані в 0,4 м від границі вікна не перевищує 0,1 відсотка.

Крім того, була проведена серія натурних пострілів на максимальну відстань доставки. Отримано дані, наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Результати доставки контейнерів на максимальну відстань

№ досліду	Параметри		Результат			
	Кут, градуси	Тиск, атм.	y_1°	y_2°	y_3°	Середнє
1	55	24	115	118	120	117,6
2	75	24	65	68	67	66,6
3	50	24	128	125	130	127,6
4	45	23	140	137	138	138,3

Отримані данні демонструють ефективність методу в сенсі його «дальності».

3.4. Висновки за розділом 3

Проведені експерименти й розрахунки дозволили стверджувати про ефективність запропонованого методу дискретної доставки вогнегасної речовини в осередок пожежі.

1. Використання подачі вогнегасного порошку для локалізації пожежі методом дискретної доставки продемонструвало зниження температури осередку пожежі з 800 до 130 градусів за 145 секунд.

Проведені серії натурних експериментів дозволили встановити параметри купності влучання контейнером при обстрілі умовної мішені. Показано, що запропоноване устаткування характеризується достатньо високими параметрами купності влучання в мішень. Засновуючись на отриманих параметрах розподілу влучань, розрахована імовірність попадання контейнером при обстрілі типових віконних отворів. Показано, що дана імовірність практично досягає значення 0,9–0,95, що забезпечує майже гарантоване влучення контейнером в віконний отвір. У той же час, імовірність небажаного влучання в сусіднє вікно (за яким немає пожежі) дорівнює 0,001 вже на відстані 40 см від границь вікна, за яким пожежа має місце.

2. Проведена серія пострілів у довжину продемонструвала значну дальність запропонованого методу, яка переважає існуючі методи доставки вогнегасних речовин – запропоноване устаткування дозволяє доставляти контейнер із вогнегасною речовиною на відстань до 140 м.

Розділ 4

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ СПОСОБУ ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ

4.1 Підхід до розрахунку зовнішньої балістики контейнера для дискретної доставки вогнегасної речовини

Однією з переваг запропонованого методу дистанційної подачі вогнегасної речовини є його значна відстань доставки, і тому важливе місце посідає розрахунок траєкторії подавання контейнера з вогнегасною речовиною в осередок пожежі на верхніх поверхах будинків [1, 4, 7, 18–24].

Для визначення траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі було залучено відомі з механіки диференціальні рівняння та їх розв'язки. Доповненням до цих результатів є отримані залежності для опису навісної та настільної траєкторій, що перетинаються в точці палаючого вікна будівлі. Також визначені значення мінімальної стартової швидкості для доставки контейнера в задане вікно будівлі необхідного поверху. При цьому вважається, що для розрахунків відома висота розташування палаючого вікна (від рівня землі), а також відома відстань від зрізу ствола установки до стіни будівлі. Складено maple-програму для перевірки отриманих залежностей шляхом побудови траєкторій доставки засобами комп'ютерної графіки.

Дана програма дозволяє:

- описати кути вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій у заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі);
- розрахувати мінімальну стартову швидкість, здатну забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі;
- описати траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти над фундаментом за умови відомої відстані від імпульсного вогнегасника до стіни;
- розрахувати вплив вітру на зміну «штильової» траєкторії контейнера.

Крім того, одержані результати в подальшому доцільно покласти в основу створення комп'ютерних симуляторів для проведення тренувань особового складу в режимі штабних ігор.

Результати симуляції можна також одержати у вигляді таблиці, де початкові швидкості та кути вильоту контейнера поставлені в залежність від номеру поверху будівлі.

Будемо вважати, що форма траєкторії залежить від основних геометричних та фізичних параметрів: маси контейнера, початкової швидкості та кута його вильоту (відносно рівня горизонту), радіуса сферичного контейнера, коефіцієнта опору форми контейнера (яку часто називають парусністю), а також характерної площі опору руху контейнера. Мета дослідження полягає у виборі таких значень кута вильоту та початкової швидкості вильоту, щоб контейнер із вогнегасною речовиною влучив у вікно, за яким палає пожежа.

Під поняттям «доставки контейнера до палаючого вікна» будемо розуміти доставку центра маси контейнера до центральної точки вікна з пожежею.

4.2. Побудова настільної і навісної траєкторій, які перетинаються в заданій точці вікна

Перший етап розрахунку траєкторій виявляється у визначенні пари кутів вильоту контейнера, які забезпечують існування настільної і на-

вісної траєкторій. При цьому зазначені траєкторії мають перетинатися в заданій точці палаючого вікна будівлі [20].

Нехай в декартовій системі координат $Oxyz$ у вертикальній площині задано точку з координатами $M(x,z)$. З початку координат вилітає фізичне тіло – контейнер у формі сфери за умови, що на нього діє поле земного тяжіння. Необхідно визначити формулу для опису кута вильоту контейнера, здатного влучити в точку $M(x,z)$. Вважатимемо, що тіло має постійну швидкість v . Необхідно знайти, під яким кутом до горизонту направити контейнер, щоб він потрапив у точку m .

Для виводу формули розглянемо відомі з механіки рівняння руху точки

$$x = vt \cos \alpha, \quad (4.1)$$

$$z = vt \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \quad (4.2)$$

Тут t – час, v – швидкість.

Рівняння (4.1) описує горизонтальні координати переміщення точки, а рівняння (4.2) – її вертикальні координати. З рівняння (4.1) визначимо час t :

$$t = \frac{x}{v \cos \alpha}. \quad (4.3)$$

Далі, підставивши вираз (4.3) у формулу (4.2), одержимо:

$$z = \frac{vx \sin \alpha}{v \cos \alpha} - \frac{gx^2}{v^2 \cos^2 \alpha}. \quad (4.4)$$

Виконаємо тригонометричну підстановку $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$ і отримаємо

$$z = xt \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v^2 \cos^2 \alpha}. \quad (4.5)$$

Далі, аналогічно, виконаємо підстановку $\frac{1}{\cos^2 \alpha} = 1 + \operatorname{tg}^2 \alpha$

$$z = xtga - \frac{gx^2}{2v^2}(1 + tg^2\alpha) \quad (4.6)$$

У формулі (4.6) розкриємо дужки й здійснимо її спрощення

$$0 = -\frac{gx^2}{2v^2}tg^2\alpha + xtga - \frac{gx^2}{2v^2} - z \quad (4.7)$$

Розглядаючи вираз (4.7) як квадратне рівняння відносно tga , застосуємо формулу визначення коренів цього рівняння

$$tga = \frac{-x \pm \sqrt{x^2 - \frac{gx^2}{2v^2}(\frac{gx^2}{2v^2} - z)}}{2\frac{gx^2}{2v^2}} \quad (4.8)$$

Помножимо чисельник і знаменник на вираз $-\frac{v^2}{x}$. Потім перенесемо вираз $\frac{v^4}{x^2}$ під знак кореня й одержимо

$$tga = \frac{v^2 \pm \sqrt{v^4 - g(gx^2 + 2v^2z)}}{gx} \quad (4.9)$$

На завершення застосуємо до кожної частини арктангенс

$$\alpha = \arctg \frac{v^2 \pm \sqrt{v^4 - g(gx^2 + 2v^2z)}}{gx} \quad (4.10)$$

У результаті одержано два корені рівняння, які визначають описи двох кутів вильоту тіла, що забезпечують існування настільної і навісної траєкторії його руху. Тобто два корені рівняння відповідатимуть двом можливим кутам запуску за умови, що вони не уявні. У протилежному випадку можна стверджувати, що початкова швидкість фізичного тіла недостатньо велика для досягнення ним обраної точки (x, y) .

При моделюванні геометричної форми траєкторії переміщення контейнера з вогнегасною речовиною необхідно приділити увагу її адекватності. Для цього в диференціальні рівняння введено певну кількість

параметрів. На даному етапі досліджень будуть враховані основні фізичні величини, які суттєво впливатимуть на форму траєкторії.

За основу розрахунків обрано диференціальні рівняння [23, 24]

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 C_f \frac{\rho S \cos \alpha}{2m}; \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -g - \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 C_f \frac{\rho S \sin \alpha}{2m}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

де m – маса контейнера; α – кут вильоту контейнера; C_f – безрозмірний коефіцієнт опору форми контейнера; ρ – щільність середовища (повітря), (кг/м³);

v – швидкість вітру (або тіла в потоці), (м/с); g – прискорення вільного падіння, (м/с²); S – характерна площа перпендикулярно потоку вітру, (м²) – для сферичних тіл S є функцією від об'єму: $S = \pi R^2$.

Було складено *maple*-програму побудови зазначених траєкторій (4.10), які досягають заданої точки на будівлі. Фрагмент програми наведено на рис. 4.1.

```
alpha1:=
arctan((v0^2 - sqrt(v0^4-g*(g*L^2+2*H*v0^2)))/(g*L));
strim1:= plot([x(t,v0,alpha1,m,Cf,rho,S),
y(t,v0,alpha1,m,Cf,rho,S), t=0..2.3], scaling=CONSTRAINED,
color=blue,thickness=3,linestyle=4);
alpha2:=
arctan((v0^2 + sqrt(v0^4-g*(g*L^2+2*H*v0^2)))/(g*L));
strim2:= plot([x(t,v0,alpha2,m,Cf,rho,S),
y(t,v0,alpha2,m,Cf,rho,S), t=0..3.5], scaling=CONSTRAINED,
color=red,thickness=3,linestyle=4);
```

Рис. 4.1. Фрагмент *maple*-програми побудови траєкторій руху контейнера

Тут вирази для функцій $x(t)$ і $y(t)$ одержуються в результаті розв'язання диференціальних рівнянь руху контейнера (4.1) при таких початкових умовах

$$x_0:=0; y_0:=0; v_0_x:=v_0*\cos(\alpha); v_0_y:=v_0*\sin(\alpha);$$

де v_0 – початкова швидкість вильоту контейнера.

У результаті отримали аналітичні вирази для функцій $x(t)$ та $y(t)$, що визначають координати траєкторії руху контейнера. Аналітичні вирази мають громіздкий вигляд і тут не наводяться. Переконавшись в їх достовірності зможемо за допомогою тестових розрахунків. У програмі на рис. 4.1 α_1 і α_2 – кути (у радіанах) до горизонту, під якими необхідно запустити контейнер, щоб траєкторії перетнулися у необхідній точці вікна будівлі.

На рис. 4.2 зображено результат виконання складеної maple-програми. При цьому значення параметрів обрано такі: $m=0.145$; $r=0.069$; $C_f=0.01$; $\rho=1.2$; $S=\pi*r^2$; $g=9.81$. Значення кутів вильоту та початкові швидкості вильоту вказані на рис. 4.2.

Побудовані зображення переконують в існуванні деякої мінімальної швидкості вильоту, яка дозволяє поєднуватись (зливатись) навісній та настільній траєкторіям, а також забезпечує потрапляння контейнера в задану точку будівлі.

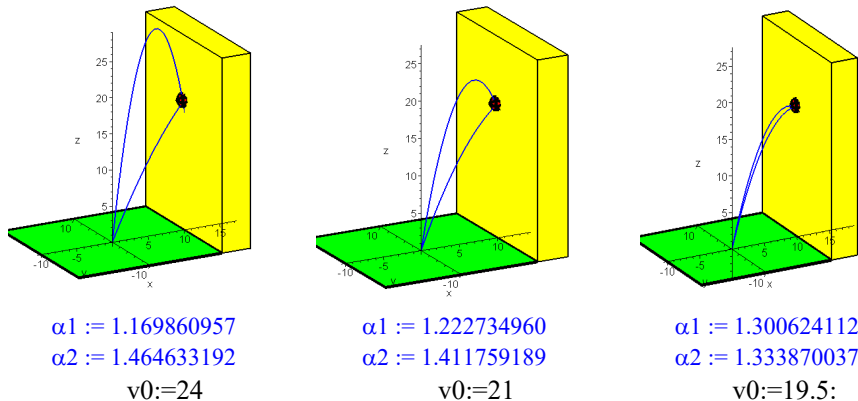


Рис. 4.2. Ілюстрація залежності кутів вильоту від початкової швидкості вильоту

4.3. Розрахунок доставки контейнера з мінімальною початковою швидкістю до вікна з пожежею

Другий етап розрахунку траєкторій полягає в обчисленні мінімальної швидкості вильоту, яка проявляється у вигляді умови поєднання (злиття) навісної та настільної траєкторій [23].

Вважатимемо, що контейнер із вогнегасною речовиною випущений із початку координат системи Oxz під кутом α до горизонту. Рівняння руху по параболічній траєкторії має вигляд

$$z = xtga - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (4.12)$$

Необхідно визначити мінімальну початкову швидкість вильоту, здатну доставити тіло з точки початку координат до наперед заданої точки з координатами $M(L,H)$. Підставимо координати точки $M(L,H)$ в рівняння траєкторії руху тіла. У результаті одержимо

$$H = Ltga - \frac{gL^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (4.13)$$

Це еквівалентно умовам поставленої задачі.

Рівняння (4.13) встановлює зв'язок між кутом вильоту α та мінімальною початковою швидкістю v_0 , необхідної для того, щоб тіло досягло заданої точки. Для одержання прийнятного для практики розв'язку необхідно обчислити похідну функції (4.13) по α , щоб знайти критичне значення α_k кута α , при якому початкова швидкість буде мінімальна

$$0 = \frac{L}{\cos^2 \alpha} + \frac{gL^2}{v_0^3 \cos^2 \alpha} \frac{dv_0}{d\alpha} - \frac{gL^2 \sin \alpha}{2v_0^2 \cos^3 \alpha}. \quad (4.14)$$

При критичному куті α_k матимемо $dv_0 / d\alpha = 0$. Із рівняння (4.14) слідує співвідношення

$$tga_k = \frac{v_0^2}{gL}. \quad (4.15)$$

З врахуванням рівняння (4.15) і тотожності $1 + tg^2\alpha = \frac{1}{\cos^2\alpha}$, з рівняння (4.12) отримаємо

$$H = \frac{v_0^2}{g} - \frac{gL^2}{2v_0^2} \left(1 + \frac{v_0^4}{g^2 L^2} \right), \quad (4.16)$$

що еквівалентно виразу

$$H = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{gL^2}{2v_0^2}. \quad (4.17)$$

Вираз (4.17) можна переписати (4.1–4.3) у вигляді бікватратного рівняння відносно v_0

$$v_0^4 - 2gHv_0^2 - g^2L^2 = 0. \quad (4.18)$$

Розв'язок рівняння (4.18) має вигляд

$$v_0 = \sqrt{gH} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{H}\right)^2}}. \quad (4.19)$$

Критичне значення кута α_k для досягнення мінімальної швидкості вильоту визначається шляхом підключення рівняння (4.19) до рівняння (4.15):

$$tg\alpha_k = \frac{H}{L} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{H}\right)^2} \right). \quad (4.20)$$

Покажемо, що траєкторія з мінімальною початковою швидкістю не досягає екстремуму в положенні точки цілі. Використовуючи рівняння (4.14), розрахуємо горизонтальне положення максимальної висоти траєкторії. Для цього скористаємося рівнянням $dz/dx=0$. Отже, положення максимальної висоти (екстремуму функції з (4.14)) знаходиться на відстані

$$x = \frac{v_0^2}{g} \frac{tg\alpha_k}{1 + tg^2\alpha_k}. \quad (4.21)$$

А з врахуванням формули (4.15) одержимо іншу (реальну) відстань

$$x = \frac{L}{1 + (gL/v_0^2)^2}. \quad (4.22)$$

Вираз (4.22) визначає місце максимальної висоти переміщення тіла. Максимум досягається перед точкою цілі. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Ця властивість траєкторії з мінімальною початковою швидкістю руху виявилась корисною для практики застосування УДПВР.

Перевіримо цей результат «на цифрах». Для цього використаємо елементи maple-програми.

А) теоретично знайдене значення мінімальної швидкості (4.19)

```
v0min:=sqrt(g*H)*sqrt(1+sqrt(1+(L/H)^2));
```

Б) знайдене значення тангенса критичного кута вильоту (4.20)

```
tgk:=H*(1+sqrt(1+(L/H)^2))/L;
```

В) відстань до положення найвищої точки траєкторії (4.21)

```
x1:=v0min^2*tgk/(g*(1+tgk^2));
```

Г) відстань до положення знайденого екстремуму (4.22)

```
x2:=L/(1+(g*L/v0min^2)^2);
```

Варіант 1. Відстань до стіни $L=10$, висота третього поверху $h=9$.
 $v0min := 16.89911241$; $tgk := 2.245362405$; $x1 := 10.81905925$;
 $x2 := 8.944542900$

Варіант 2. Відстань до стіни $L=10$, висота шостого поверху $h=18$.
 $v0min := 20.19059187$; $tgk := 3.859126028$; $x1 := 10.09058091$;
 $x2 := 9.452613939$

Варіант 3. Відстань до стіни $L=10$, висота дев'ятого поверху $h=27$.
 $v0min := 23.79229567$; $tgk := 5.579236010$; $x1 := 10.02066233$;
 $x2 := 9.708430785$

Отже, розрахунки вказують на те, що максимум функція (4.22) досягатиме на відстані меншою, ніж відстань до стіни. А це вказує на те, що траєкторія на прикінцевій фазі буде настільною. Тобто, КВР прибуде до вікна з мінімальною кінетичною енергією, що мінімізує ймовірність пошкоджень сусідніх вікон у разі помилок у розрахунках траєкторії руху.

На завершення необхідно відмітити, що дослідження стосовно мінімальної початкової швидкості спрямовані на економне використання стисненого повітря в процесі оперативного застосування УДПВР. Для економії цього ресурсу доцільно здійснювати результативні «постріли» з мінімальним тиском для забезпечення необхідної мінімальної швидкості вильоту контейнера.

4.4. Розрахунок траєкторії доставки контейнера до вікна за двома відомими відстанями

Третій етап розрахунку траєкторій доставки контейнера до палаючого вікна полягає в одержанні виразів для обчислення значень початкової швидкості вильоту й кута вильоту. Особливість результату в тому, що для опису використовуються лише два вхідні параметри – задана висота (центральної точки) вікна до рівня землі, а також задана відстань від УДПВР до стіни [24].

Апріорі вважається, що центр мас контейнера рухатиметься по параболічній траєкторії. Саме цей факт суттєвий при одержанні залежностей. Суттєвим буде й умовне поняття координат палаючого вікна, яке вимірюється такими відстанями: L – від УДПВР до стіни, а також H – висотою положення вікна від рівня землі.

Для реалізації розглянутого способу необхідні лише значення відстаней L і H , виміряних за допомогою, наприклад, лазерного далекоміра Flus «FL-60», який використовується в будівництві. А також необхідні формули для обчислення миттєвої швидкості v_0 вильоту контейнера, і значення кута вильоту α відносно рівня горизонту. Ці параметри

можна вирахувати також через зазначені координати L і H , які слід сприймати як початкові дані розв'язання задачі параболічного руху контейнера.

Нехай у декартовій системі координат $OXYZ$ задано точку $M(L, H)$, розташовану у вертикальній площині. З початку координат цієї площини за допомогою пневматичної гармати вилітає контейнер із вогнегасною речовиною, наприклад, у формі кулі. Користуючись лише координатами L і H точки цілі $M(L, H)$, визначимо значення кута α вильоту контейнера, а також значення мінімальної швидкості v_0 для досягнення точки цілі M [130–132].

Рівняння руху контейнера задаємо в параметричній формі

$$x = v_0 \cos \alpha t; \quad z = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}. \quad (4.23)$$

Виключимо з першої формули (4.23) час t і підставимо його в друге рівняння. У результаті одержимо рівняння руху контейнера в координатній формі:

$$z = xt \tan \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (4.24)$$

Припустимо, що траєкторія руху проходить через точку цілі $M(L, H)$:

$$H = x t \tan \alpha - \frac{gL^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \quad (4.25)$$

Перепишемо рівняння (4.25) у вигляді:

$$gL^2 \tan^2 \alpha - 2Lv_0^2 \tan \alpha + gL^2 + 2Hv_0^2 = 0. \quad (4.26)$$

Вираз (4.26) розглянемо як квадратне рівняння відносно параметра $\tan \alpha$. Для визначення критичного значення цього параметра використаємо аналітичні можливості мови `maple`. Для цього функцію (4.24) перепишемо у вигляді (4.25), використовуючи синтаксис мови `maple`. Далі визначимо похідну функції F по параметру $\tan \alpha$ за допомогою оператора `solve`:

$$F := g * L^2 * \tan(\alpha)^2 - 2 * L * v_0^2 * \tan(\alpha) + (g * L^2 + 2 * H * v_0^2) = 0; \quad (4.27)$$

$$F := gL^2 \tan(\alpha)^2 - 2Lv_0^2 \tan(\alpha) + gL^2 + 2Hv_0^2 = 0; \quad (4.28)$$

$$\text{solve}(F, \tan(\alpha)); \quad (4.29)$$

$$\frac{2v_0^2 + 2\sqrt{v_0^4 - g^2 L^2 - 2gHv_0^2}}{2gL}. \quad (4.30)$$

Вираз під знаком кореня квадратного повинен дорівнювати нулю (бо шукаємо критичне значення параметра). Розв'яжемо нове рівняння відносно швидкості вильоту v_0 :

$$f := v_0^4 - g^2 L^2 - 2gHv_0^2 = 0; \quad (4.31)$$

$$f := v_0^4 - g^2 L^2 - 2gHv_0^2; \quad (4.32)$$

$$\text{solve}(f, v_0); \quad (4.33)$$

$$\sqrt{gH + g\sqrt{H^2 + L^2}}. \quad (4.34)$$

Корінь розв'язку (4.33) надасть вираз для обчислення мінімальної швидкості вильоту контейнера. Для обчислення кута вильоту слід використати вирази (4.29) і (4.30) із врахуванням того, що функція (4.27) дорівнює нулю:

$$\tan(\alpha) = 1/2 * g * (2 * v_0^2 + 2) / L; \quad (4.35)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{v_0^2 + 1}{gL}. \quad (4.36)$$

Остаточно одержимо такі формули для розрахунку моделі руху по параболічній траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною з початку координат до точки з координатами $M(L, H)$:

$$v_0 = \sqrt{Hg + g\sqrt{L^2 + H^2}}; \quad (4.37)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{v_0^2}{gL}\right). \quad (4.38)$$

На основі запропонованої моделі було складено table-програму (рис. 4.3) побудови таблиці значень початкових швидкостей руху КВР, а також значень кутів вильоту КВР відносно рівня горизонту за умови, що відомі висота H «палаючого» вікна від фундаменту будівлі, а також відстань L від УДПВР до стіни.

```
Digits := 6: g:=9.81:
L := 5.: # відстань до будівлі (м)
for i from 3 to 9 do
H := 3*i:
v0[i]:=sqrt(H*g + g*sqrt(L^2+H^2));
alpha[i]:=arctan(v0[i]^2/g/L);
ugol[i]:=evalf(alpha[i]*180/Pi);
end do:
print(" відстань від УДПВР до стіни", L,"м");
print("поверх", "_№ 3", "_№ 4", "_№ 5",
"_№ 6", "_№ 7", "_№ 8", "_№ 9");
print("швидкість", seq(v0[i], i=3..9));
print("радіани ", seq(alpha[i], i=3..9));
print(" градуси ", seq(ugol[i], i=3..9));
```

Рис. 4.3. Програма побудови таблиці значень швидкостей і кутів

На рис. 4.4 наведено приклади результату виконання програми.

```
" відстань від пневмогармати до стіни", 5., "м"
"поверх", "_№ 3", "_№ 4", "_№ 5", "_№ 6", "_№ 7", "_№ 8", "_№ 9"
"швидкість", 13.7583, 15.6605, 17.3856, 18.9696, 20.4396, 21.8159, 23.1137
" градуси ", 37.7363, 39.3450, 40.3913, 41.1190, 41.6518, 42.0580, 42.3772
" відстань від пневмогармати до стіни", 10., "м"
"поверх", "_№ 3", "_№ 4", "_№ 5", "_№ 6", "_№ 7", "_№ 8", "_№ 9"
"швидкість", 14.8415, 16.4608, 18.0001, 19.4572, 20.8371, 22.1472, 23.3949
" градуси ", 32.9970, 35.0488, 36.5776, 37.7363, 38.6342, 39.3450, 39.9193
```

Рис. 4.4. Значення початкових швидкостей і кутів вилітання контейнера

Також складено maple-програму-симуляцію побудови зображення будівлі та траєкторії руху контейнера. На рис. 4.5 наведено приклад виконання програми.

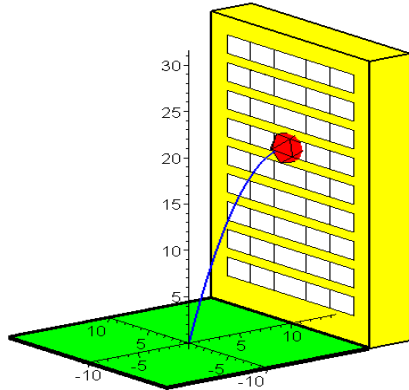


Рис. 4.5. Приклад моделювання будівлі й траєкторії контейнера

На практиці для зручного використання комп'ютерних описів траєкторій необхідні завчасно складені таблиці. Вони вказуватимуть значення кута вильоту контейнера залежно від координати необхідної точки потрапляння контейнера при відомій початковій швидкості вильоту. Для усунення незручності застосування таблиць і забезпечення оперативності розглянемо можливість використання планшета для оперативних розрахунків параметрів траєкторій доставки контейнера.

На рис. 4.6 наведено фрагмент maple-програми, яка в разі необхідності просто перекладається мовою Basic for Android-F.:

На рис. 4.7 наведено результат виконання програми. Графічно зображено множину траєкторій контейнера залежно від положення точки цілі. Кольоровими точками показано положення віртуальних вікон, де можливе виникнення пожежі. Відстань від пневматичної гармати до стіни будівлі виражається значенням параметра L .

Складена програма реалізована у вигляді анімаційного фільму. Для цього в програму слід активізувати опцію **insequence=true**. Змінною величиною є параметр H – висота положення вікна. У процесі обчис-

лень генеруються кадри траєкторії контейнера, накладених на профіль будівлі.

```
g:=9.81: Digits := 5:
L := 20.: # відстань до будівлі (м)
for i from 1 to 9 do
H[i] := 3*i:
v0:=sqrt(H[i]*g + g*sqrt(L^2 + H[i]^2)):
alpha:=arctan(v0^2/g/L):
z:=x*tan(alpha) — g*x^2/(2*v0^2*cos(alpha)^2):
strim[i] := plot(z, x=0..L+0.5, scaling=CONSTRAINED,
color=red,thickness=3,linestyle=4):
end do:
zdn:=line([L,0], [L,29], color=yellow, thickness=5):
for i from 1 to 9 do
okna[i] := disk([L,3*i], 0.5, color=red, thickness=3)
end do:
display(seq(okna[i],i=1..9), seq(strim[i],i=1..9),
zdn, scaling=constrained); #, insequence=true);
```

Рис. 4.6. Фрагмент програми опису траєкторії руху контейнера залежно від положення точки цілі

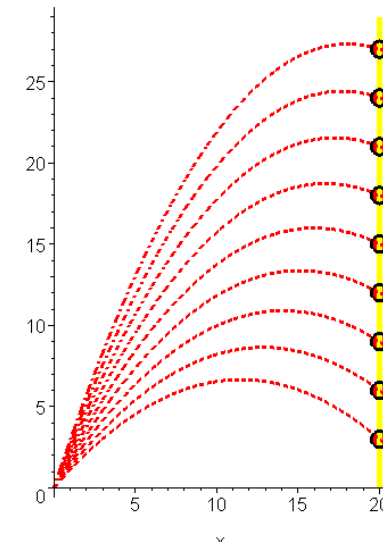


Рис. 4.7. Множина траєкторій, які досягають вікон будівлі

Використовуючи програму з рис. 4.3, можна скласти таблиці значень кутів і швидкостей, при яких траєкторія досягає потрібного зображення віртуального вікна. Користувач планшета може обрати потрібні варіанти для використання.

Для прицільної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі УДПВР повинена забезпечуватись засобами лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів та далекоміром, анеометром.

Кінцевою метою проведених досліджень стане моделювання ситуацій пожежогасіння висотних будівель із використанням сучасних планшетів.

4.5. Вплив бічного вітру на траєкторію доставки контейнера

Для дистанційної доставки контейнера слід враховувати фактор впливу бокового вітру на форму траєкторії.

Нехай у декартовій системі координат Оху задано точку з координатами М(х,у). З початку координат вилітає фізичне тіло (контейнер із вогнегасною речовиною у формі сфери). Необхідно визначити формулу для опису кута вильоту контейнера, здатного влучити в точку М(х,у). Вважатимемо, що тіло має постійну швидкість v , а гравітація визначається прискоренням земного тяжіння $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

Для розрахунку впливу бокового вітру на траєкторію спочатку необхідно визначити значення кута α , яке максимізує горизонтальний шлях траєкторії.

Звернемо увагу на те, що початковий рух контейнера по траєкторії відбувається в одній площині. Встановлюємо осі так, щоб контейнер надходив із точки (0,0) початку координат. Оскільки сила тяжіння діє вниз, маємо

$$F = ma = -mgj. \quad (4.37)$$

Таким чином $a = -g \cdot j$. Оскільки $v'(t) = a$, то одержимо

$$v(t) = -gt \cdot j + C, \quad (4.38)$$

де

$$C = v(0) = v_0 \cos(\alpha) \cdot j + v_0 \sin(\alpha) \cdot i. \quad (4.39)$$

Звідси маємо

$$r'(t) = v(t) = v_0 \cos(\alpha) \cdot i + (v_0 \sin(\alpha) - gt) \cdot j. \quad (4.40)$$

Після інтегрування отримуємо

$$r(t) = v_0 \cos(\alpha)t \cdot i + (v_0 \sin(\alpha)t - \frac{gt^2}{2}) \cdot j + D. \quad (4.41)$$

Але $r(0) = D = h j$, тому

$$r(t) = v_0 \cos(\alpha)t \cdot i + (v_0 \sin(\alpha)t - \frac{gt^2}{2} + h) \cdot j. \quad (4.42)$$

Отже підтвердили, що параметричні рівняння траєкторії мають вигляд

$$x = v_0 \cos(\alpha)t; \quad y = v_0 \sin(\alpha)t - \frac{gt^2}{2} + h. \quad (4.43)$$

Горизонтальна відстань d є значенням x , коли $y=0$. При $y=0$ отримуємо

$$v_0 \sin(\alpha)t - \frac{gt^2}{2} + h = 0 \quad (4.44)$$

Враховуючи v_0 , α і h , ми можемо визначити t в результаті розв'язання квадратного рівняння

$$t = \frac{2v_0 \sin(\alpha)}{g}. \quad (4.45)$$

Тоді

$$d = v_0 \cos(\alpha) \cdot \frac{2v_0 \sin(\alpha)}{g} = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}. \quad (4.46)$$

Цю відому з теоретичної механіки залежність для обчислення відстані польоту контейнера буде використано для визначення впливу бічного вітру на величину зміщення контейнера. У літературі [130] ефект впливу описується формулою

$$y = W_y \left(T - \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right), \quad (4.47)$$

де W_y – швидкість бічного вітру; T – тривалість руху контейнера; x – горизонтальна дальність руху контейнера; v_0 – початкова швидкість контейнера; α – кут кидання контейнера.

Формула (4.47) отримана при таких обмеженнях – сила опору руху контейнера при відсутності вітру задається у вигляді

$$F = -\frac{1}{2} \rho S C_f V, \quad (4.48)$$

де ρ – густина повітря; S – максимальна площа поперечного перерізу контейнера; C_f – безрозмірний коефіцієнт опору; V – вектор швидкості контейнера.

Побудову траєкторії переміщення контейнера доцільно здійснити за допомогою оператора maple-програми

strim:= plot([X(t),Y(t), t=0..2.3], scaling=CONSTRAINED, color=blue,thickness=3,linestyle=4).

Де описи компонентів траєкторії одержані в результаті розв'язання диференціальних рівнянь руху контейнера

X = x(t,v0,alpha,m,Cf,rho,S);

Y = y(t,v0,alpha,m,Cf,rho,S).

У програмі α – кут (у радіанах) до горизонту, під якими необхідно запустити контейнер, щоб траєкторія досягла необхідної точки вікна будівлі. При цьому також враховуються такі параметри: m – маса контейнера (кг); C_f – безрозмірний коефіцієнт опору форми; ρ – щільність

повітря, (кг/м³); v_0 – швидкість контейнера, (м/с); S – характерна площа перпендикулярна потоку повітря, (м²); $g=9.81$ (м/с²). Отже, одержані розв'язки задовольняють вимогам стосовно залученню до розрахунку формули (4.48).

Було складено maple-програму визначення кута вильоту контейнера, а також побудови відповідної траєкторії, яка досягне обрану точку вікна будинку. Як параметри обрано: $m=0,145$ кг; $r=0,069$ м; $C_f=0.01$; $\rho=1,2$ кг/м³; $S:=\pi r^2$. Відстань від пневматичної гармати до стіни $L=10$ (м). Через H (м) позначено необхідну висоту потрапляння у вікно, v_0 (м/с) – початкова швидкість вильоту контейнера.

На рис. 4.8. і 4.9. зображено траєкторії, (настільну й навісну), які потрапляють у точку «шостого поверху». Параметри розрахунків $H=18$ м; $v_0=23$ м/с. Кути вильоту вказані на рисунках.

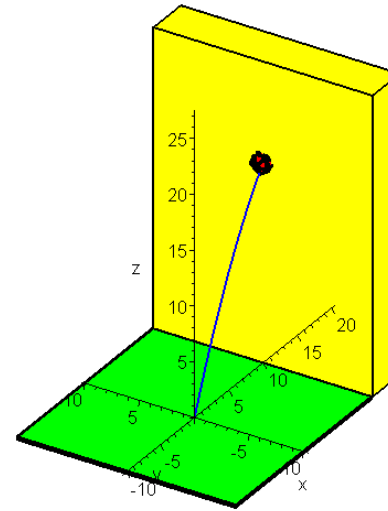


Рис. 4.8. Траєкторія настільна;
кут вильоту $\alpha=1,183$

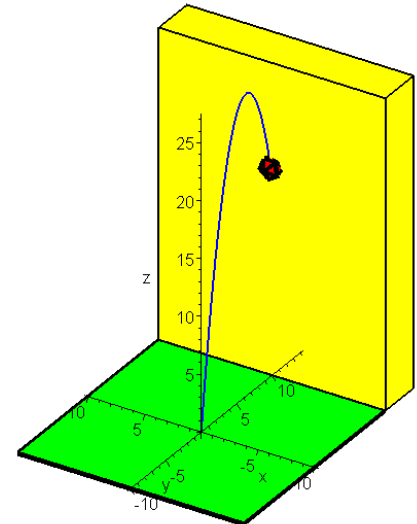


Рис. 4.9. Траєкторія навісна;
кут вильоту $\alpha=1,451$

Відхилення траєкторії при швидкості бокового вітру 5 м/с обчислюємо за формулою (4.47). Для настільної траєкторії маємо

$$y = 5 \left(1,2 - \frac{10}{23 * 0,3781} \right) = 0,25 \text{ тобто приблизне відхилення буде 25 см.}$$

Для навісної траєкторії – біля семи метрів. Тобто у вітряну погоду перевагу слід надавати настільним траєкторіям.

Результати симуляції для різних значень бокового вітру та висоти подачі КВР наведено на рис. 4.10–4.13.

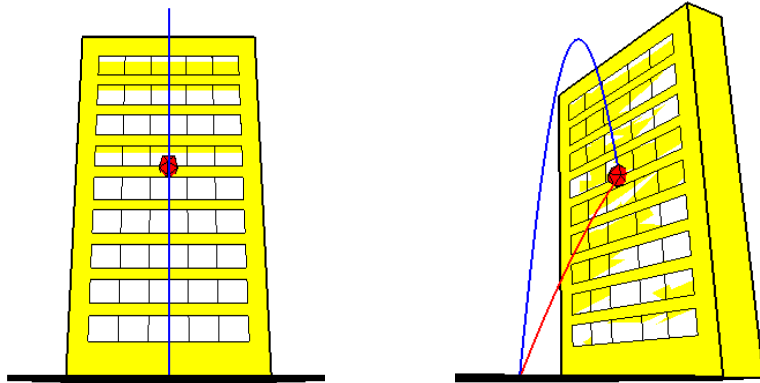


Рис. 4.10. Швидкість вітру 0 м/с на висоту 18 метрів

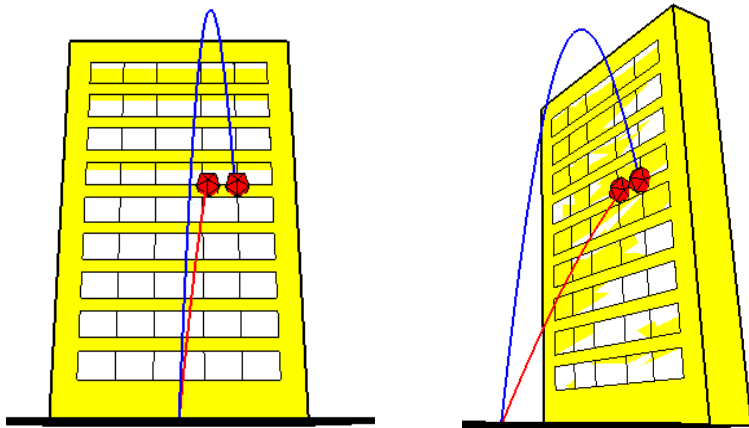


Рис. 4.11. Швидкість вітру 2 м/с на висоту 18 метрів

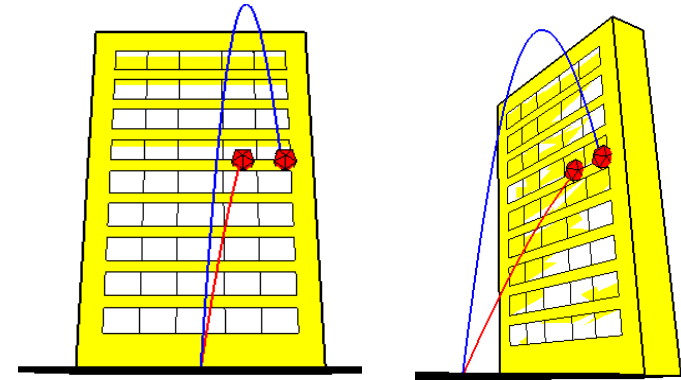


Рис. 4.12. Швидкість вітру 3 м/с на висоту 18 метрів

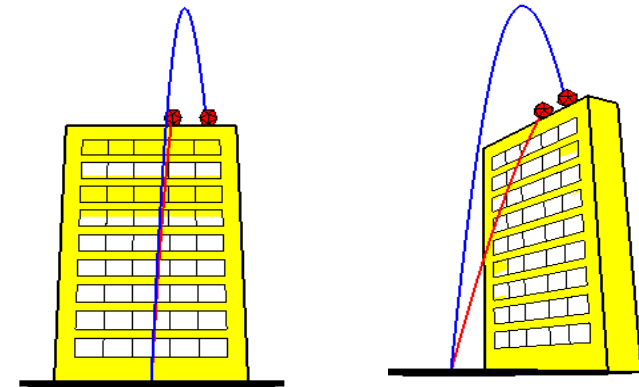


Рис. 4.13 Швидкість вітру 2 м/с на висоту 30 метрів

4.6. Практичне застосування способу локалізації пожежі шляхом дискретної доставки вогнегасної речовини

Для прицільної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі з необхідною точністю УДПВР повинен забезпечуватись засобами

лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів, далекоміром та анемометром для виміру швидкості й напрямку вітру.

Під час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до місця виклику для оперативного розгортання установки для дискретної доставки вогнегасних речовин у контейнерах необхідно:

1. З'єднати повітряний шланг 9 (див. рис. 2.8) до штуцера із «системою швидкого з'єднання» 13 (рис. 2.6).

2. Працювати з установкою для дискретної подачі вогнегасних речовин у контейнері можна як із лафету (рис. 2.8), (що забезпечують точнішу подачу вогнегасних речовин у віконний отвір), так і з безпосередньо з «рук».

3. Визначити швидкість вітру та його напрям за допомогою анемометра, дальність до будівлі й висоту, на яку необхідно здійснити подачу вогнегасної речовини в контейнері за допомогою лазерного далекоміра-кутоміра. За допомогою редуктора 10 (рис. 2.8) відрегулювати тиск у камері для стиснутого повітря ствола. Ввести параметри відстані й висоти та початкової швидкості вильоту контейнера в програмне забезпечення та отримати кут нахилу ствола для двох траєкторій настільної та навісної. Вибрати кут нахилу для необхідної траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною. Ремінь для перенесення обов'язково перекидаємо через плече для надійності фіксування ствола пожежним-рятувальником. Помістити в насадок (рис. 2.7) контейнер із вогнегасною речовиною. За допомогою інклінометра (кутоміра) нахилити ствол на необхідний кут відносно поверхні землі, натиснути на спусковий гачок 11 (рис. 2.6). Повторити дії пункту 3 для повторної доставки вогнегасних речовин. Середня інтенсивність подачі вогнегасних речовин складає 5 секунд 1 контейнер.

4. Для закріплення ствола в лафеті (рис. 2.8) для більш влучного потрапляння контейнера з вогнегасною речовиною у віконний отвір і збільшення інтенсивності подачі необхідно:

5. Повторити пункт 1.

6. Визначити швидкість і напрям вітру за допомогою анемометра, дальність до будівлі й висоту, на яку необхідно здійснити подачу вогнегасної речовини в контейнері за допомогою лазерного далеко-

міра-кутоміра. За допомогою редуктора відрегулювати тиск в камері для стиснутого повітря ствола. Ввести параметри відстані й висоти та початкової швидкості вильоту контейнера в програмне забезпечення та отримати кут нахилу ствола для двох траєкторій: настільної та навісної. Вибрати кут нахилу для необхідної траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною.

7. Вибрати необхідний кут нахилу, закріпити ствол у лафеті за допомогою скоби 5 (рис. 2.8), зафіксувати регулюючу планку 6 (рис. 2.8) по вертикалі куту нахилу ствола та упорну регулюючу основу 8 (рис. 2.8) зміни кута нахилу ствола по горизонталі за допомогою болтів.

8. Після надійного кріплення й перевірки кута нахилу ствола в лафеті помістити контейнер із вогнегасною речовиною в насадок 4 (рис. 2.7), натиснути на спусковий гачок. Повторити пункт 8 для подальшої подачі вогнегасних речовин у віконний отвір. Середня інтенсивність подачі вогнегасних речовин складає 2 секунд 1 контейнер.

Середня кількість подачі контейнерів із вогнегасною речовиною при максимальному тиску в 26 атмосфери складає 30 разів, що складає 2,5 хвилини. Після цього необхідно замінити балон із стиснутим повітрям на заправлений. Середній час заміни балона зі стиснутим повітрям займає не більше 1 хвилини.

4.7. Висновки за розділом 4

1. Виходячи з розрахунків траєкторії зовнішньої балістики контейнера при пострілі їм з УДДВР, отримано моделі для кутів вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій у заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі).

2. Розраховано мінімальну стартову швидкість, здатну забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі.

3. Описано траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти над рівнем землі за умови відомої відстані від імпульсного вогнегасника до стіни.

4. Розраховано вплив вітру на зміну «штильової» траєкторії контейнера, показано перевагу в сенсі влучності настільної траєкторії порівняно з навісною при наявності бокового вітру.

5. Наведено практичні рекомендації і алгоритм дії оператора при застосуванні їм запропонованого устаткування, яке реалізує спосіб дискретної доставки вогнегасної речовини в осередок пожежі в багатопверхових будівлях.

Висновки

У монографії розв'язано актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності пожежогасіння шляхом зменшення часу вільного розвитку пожежі за рахунок дискретної подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі.

При цьому отримано наступні висновки:

1. Проведене статистичне дослідження залежності часу оперативного розгортання й початку локалізації від поверху, на якому виникла пожежа, продемонструвало, що для кожної групи міст спостерігається зростаюча динаміка стосовно площі пожежі та часу локалізації при підвищенні поверху будівлі, де виникла пожежа. Отримані статичні дані свідчать, що площа пожежі та час локалізації збільшується для 8–9 поверхів порівняно з першим у 3,5–6 разів (у залежності від кластеру міста), що зумовлює необхідність зменшення часу локалізації за рахунок зменшення часу вільного розвитку пожежі шляхом подачі вогнегасних речовин у контейнерах (капсулах) із зовні будівель.

2. У роботі обґрунтовано тип устаткування для дискретної подачі вогнегасної речовини. В якості установки запропоновано використовувати імпульсний вогнегасник ТАЙФУН-10, який стоїть на оснащені підрозділів ДСНС України та відповідним чином модернізований, а в якості контейнерів, що містять вогнегасну речовину – пластикові капсули сферичної форми, параметри яких отримано на основі розрахунків їх механічних властивостей.

3. Методами комп'ютерного моделювання отримано опис процесу руйнації контейнера під час зіткнення з твердою поверхнею та показано, що контейнер забезпечує надійне зберігання й транспортування вогнегасної речовини під час пострілу, а в момент зіткнення його з твердою поверхнею відбувається його руйнація з розпорошенням вогнегасної речовини, яку він містить у собі.

Показано, що при зіткненні із шибкою вікна відбувається руйнація скла, що забезпечує проникнення наступних контейнерів у приміщення, в якому відбувається пожежа.

4. На основі проведених експериментальних досліджень продемонстрована ефективність запропонованого способу дискретної доставки вогнегасної речовини – температура в осередку пожежі знижується з 800 до 130 градусів упродовж 145 секунд.

Отримані параметри купності влучення контейнера в ціль дозволили оцінити імовірність попадання контейнером у віконний отвір. Показано, що ця імовірність прагне до 0,95, у той час, як імовірність небажаного влучання в сусіднє вікно прагне до 0,001.

Отримані данні щодо «дальності» методу – устаткування дозволяє посилати контейнер на відстань до 140 м.

5. Отримані математичні моделі зовнішньої балістики контейнера при дискретній подачі вогнегасної речовини, а саме – параметри настільної та навісної траєкторії, мінімальної початкової швидкості контейнера при виході зі ствола та вплив бічного вітру.

6. Розроблено практичні рекомендації використання устаткування для дискретної подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі багатоповерхової будівлі.

Список використаних джерел

1. **Polivanov O.**, Kutsenko L., Vanin V., Naidysh A., Nazarenko S., Kalynovskyi A., Cherniavskyi A., Shoman O., Semenova-Kulish V., Sivak E (2020), «Development of a Geometric Model of a New Method for Delivering Extinguishing Substances to a Distant Fire Zone», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7 (106)), p. 88–102. DOI: 10.15587/1729–4061.2020.209382
2. **Polivanov O.**, Larin O., Potopalska K., Nazarenko S., Kalynovskyi A. Probabilistic modelling of Container for Discrete Delivery of Extinguishing Agents based on a set of computational simulations. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021, p. 634–638, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570100.
3. Ларін, О. М., Кривошей, Б. І., **Поліванов, О. Г.** Аналіз використання вогнегасних речовин та способів їх доставки для цілей пожежогасіння. *Комунальне господарство міст*. 2018. Випуск 7(146), с. 146–150.
4. Калиновський А. Я., Куценко Л. М., **Поліванов О. Г.**, Геометричне моделювання способу метання для боротьби з пожежами. *Міжвідомчий науково-технічний збірник. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2020. Випуск 98, с. 94–103.
5. **Поліванов О. Г.**, Куценко Л. М., Калиновський А. Я., Ковальов О. О., Полтавський Е. М. Новий спосіб дискретної доставки вогнегасних речовин. *Збірник наукових праць «Проблеми пожежної безпеки»*. 2020. Випуск 48, с. 94–103.
6. **Поліванов О. Г.** Дослідження часу локалізації пожеж у багатоповерхових будівлях у містах України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2023. № 3 (17), с. 49–55. DOI:10.20998/2413–4295.2023.03.07.
7. **Polivanov O.**, Kalinovskiy A. Computer modeling of the trajectory delivery container with fire extinguisher substance for multi-story building. *Polish journal of science*. Warszawa, Poland, 2023, pp. 24–28. DOI:10.5281/zenodo.8242545.
8. Спосіб доставки вогнегасного елемента в осередок пожежі: пат. 150681 Україна: МПК (2006) A62C 3/00, A62C 3/06 (2006.01), A62C 31/00, E21B 35/00. № u202106156; заяв. 02.01.2021; опубл. 09.03.2022, бюл. № 10.

9. Спосіб гасіння пожежі: пат. 153076, МПК (2023.01) A62C 5/033 (2006.01), A62C 31/00. № u202204023; заяв. 26.10.2022; опубл. 17.05.2023, бюл. № 20.
10. Калиновський А. Я., **Поліванов О. Г.** Застосування вогнегасних порошків в контейнерах. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням. Харків: НУЦЗУ, 2019, с. 45–46.
11. **Поліванов О. Г.** Сучасні проблеми гасіння пожеж у висотних будівлях. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної наук.-практ. конф., Харків: НУЦЗУ 2020, с. 11.
12. Калиновський А. Я., **Поліванов О. Г.** Дослідження руйнування скла контейнером з вогнегасною речовиною. Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація: Матеріали круглого столу (вебінару). Харків: НУЦЗУ, 2022, с. 155–157.
13. **Поліванов О. Г.** Основні аспекти дослідження дискретної доставки вогнегасних речовин. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: Матеріали круглого столу. Харків: НУЦЗУ, 2022, с. 120–121.
14. Калиновський А. Я., **Поліванов О. Г.** Залежність часу локалізації від площі пожежі та поверху на котрому вона сталася. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2022, с. 197.
15. **Polivanov O.** Study of the mechanical properties of the material from which capsules are made for the discrete delivery of fireextinguishing substances. «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»): матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗУ, 2022, с. 296–298.
16. **Поліванов О. Г.,** Калиновський А. Я. Інтенсивність напружень у склопакетах, які виникають за рахунок дискретної доставки вогнегасних речовин. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2023, с. 177.
17. **Поліванов О. Г.,** Фурманов О. О. Дослідження руйнування склопакетів за рахунок дискретної доставки вогнегасних речовин. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2023, с. 184.

18. **Поліванов О. Г.,** Калиновський А. Я. Спосіб доставки вогнегасних речовин до внутрішніх частин дворів будівель. Progressive research in the modern world. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. BoScience Publisher: Boston, USA. 2023, pp. 70–79. URL: <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-progressive-research-in-the-modern-world-17-19-08-2023-boston-ssha-arhiv/> (дата звернення: 19.10.2023).
19. **Поліванов О. Г.,** Калиновський А. Я. Вплив бокового вітру на технологію доставки вогнегасних речовин до будівлі способом метання. Science and innovation of modern world. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House: London, United Kingdom. 2023. Pp. 86–91. URL: <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-innovation-of-modern-world-10-12-08-2023-london-velikobritaniya-arhiv/> (дата звернення: 14.8.2023).
20. **Поліванов О. Г.,** Калиновський А. Я. Спосіб складання таблиці кутів доставки вогнегасних речовин до багатопверхової будівлі. European scientific congress. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing: Madrid, Spain. 2023, pp. 54–60. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-scientific-congress-7-9-08-2023-madrid-ispaniya-arhiv/> (дата звернення: 25.09.2023).
21. **Поліванов О. Г.** Моделювання траєкторії доставки вогнегасної речовини до багатопверхових будівель. V International Scientific and Theoretical Conference «Advanced discoveries of modern science: experience, approaches and innovations»: Amsterdam, Netherlands. 2023, pp. 92–94. DOI:<https://doi.org/10.36074/scientia-11.08.2023>
22. **Поліванов О. Г.,** Калиновський А. Я. Про траєкторію руху тіла, випущеного під кутом до горизонту з мінімальною початковою швидкістю. Scientific progress: innovations, achievements and prospects. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. MDPC Publishing: Munich, Germany. 2023, pp. 59–65. URL: <https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-progress-innovations-achievements-and-prospects-21-23-08-2023-myunhen-nimechchina-arhiv/> (дата звернення: 4.10.2023).
23. Калиновський А. Я., **Поліванов О. Г.** Про мінімальну початкову швидкість тіла, випущеного під кутом до горизонту. Scientific research in the modern world. Proceedings of the 11th International scientific and practical

- conference. Perfect Publishing: Toronto, Canada. 2023, pp. 155–160. URL: <https://sciconf.com.ua/xi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-researchin-the-modern-world-24-26-08-2023-toronto-kanada-arhiv/> (дата звернення: 2.10.2023).
24. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Розробка способу розрахунку параметрів доставки контейнера-вогнегасника до вікон висотних будинків. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. SSPG Publish: Stockholm, Sweden. 2023, pp. 68–76. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovations-and-prospects-in-modern-science-28-30-08-2023-stokholm-shvetsiya-arhiv/> (дата звернення: 17.09.2023).
 25. Поліванов О. Г., Експериментальне дослідження дискретної доставки вогнегасної речовини в осередок пожежі. Scientific researches and methods of their carrying out: world experience and domestic realities: VI CISP Conference. Grail of Science, (30), 2023, с. 119–121. doi: 10.36074/grail-of-science.04.08.2023.017.
 26. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2018 році. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/9/9/5/7/3/2019-1-18-321-publicnii-zvit-za-2018-rik.pdf> (дата звернення: 3.05.2021).
 27. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році. URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit_2019/zvit-2019-dsns.pdf (дата звернення: 3.05.2021).
 28. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2020 році. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2020/zvit-2020-dsns.pdf> (дата звернення: 3.05.2021).
 29. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2018 році. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/6/8/1/6/9/1VSPpfqdkExu8pkT9nQ6J8VV4MIcND2gG9vEIBb.pdf> (дата звернення: 3.05.2021).
 30. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2022 році. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/6/4/9/3/5/0/publicnii-zvit-2022-ostannia-versiia-1.pdf> (дата звернення: 15.02.2023).
 31. World Fire Statistics. The CTIF Fire Statistics magazine no 28. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/2023-06/CTIF_Report28-ESG.pdf

32. The International Association of Fire Services. URL: <https://www.ctif.org/> (дата звернення: 18.07.2022).
33. The Geneva Association. URL: <https://www.genevaassociation.org/> (дата звернення: 21.07.2022).
34. Поліванов О. Г. Сучасні проблеми гасіння пожеж у висотних будівлях. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. 2020, с. 11.
35. Ono, R. 2003. An analysis of high-rise building fires and human fire safety consciousness through fire statistics and field survey. Fire Safety Science 1073–1084.
36. Omar M, Mahmoud A, Abdul Aziz SB. Critical Factors Affecting Fire 6(2):68. DOI: 10.3390/fire6020068
37. Tracy, J., Murphy, J., & Murtagh, J. (2023). High-rise Buildings: Understanding the Vertical Challenges. Fire Engineering Books.
38. Гасанов Х. Ш. Підвищення ефективності ліквідації пожеж за рахунок скорочення часу виявлення осередку пожежі: дисертація. 2018.
39. Song L. Z., Zhu J., Liu S. T., Qu Z. J. Recent Fire Safety Design of High-Rise Buildings. J. Urban Dev. Manag., № 1(1), 2022, p. 50–57. DOI: 10.56578/judm010106
40. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R.. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. Fire, 2022. № 5(3), p. 75. DOI:10.3390/fire5030075
41. Arewa A. O., Ahmed A., Edwards D. J., Nwankwo, C. Fire Safety in High-Rise Buildings: Is the Stay-Put Tactic a Misjudgement or Magnificent Strategy?. Buildings, 2021. № 11(8), P. 339. DOI:10.3390/buildings11080339
42. Kodur V. K. R., Venkatachari S., Naser M. Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. Fire Technol. 2020, № 56, p. 2035–2057. DOI: 10.1007/s10694-020-00965-3
43. Ugur Dundar, Serdar Selamet, Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings. Fire Safety Journal. 2023. № 135, p. 2–13. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103710
44. Liu D, Xu Z, Yan L, Wang F. Applying Real-Time Travel Times to Estimate Fire Service Coverage Rate for High-Rise Buildings. Applied Sciences. [Online]. 2020. № 10(19) P. 6632. DOI: 10.3390/app10196632
45. Bilyaz S., Buffington T., Ofodike A. Ezekoye, The effect of fire location and the reverse stack on fire smoke transport in high-rise buildings. Fire Safety Journal 2021. № 126. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103446

46. Rahmani A., Salem M. Simulation of Fire in Super High-Rise Hospitals Using Fire Dynamics Simulator (FDS). *Electronic Journal of General Medicine*. 2020. № 17(3), em200. P. 1–5. DOI: 10.29333/ejgm/7848
47. Omar M., Mahmoud A., Aziz S. B. Fire Safety Index for High-Rise Buildings in the Emirate of Sharjah, UAE. *Fire*. 2023. № 6, P. 51. DOI: 10.3390/fire6020051
48. Довідник керівника гасіння пожежі / за загальною редакцією Кропивницького В. С. К.: ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.
49. Liu, Y. C., Jiang, J. C., & Huang, A. C. (2023). Experimental study on extinguishing oil fire by water mist with polymer composite additives. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 148(11), 4811–4822.
50. Tapscott, R. E., & Morehouse, E. T. (1987). Next-generation Fire Extinguishing Agent: Phase I Suppression Concepts. Albuquerque, NM, USA: New Mexico Engineering Research Institute.
51. Guo, X., Zhang, H., Pan, X., Zhang, L., Hua, M., Zhang, C., ... & Jiang, J. (2022). Experimental and numerical simulation research on fire suppression efficiency of dry powder mediums containing molybdenum flame retardant additive. *Process Safety and Environmental Protection* 159. 294–308.
52. Sun, H., Zhang, L., Duan, Q., Wang, S., Sun, S., Sun, J., & Wang, Q. (2022). Experimental study on suppressing thermal runaway propagation of lithium-ion batteries in confined space by various fire extinguishing agents. *Process Safety and Environmental Protection* 167, 299–307.
53. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А. Технічні засоби пожежогасіння дрібнорозпилим водняним струменем. *Проблеми пожежної безпеки*. 2018. № 43, с. 45–53. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7022> (дата звернення: 16.11.2020).
54. Лісняк А. А., Бородич П. Ю. Підвищення ефективності гасіння пожеж твердих горючих матеріалів в будівлях. *Проблеми пожежної безпеки*. 2013. № 34, с. 115–119. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1063> (дата звернення: 15.11.2020).
55. Коваль м. Чалий Д. Ковальчук В. Лоїк В. Синельников О. Паснак І. Ренкас А. Домінік А. Товарянський В. Ключка Ю. Матухно В. Поліщук Д. Гассієв С. Лісняк А. Слепужников Є. Криворучко Є. Покалюк В. Григор'ян м. Костенко Т. Журбинський Д. Фомін А. та ін. Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану : навчальний посібник. Львів: ЛДУБЖД, 2023. 308 с.

56. Товарянський, В. І. Сучасні тенденції у сфері виробництва протипожежних аеродромних автомобілів. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів: ЛДУ БЖД, 2022, с. 449–451.
57. Kuzyk, A., Drach, K. i Tovaryanskyi, V. 2021. Експериментальні дослідження гасіння трав'яних пожеж потоками повітря та повітряно-водяної суміші. *Пожежна безпека*. 2021. № 39, с. 43–48. DOI: 10.32447/20786662.39.2021.05.
58. Kustov, M., Melnichenko, A., Basmanov, O., & Tarasenko, O. (2022, September). Modeling of Gas Sorption Process by Dispersed Liquid Flow. In *Materials Science Forum* (Vol. 1068, pp. 239–247). Trans Tech Publications Ltd.
59. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Охолодження резервуара з нафтопродуктами за допомогою гідромонітора з фіксованим кутом нахилу. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 45, с. 149–153. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8956> (дата звернення: 28.09.2020).
60. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Алгоритм розрахунку охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 46, с. 174–178. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11119> (дата звернення: 28.09.2020).
61. Ніжник В. В. Визначення параметрів подавання води з системи пожежогасіння в підкупольних дерев'яних конструкціях культових споруд. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2013. № 2(28), с. 168–174.
62. Савченко, А. В., Басманов, А. Е., Абрамов, Ю. А., Говаленков, С. С., Дадашов, И. Технология подачи компонентов гелеобразующих систем для защиты конструктивных элементов резервуаров на нефтебазах от теплового воздействия при ликвидации пожаров. *Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020, с. 4–6.
63. Козяр Н. М. Шляхи підвищення ефективності застосування водних та водопінних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2009. № 2 (20). URL: http://firesafety.at.ua/visnyk/2009_No_2-20/Kozyar.pdf (дата звернення: 24.09.2019).
64. Кіреєв О. О., Куценко Л. М., Калиновський А. Я., Кривошей Б. І., Сухарькова О. І. Розробка способу дистанційної доставки вогнегасних

- речовин у гантелеподібному контейнері. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. №4(34), с. 41–57. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14816> (дата звернення: 22.01.2022).
65. Остапов К. М., Сенчихін Ю. М., Аветісян В. Г., Грицина І. М. Удосконалення подавання гелеутворюючих складів установкою гасіння з подовженим стволем. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. вип. 1(35). С. 96–108. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-7.
 66. Ostapov K., Kirichenko I., Senchykhyn Y. Improvement of the installation with an extended barrel of cranked type used for fire extinguishing by gel-forming compositions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4(10 (100)). P. 30–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174592
 67. Киреев А. А. Исследование огнетушащего действия гелеобразующих составов на модельных очагах пожаров класса а с высокой плотностью укладки. Проблеми Пожежної безпеки. 2010. №27, с. 77–82.
 68. Liu, T., Yin, X. Y., Liu, Y. C., Tang, Y., Huang, A. C., Dong, X. L., & Liu, Y. J. (2022). Influence of Water Mist Temperature Approach on Fire Extinguishing Effect of Different Pool Fires. *Processes*, 10(8), 1549.
 69. Lu, Y., Wang, T., Pang, M., & Tian, Z. J. (2018). Preparation and high temperature resistance of a novel aqueous foam for fire extinguishing. *Procedia engineering*, 211, 514–520.
 70. Syzykov A. A., Zhartovskyi S. V., Nyzhnyk V. V., Ballo Ya. V., Benediuk V. S. The influence of targeted water additives on the effectiveness of a fire extinguishing system. *Vestn. un-ta Hrazhd. Zashch.*. 2017. Vyp.25, с. 35–43.
 71. Кодрик, А. ., Коваленко, В., Тітенко, О., Борисов, А., Стилик І., & Борисова, А. (2022). Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Вип. 1(13), с. 24–34. DOI: 10.33269/nvcz.2022.1(13).24–34.
 72. Карвацька, м., Лавренюк, О., & Михалічко, Б. (2023). Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Вип. 1(15), с. 92–100. DOI: 10.33269/nvcz.2023.1(15).92–100
 73. Коврегін В. В., Калугін В. Д., Кустов м. В., Сидоренко О. В. Підвищення ефективності пожежогасних складів на основі води за рахунок добавок різних реагентів. Вісник ЛДУБЖД. 2010. №4. Ч. 1, с. 136–142.
 74. Zhang Tianwei, Liu Hao, Han Zhiyue, Du Zhiming, Wang Yong. Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt

- additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, 2017. Vol. 122, p. 429–438.
75. Joseph P., Nichols E., Novozhilov V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 58, p. 221–225.
 76. Ming-Hui Feng, Jun-Jun Tao, Jun Qin and Qin Fei. Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additive. *Journal of Fire Sciences*. 2016. Vol. 34(1), p. 51–68.
 77. Linteris G. T., Knyavez V. D., Babushok V. I. Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds. *Combustion and Flame*. 2002. Vol. 129(3), p. 221–238.
 78. Linteris G. T., Rumminger M. D., Babushok V. I. Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34(3), p. 288–329.
 79. Linteris G. T., Katta V. R., Takahashi F. Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138 (1–2). P. 78–96
 80. Антонов А. В. та ін. Вогнегасні речовини : посіб. Київ : Пожінформтехніка. 2004. 176 с.
 81. Tianwei, Z., Cunwei, Z., Hao, L., & Zhiyue, H. (2020). Experimental investigation of novel dry liquids with aqueous potassium Solution@ Nano-SiO₂ for the suppression of liquid fuel fires: Preparation, application, and stability. *Fire Safety Journal*, 115, 103144.
 82. Wang, Q., Wang, F., Li, C., Li, Z., & Li, R. (2021). Fire extinguishing performance and mechanism for several typical dry water extinguishing agents. *RSC advances*, 11(17), 9827–9836.
 83. Tianwei, Z., Hao, L., Zhiyue, H., Zhiming, D., & Yong, W. (2017). Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, 122, 429–438.
 84. Остапов К. М., Сенчихін Ю. М., Аветісян В. Г., Грицина І. М., Гапоненко Ю. І. Обґрунтування тактико-технічних переваг універсальної гусеничної пожежної машини. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. №2(36). 2022, с. 296–311. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17045> (дата звернення: 19.01.2023).
 85. Norman J. *Fire Officers Handbook of Tactics 5th Edition*: South Sheridan Road Tulsa. Oklahoma. 2019. P. 642. URL: <https://>

- fireengineeringbooks.com/fire-officers-handbook-of-tactics-5th-edition/ (дата звернення: 22.03.2021).
86. Хілько Ю. В., Мелешенко Р. Г., Визначення параметрів вогнегасної ефективності викиду порошкових сумішей з контейнерів. Проблеми пожежної безпеки. 2017. №41. с.196–200.
 87. Козяр Н. М. Механізм дії та методологія розроблення рецептур порошкових вогнегасних засобів для гасіння пожеж класу А. Пожежна безпека. 2014. №24, с. 79–84.
 88. Nolan, D. P. (2014). Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities. William Andrew.
 89. Zhao, J., Xue, F., Fu, Y., Lu, S., & Zhang, H. (2023). Insights into the particle diameter and base chosen for dry powder fire extinguishing agents. *Fire and Materials*, 47(6), 774–783.
 90. Wang, X. (2023, July). Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2539, No. 1, p. 012091). IOP Publishing.
 91. Wang Y., Zhu G., Chai G., Zhou Y., Chen C., Zhang W. Experimental study on the effect of release pressure on the extinguishing efficiency of dry wate. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 26 (August). 101177. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101177.39/d1ra00253h.
 92. Гусар Б. м. Вдосконалення технології гасіння пожеж класу D та A, В. : дисертація (2021). URL:https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/svr/razovi/gusar/%D0%90%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F.pdf (дата звернення: 17.01.2022).
 93. Баланюк В. М. Пожежогасіння серіями ударних хвиль. Проблеми пожежної безпеки. 2016 №40, с. 26–34.
 94. Shah, A., Muthalia, Y., Vishwakarma, V., & Jain, R. (2023, May). Targeted Extinguishing of Fire Through the Propagation of Acoustic Waves. In 2023 2nd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC) (pp. 1565–1570). IEEE.
 95. Zhang, L., Guan, H., Feng, Z., Sun, M., & Jin, H. (2023). Modeling and Simulation of a Shock Driving Gas Jet Laden with Dense Extinguishant Particles Through a Tube with a Tail Nozzle. *Fire Technology*, 1–38.
 96. Потапенко А. В., Ніжник В. В., Нікулін О. Ф. Пожежі на відкритих територіях тенденції удосконалення способів їх гасіння. Збірник наукових праць, 2022.

97. Tang, Z., Wang, Z., & Zhao, K. (2023). Flame stabilization characteristics of turbulent hydrogen jet flame diluted by nitrogen. *Energy*, 283, 129100.
98. Saito, N., Ogawa, Y., Saso, Y., Liao, C., & Sakei, R. (1996). Flame-extinguishing concentrations and peak concentrations of N₂, Ar, CO₂ and their mixtures for hydrocarbon fuels. *Fire Safety Journal*, 27(3), p. 185–200.
99. Aydin, B.; Selvi, E.; Tao, J.; Starek, M. J. Use of Fire-Extinguishing Balls for a Conceptual System of Drone-Assisted Wildfire Fighting. *Drones* 2019, 3, 17. DOI: 10.3390/drones3010017
100. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж : наказ MBC України від 26.04. 2018 №340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0801-18> (дата звернення: 22.07.2018).
101. Kodur, V., Kumar, P., & Rafi, M. M. (2020). Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*, 4(1), 1–23.
102. Restás, Á., Pantya, P., & Horváth, L. (2015). Disaster management from the viewpoint of fire protection in Hungary. From the effectiveness of fire prevention to the safety of firefighters: Complexity of the firefighters' work in crisis situations. *Advances In Environmental Sciences: International Journal Of The Bioflux Society*, 7(2), 272–276.
103. Cote, A. E., Hall, J. R., Powell, P., Grant, C. C., & Solomon, R. E. (2008). *Fire protection handbook* (Vol. 1). NationalFireProtectionAssoc.
104. Cone, D. C., MacMillan, D., Parwani, V., & Van Gelder, C. (2008). Threats to life in residential structure fires. *Prehospital Emergency Care*, 12(3), 297–301.
105. Tsebryuk, I., Vinogradov, S., Kalinovs'kiy, A., & Temnikov, V. Аналіз автомобільних та інших засобів гасіння газових фонтанів, розроблення їх класифікації та індексації. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. 25(8), 232–240. DOI: 10.15421/40250839
106. Hlaváčová, I. M., & Vondra, A. (2016). Future in marine fire-fighting: High pressure water mist extinguisher with abrasive water jet cutting. *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo*, 63(3 Special Issue), 102–107.
107. Song, H., Yao, H., Wei, X., Qin, H., Li, Y., Lv, K., & Chen, Q. (2023). Experimental Study on Fire Suppression of the Outdoor Oil-Immersed Transformer by High-Pressure Water Mist System. *Fire*, 6(6), 238.
108. Виноградов С. А. Підвищення ефективності гасіння газових фонтанів : дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.02 / Харків, 2012. 168 с.

109. O. P. Korobeinichev, A. G. Shmakov, A. G. Tereshchenko IMPULSE SPRAY FIRE-EXTINGUISHING SYSTEM Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy. 2011. URL: <http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.combustion-institute.it%2Fproceedings%2FMCS-7%2Fpapers%2FFE%2FFE-13.pdf&ei=BNdXUpqGMvP64QSOwYGoAg&usg=AFQjCNG4n-eqiNUJys4YtAuAnlEdixuVtg&sig2=6g6YW6LsvXyP4ldwq6qCQ&bvrm=bv.53899372, d.bGE> (дата звернення: 12.05.2019).
110. Klemens, R., Szatan, B., Gieras, M., Wolański, P., Maranda, A., Nowaczewski, J., & Paszula, J. (2000). Suppression of dust explosions by means of different explosive charges. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3–5), 265–275.
111. Захматов В., Цікановський В., Кожем'якін О. Гасіння газових фонтанів імпульсними установками пожежогасіння. *Охорона праці : зб. наук. праць*. 1997. № 5, с. 112–115.
112. Zakhmatov V. D., Silnikov M. V., Chernyshov M. V. Overview of impulse fire-extinguishing system applications. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2016. № 32 (2). P. 490–499.
113. Fire Commander das Kettenfahrzeug mit modernster Löschtechnologie zur Bekämpfung von Großbränden. URL: http://www.jungenthal-wt.de/fileadmin/www.jungenthal-wt.de/bilder-jwt/unternehmen/Prospekt_FireCommander.pdf (дата звернення: 2.02.2023).
114. iFEX–Mongoose ATV Dual Intruder System. URL: http://www.ifexuk.com/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=66 (дата звернення: 2.02.2023).
115. Лісняк А. А., Бородин П. Ю. Підвищення ефективності гасіння пожеж твердих горючих матеріалів в будівлях. *Проблеми пожарной безопасности*. 2013. № 34, с. 115–119. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1063> (дата звернення: 2.05.2020).
116. Калиновський А. Я., Ковальов О. О., Поліванов О. Г. Розробка окремих аспектів контейнерного методу пожежогасіння. *Пожежна безпека*. 2019. Вип. 34, с. 35–42.
117. Дубінін, Д. П., Коритченко, К. В., Криворучко, С. м., & Думчикова, Д. (2019). Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі водним аерозолем у приміщеннях складної конфігурації.
118. Zhang, X., Ismail, M. H. S., & Hee, C. (2015). Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32, 707–724.

119. Rohilla, M., Saxena, A., Tyagi, Y. K., Singh, I., Tanwar, R. K., & Narang, R. (2022). Condensed aerosol based fire extinguishing system covering versatile applications: A review. *Fire Technology*, 58(1), 327–351.
120. Kuti R. Advantages of Water Fog Use as a Fire Extinguisher. *AARMS*. 2015. Vol. 14, Issue 2. P. 259–264.
121. Герасим'юк О. І. Розвиток наукових аспектів комбінованого застосування вогнегасних аерозолів, газів та порошків. 2016.
122. Дунюшкін В. О., Огурцов С. Ю. Дослідження показників вогнегасної ефективності модулів порошкового пожежогасіння. *Пожежна безпека-2011: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 17–18 листопада 2011р. Харків: НУЦЗ України, 2011. 372 с. Матеріали містять тези доповідей, які виголошувались на X Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна безпека-2011». У збірнику розглядаються аспекти вдосконалення пожежної безпеки держави. С. 317.*
123. Інтернет ресурс. URL: https://www.draeger.com/en_uk/ (дата звернення: 17.11.2022).
124. Інтернет ресурс. URL: <https://donmet.com.ua/uk> (дата звернення: 17.11.2022).
125. Інтернет ресурс. URL: <https://www.flir.com/> (дата звернення: 17.11.2022).
126. Юзевич В. М. Навчальний посібник «Теорія ймовірностей та математична статистика» Львів: ЛьвДУВС, 2017, с. 292 с.
127. Іванюта І. Д., Рибалка В. І., Рудоміно-Дусятська І. А. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики. Слово. 2003, с. 272 с.
128. Канівська І. Ю. Теорія ймовірностей у прикладах і задачах. ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», ТОВ «Фірма «Періодика»». 2004. с. 156 с.
129. Барковський В. В., Барковська Н. В., Лопатін О. К. Теорія ймовірностей та математична статистика. ЦУЛ. 2002. С. 448.
130. Mizrahi J. Minimum velocity of a projectile in parabolic motion to pass above a fence. *Making Physics Clear*. URL: <https://makingphysicsclear.com/minimum-velocity-of-a-projectile-in-parabolic-motion-to-pass-above-a-fence/> (дата звернення: 9.09.2023).
131. Mizrahi J. Ballistic motion – Maximum horizontal reach when firing from a height. *Making Physics Clear*. URL: <https://makingphysicsclear.com/ballistic-motion-maximum-horizontal-reach-when-firing-from-a-height/> (дата звернення: 9.09.2023).
132. Velychko L., Petruchenko O., Tereshchuk O. Вплив бічного вітру на динаміку руху снаряда. *Військово-технічний збірник*. 2020. (23), с. 17–21. DOI: 10.33577/2312-4458.23.2020.17-21

Наукове видання

**Поліванов О. Г. ,
Калиновський А. Я.,
Коваленко Р. І.**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОЖЕЖОГАСІННЯ
ЗА РАХУНОК ДИСКРЕТНОЇ ПОДАЧІ
ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН**

Монографія

Формат 60×84 ¹/₁₆. Підписано до друку 22.11.2025.
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.
Обл.-вид. арк. 4. Ум. друк. арк. 8.1.
Наклад 100 прим.

Видавництво «Діса плюс»
Тел. (057) 768-03-15

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників та розповсюджувачів видавничої продукції:
серія ДК № 4047 від 15.04.2011 р.

Надруковано в друкарні «БУКЛАЙН»
61000, м. Харків, вул. Катерининська, 46.
Тел. (099) 604-49-45
www.bookline.online